

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ
МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ ТЕМАТИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

ВЫПУСК 6

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

1971

В настоящем сборнике опубликованы статьи проблемного и дискуссионного характера, посвященные некоторым вопросам бионики.

Рассмотрены вопросы математического моделирования функциональных свойств зрения, слуха, вкуса, вибрационной (кожной) чувствительности человека, распознавания зрительных образов, восприятия и нормализации пространственных зрительных картин, функционирования нейрореподобных структур.

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

Редакционная коллегия:

чл.-корр. АН СССР Б. С. Согсков (отв. редактор),
чл.-корр. АМН СССР Н. М. Амосов, докт. техн. наук
Ю. П. Шабанов-Кушнаренок (зам. отв. редактора), проф.
А. А. Волков, доц. Е. П. Путятин, канд. биол. наук К. А. Иванов-Муромский, канд. техн. наук М. Ф. Бондаренко (отв. секретарь), доц. В. А. Грабина, В. А. Лившицкий.

Адрес редакционной коллегии:
Харьков, ГСП-218, пр. Ленина, 14, Харьковский институт радиозлектроники.

Ответственный за выпуск Е. Г. Качко.

ОБ ОСНОВАНИЯХ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕОРИИ ЗРЕНИЯ

В. К. Казан

Суждение о том, что зрение доставляет информацию о внешнем мире, перестало быть тривиальным с появлением математических теорий, согласно которым информация — фактор, поддающийся объективной количественной оценке. Классическим трудом К. Шеннона [1] было положено начало широко развивающемуся направлению физиологической оптики, в которой зрительный анализатор рассматривается как информационная система. Помимо этого, к настоящему времени существенно продвинулась разработка математических моделей передачи и приема информации. В связи с этим обсуждение оснований, на которых может строиться информационная теория зрения, представляется своевременным. Рассмотрим следующее:

1) в какой мере существующие математические модели позволяют описать работу зрения;

2) целесообразна ли постановка вопроса о количестве информации, перерабатываемой зрительным анализатором, особенно в случае восприятия достаточно сложных зрительных картин.

Неодинаковый подход к определению понятий «информация» и «количество информации» объясняется возможностью по-разному уточнять смысл интуитивно понятного, но в действительности расплывчатого выражения «наблюдатель получает информацию из эксперимента». На этом и основывается следующий ниже краткий обзор математических моделей теории информации.

Комбинаторный подход

Во многих случаях извлечение информации сводится к тому, что наблюдатель среди множества полученных в эксперименте объектов выбирает один, отличающийся от всех остальных единственным признаком (например, пустотелый шар среди N шаров одинакового диаметра, сделанных из одного материала). Если наблюдатель действует методом проб и ошибок, то чем больше N , тем больше число проб, и, естественно, тем большее количество информации несет подсказка, избавляющая от необходимости этих проб. Одно из возможных установлений количества информации — число элементарных шагов (проб), приводящих к цели. Это же число можно рассматривать и как меру неопределенности исходной ситуации. Элементарные шаги определяются различно. Так, в примере с шарами, если наблюдатель имеет в своем распоряжении двухчашечные весы, элементарный шаг может состоять в последовательном делении шаров на две равные по числу группы и в сравнении последних по весу. Выбирая всякий раз более легкую группу, наблюдатель обнаружит пустотелый шар, проделав в точности $\log_2 N$ взвешиваний при $N = 2^n$ (n — целое). Если $N \neq 2^n$ и в процессе деления встречаются нечетные числа, то правило выбора усложнится. При нечетном N_k (k — номер пробы) нужно разделить $N_k - 1$ шаров на

две группы. Если вес групп окажется одинаковым, то искомый шар тот, который не попал на весы; в противном случае надо выбирать более легкую группу. Второй случай более вероятен, а потому при достаточно больших N среднее число взвешиваний окажется близким к $\log_2 N$. Но усложненное правило позволяет существенно сократить число взвешиваний. N можно последовательно делить на три приблизительно равные группы, из которых две содержат одинаковое число шаров, и выбирать всякий раз либо более легкую группу, либо (если вес одинаков) группу, не попавшую на весы. Число взвешиваний в таком случае будет близко к $\log_3 N$. Нетрудно представить возможность дальнейшего уменьшения числа взвешиваний при условии замены двухчашечных весов более сложным устройством, позволяющим в результате однократной пробы сделать выбор не из трех, а из большего числа шаров.

Приступим к обсуждению двухступенчатого выбора.

Частный случай этого важного обобщения рассмотрим в указанном примере с шарами: выбирая одну из групп, уменьшаем число шаров, среди которых нужно найти пустотелый. Таким образом, указание группы меньшего веса дает информацию о шаре. Этот пример поддается обобщению. Пусть элементы $x \in X$ и $y \in Y$ связаны таким образом, что не все комбинации x, y возможны. Обозначим $N(Y)$ число элементов множества Y и $N(Y_a)$ — число элементов подмножества $Y_a \subset Y$, для которых возможны комбинации a, y . Иными словами, Y_a есть множество y , возможных при $x = a$.

Непосредственный выбор y из Y означает получение $\log_2 N(Y)$ двоичных единиц информации; если же заранее известно соответствие искомого y значению $x = a$, то y выбирается из Y_a , чему соответствует количество информации $\log_2 N(Y_a)$. Разность $\log_2 N(Y) - \log_2 N(Y_a) = I(a : y)$ можно истолковать как количество информации, содержащейся в $x = a$ относительно y . Прежние соображения относительно возможности сокращения числа проб ценой усложнения правил выбора или (что, в сущности, равносильно) конструкции решающего устройства, по-видимому, остаются в силе.

Теория информации в дальнейшем сможет развиваться в двух направлениях: первое — разработка вероятностного подхода как традиционного математического описания метода проб и ошибок; второе — сравнение не числа элементарных операций, а сложности различных правил выбора или конструкций решающего устройства. Обратимся к вероятностным теориям, которые были разработаны еще до того, как А. Н. Колмогоров начал развивать второе направление, предложив алгоритмический подход к определению понятия «количество информации».

Вероятностная модель К. Шеннона

Получение информации можно рассматривать как процесс, при осуществлении которого наблюдатель узнает, какой именно из множества возможных исходов реализуется в результате эксперимента. Ситуация до начала эксперимента наблюдателю известна, а количество информации выступает как «мера удивления», т. е. невозможности предсказать результат опыта заранее. Этот подход отражает вероятностная модель К. Шеннона. «Известная ситуация» означает, что задано распределение вероятностей исходов опыта, и неопределенность (энтропия), устраняемая экспериментом, выражается, согласно К. Шеннону, функционалом

$$H = - \sum p \log p. \quad (1)$$

Величина H трактуется и как среднее количество информации, получаемое при наступлении одного из возможных событий; в таком случае с событием, имеющим вероятность p , связывается количество информации — $\log p$.

Таким образом, модель К. Шеннона есть множество событий A_i , на котором задано распределение вероятностей. Поскольку A_i образует полную систему, получение информации означает, что произошло одно и только одно из них. Поэтому для вероятностей имеем $\sum p_i = 1$. Множество A событий A_i может быть конечным (конечная схема по А. Я. Хинчину [2]) либо счетным; последнее имеет смысл рассматривать, если ряд в правой части (1) сходится.

Хорошо известны свойства функционала (1), которые можно толковать с точки зрения интуитивных представлений об информации.

1. $H(AB) = H(A) + H(B)$. Неопределенность двух независимых ситуаций равна сумме неопределенностей каждой из них.

2. Величина H не изменяется от добавления к схеме конечного числа невозможных событий.

3. Величина H неотрицательна; $H = 0$ тогда и только тогда, когда одно из чисел p_i равно единице, а остальные — нулю, т. е. результат опыта можно с полной достоверностью предсказать заранее; неопределенность исходной ситуации отсутствует.

4. Если события A и B взаимозависимы, то

$$H(AB) = H(A) + \sum p_i H_A(B),$$

где $H_A(B) = \sum p_i H(B)$ — математическое ожидание $H(B)$ в схеме A ; $H_i(B)$ — энтропия схемы B , вычисленная при условии, что произошло событие A_i . Неопределенность схемы B складывается из неопределенностей схем A и B ; последняя остается после того, как результат опыта A стал известен.

5. $H(B) < H(A)$. Неопределенность исхода опыта B может лишь уменьшиться, если результат опыта A стал известен (понятие дезинформации в данном случае не затрагивается, ибо введение его в математическую модель логически затруднено). Если схемы A и B независимы, то имеет место равенство; если опыт A полностью определяет результат опыта B , то $H_A(B) = 0$.

6. Если все события равновероятны, то энтропия $H = \log N$ максимальна и монотонно возрастает с увеличением числа возможных событий N .

Из свойства 4 следует, что количество информации, доставляемое опытом A относительно исхода опыта B , определяется равенством

$$I(A : B) = H(B) - H_A(B). \quad (2)$$

В отличие от комбинаторной модели «количество информации» в единичном исходе A_i относительно единичного исхода B_j

$$\log \frac{p\left(\frac{A_i}{B_j}\right)}{p(B_j)}$$

может быть как положительным, так и отрицательным, что уже не поддается разумной интерпретации. Этот парадокс, отмеченный А. Н. Колмогоровым [3], объясняется тем, что вероятностное определение энтропии применимо лишь к большим совокупностям пар (A_i, B_j) [4]. Поэтому подлинной мерой количества информации в модели К. Шеннона является лишь осредненная величина, вычисляемая по формуле (2) [3].

Вероятностная модель Р. Фишера¹

Информация, доставляемая опытом, может заключаться и в том, что наблюдатель по известному исходу эксперимента получает возможность составить суждение о предшествовавшей ситуации. Сущность этого подхода, ставящего задачу, обратную предыдущей, отражает модель Р. Фишера. Как и в модели К. Шеннона, под определенностью исходной ситуации понимается знание всех возможных исходов опыта и их вероятностей. Предполагается, что наблюдателю известны все возможные исходы, но не их вероятности, так как он знает только вид, но не параметры закона распределения. Оценивая параметры по результатам опыта, он может восстановить предшествующую ситуацию тем точнее, чем меньше дисперсия оценки. Поэтому в теории Р. Фишера количество информации определяется как величина, обратная минимальной возможной дисперсии оценки.

Обозначим α неизвестный параметр и α^* — его оценку. Тогда дисперсия оценки $D(\alpha^*) = M(\alpha^* - \alpha)^2$. Нижний предел $D(\alpha^*)$ устанавливается неравенством Рао — Крамера,

$$D(\alpha^*) g_{\alpha\alpha} \geq 1, \quad (3)$$

в котором величина $g_{\alpha\alpha}$ — информационное количество Фишера — зависит только от параметра α и вида функции распределения случайной величины x (в общем случае многомерной):

$$g_{\alpha\alpha} = \int f(x, \alpha) \left(\frac{\partial \ln f}{\partial \alpha} \right)^2 dx. \quad (4)$$

Оценки, для которых в (3) достигается равенство, называются эффективными. Величина $g_{\alpha\alpha}$ обладает важными свойствами, которые подтверждают целесообразность выбора ее как меры точности статистического эксперимента и разумно интерпретируются с точки зрения интуитивного представления, согласно которому объективная информация есть нечто, получаемое только из эксперимента, и в лучшем случае может лишь сохраняться при обработке его результатов.

1. Величина $g_{\alpha\alpha}$ инвариантна по отношению к произвольному однозначному преобразованию наблюдаемой $x = (x_1, \dots, x_n)$. Пусть

$$\begin{aligned} x_i &= x_i(y_1, \dots, y_n) \\ y_i &= y_i(x_1, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (5)$$

Из определения плотности вероятности

$$f_1(x, \alpha) dx_1 \dots dx_n = f_2(y, \alpha) dy_1 \dots dy_n = d\rho$$

следует, что

$$f_1(x, \alpha) = f_2(y, \alpha) J,$$

где J — якобиан преобразования, не зависящий от параметра α , так как α не входит в уравнения преобразования (5). Поэтому

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \ln f_1 = \frac{\partial}{\partial \alpha} \ln f_2$$

и, стало быть,

$$\int f_1(x, \alpha) \left(\frac{\partial \ln f_1}{\partial \alpha} \right)^2 dx = \int f_2(y, \alpha) \left(\frac{\partial \ln f_1}{\partial \alpha} \right)^2 dy,$$

что и требовалось доказать.

¹ При изложении этого раздела автор руководствовался лекциями В. П. Козлова.

2. Величина g_{xx} аддитивна при совместном использовании независимых методов измерения.

Положим, что одну и ту же величину α можно оценивать по результатам измерения двух статистически независимых случайных величин x и y , а соответствующими плотностями распределения вероятностей пусть будут $f_1(x, \alpha)$ и $f_2(y, \alpha)$. Тогда совместная плотность распределения при одновременной регистрации значений обеих величин представится в виде

$$f(x, y, \alpha) = f_1(x, \alpha) f_2(y, \alpha)$$

и

$$\left(\frac{\partial \ln f}{\partial \alpha}\right)^2 = \left(\frac{\partial \ln f_1}{\partial \alpha}\right)^2 + 2 \frac{\partial \ln f_1}{\partial \alpha} \cdot \frac{\partial \ln f_2}{\partial \alpha} + \left(\frac{\partial \ln f_2}{\partial \alpha}\right)^2.$$

Подставив эти выражения в формулу для g_{xx} , получим

$$g_{xx} = \int f_1(x, \alpha) \left(\frac{\partial \ln f_1}{\partial \alpha}\right)^2 dx \int f_2(y, \alpha) dy + \int f_1(x, \alpha) dx \int f_2(y, \alpha) \times \\ \times \left(\frac{\partial \ln f_2}{\partial \alpha}\right)^2 dy + 2 \int f_1(x, \alpha) \int \frac{\partial \ln f_1}{\partial \alpha} dx \int f_2(y, \alpha) \frac{\partial \ln f_2}{\partial \alpha} dy.$$

Замечая, что

$$\int f_1(x, \alpha) dx = \int f_2(y, \alpha) dy = 1,$$

а второй член равен нулю, поскольку, например,

$$\int f_1(x, \alpha) \frac{\partial \ln f_1}{\partial \alpha} dx = \int \frac{\partial}{\partial \alpha} f_1(x, \alpha) dx = \frac{\partial}{\partial \alpha} \int f_1(x, \alpha) dx = 0,$$

имеем

$$g_{xx} = g_{xx}^1 + g_{xx}^2.$$

В очевидном обобщении для m независимых методов

$$g_{xx} = \sum_{k=1}^m g_{xx}^k$$

особого внимания заслуживает частный случай: m -кратное повторение измерения при независимости последовательных результатов; тогда

$$g_{xx} = m g_{xx}^{(1)}.$$

3. Величина g_{xx} не убывает, если присоединять дополнительную наблюдаемую. Выше было доказано более точное утверждение для случая, когда величины x и y независимы. Если y зависит от x , то совместная плотность

$$f(x, y, \alpha) = f_1(x, \alpha) f_2\left(\frac{y}{x}, \alpha\right)$$

и, аналогично предыдущему,

$$g_{xx} = \int f_1(x, \alpha) \left(\frac{\partial \ln f_1}{\partial \alpha}\right)^2 dx + \int f_2\left(\frac{y}{x}, \alpha\right) \left(\frac{\partial \ln f_2}{\partial \alpha}\right)^2 dy,$$

т. е. $g_{xx}^{xy} > g_{xx}^x$, поскольку второй интеграл неотрицателен.

4. Величина g_{xx} не возрастает, если заменить наблюдаемую статистически зависящей от нее случайной величиной y . Пусть зависимость y от x выражается плотностью вероятности $f_2\left(\frac{y}{x}\right)$. Тогда совместная плотность

$$f(x, y, \alpha) = f_1(x, \alpha) f_2\left(\frac{y}{x}\right)$$

и, так как $f_2\left(\frac{y}{x}\right)$ не зависит от x ,

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \ln f(x, y, \alpha) = \frac{\partial}{\partial \alpha} \ln f_1(x, \alpha).$$

Информационное количество Фишера

$$g_{\alpha\alpha}^{(xy)} = \int f_2\left(\frac{y}{x}\right) dy \int f_1(x, \alpha) \left(\frac{\partial \ln f_1}{\partial \alpha}\right)^2 dx = g_{\alpha\alpha}^{(x)}.$$

С другой стороны, согласно вышеуказанному,

$$g_{\alpha\alpha}^{(y)} \leq g_{\alpha\alpha}^{(xy)} = g_{\alpha\alpha}^{(x)}.$$

Доказанное свойство рассматривается в качестве обобщения свойства [1], поскольку функциональную зависимость можно истолковать как частный случай статистической зависимости. Однако свойство [1] содержит более точное утверждение.

Обобщение для случая, когда распределение вероятностей обусловлено системой параметров $(\alpha_1, \dots, \alpha_m)$, достигается введением римановой информационной метрики

$$d\rho^2 = \sum_{i,k=1}^m g_{ik} d\alpha_i d\alpha_k, \quad (6)$$

где

$$g_{ik} = \int f(x, \alpha) \frac{\partial \ln f}{\partial \alpha_i} \cdot \frac{\partial \ln f}{\partial \alpha_k} dx. \quad (7)$$

Величина $d\rho$ характеризует различие исходных ситуаций, определяемых системами параметров $(\alpha_1, \dots, \alpha_m)$ и $(\alpha_1 + d\alpha_1, \dots, \alpha_m + d\alpha_m)$. Для ситуаций $s_1(\alpha_1^1, \dots, \alpha_m^1)$ и $s_2(\alpha_1^2, \dots, \alpha_m^2)$ имеем

$$\rho = \int_{s_1}^{s_2} \sqrt{\sum_{i,k=1}^m g_{ik} d\alpha_i d\alpha_k}. \quad (8)$$

Из полученного Г. Крамером обобщения неравенства Рао — Крамера для многомерного случая следует, что вся сфера $\rho = 1$ лежит внутри корреляционного эллипсоида любой системы оценок параметров.

Введение метрики (6) оправдано тем, что величина $d\rho^2$ не изменяется при переходе от системы параметров $(\alpha_1, \dots, \alpha_m)$ к системе $\beta_1, \dots, \beta_m$, она неотрицательна и обладает всеми рассмотренными ранее свойствами величины $g_{\alpha\alpha}$. Инвариантность $d\rho^2$ можно доказать непосредственно. Обозначим результат подстановки выражений α через β

$$f(x, \alpha_1, \dots, \alpha_m) = F(x, \beta_1, \dots, \beta_m).$$

составим

$$G_{lr} = \int F \frac{\partial \ln F}{\partial \beta_l} \cdot \frac{\partial \ln F}{\partial \beta_r} dx$$

и

$$d\rho = \sum_{l,r=1}^m G_{lr} d\beta_l d\beta_r.$$

Так как

$$\frac{\partial \ln F}{\partial \beta_l} = \sum_{i=1}^m \frac{\partial \ln f}{\partial \alpha_i} \cdot \frac{\partial \alpha_i}{\partial \beta_l},$$

то

$$G_{lr} = \sum_{i,k=1}^m g_{ik} \frac{\partial \alpha_i}{\partial \beta_l} \cdot \frac{\partial \alpha_k}{\partial \beta_r}.$$

Подставив это выражение и переменив порядок суммирования, получим

$$d\rho^2 = \sum_{i,k=1}^m g_{ik} \sum_{j,r=1}^m \frac{\partial a_i}{\partial \beta_j} \cdot \frac{\partial a_k}{\partial \beta_r} d\beta_j d\beta_r.$$

Но

$$\sum_{j,r=1}^m \frac{\partial a_i}{\partial \beta_j} \cdot \frac{\partial a_k}{\partial \beta_r} d\beta_j d\beta_r = da_i da_k,$$

откуда и следует, что $d\rho_i^2 = d\rho^2$. Инвариантность $d\rho^2$ по отношению к произвольному однозначному преобразованию наблюдаемых (5) и аддитивность при совместном использовании независимых методов измерения вытекают из того, что все коэффициенты g_{ik} в первом случае не изменяются, а во втором — суммируются. Для доказательства остальных свойств (неотрицательности, неубывания при присоединении дополнительной наблюдаемой, невозрастания при замене наблюдаемой величиной, зависящей от нее статистически), выражаемых неравенствами, соотношение (6) удобно представить в виде

$$d\rho^2 = \int \ln \frac{f(x, s_2)}{f(x, s_1)} [f(x, s_2) - f(x, s_1)] dx, \quad (9)$$

где

$$x = \{x_1, \dots, x_n\};$$

$$s_1 = s(a_1, \dots, a_m);$$

$$s_2 = s(a_1 + da_1, \dots, a_m + da_m)$$

и имеется в виду равенство с точностью до малых третьего порядка. Неотрицательность (9) следует из очевидного неравенства

$$(\ln a - \ln b)(a - b) > 0,$$

которое обеспечивает неотрицательность подынтегральной функции. Подставив в (9)

$$f(x, y, s) = f(x, y) f\left(\frac{y}{x}, s\right),$$

получим

$$d\rho^2 = \iint \ln \frac{f_2(x)}{f_1(x)} [f_2(x, y) - f_1(x, y)] dx dy + \iint \ln \frac{f_2\left(\frac{y}{x}\right)}{f_1\left(\frac{y}{x}\right)} \left[f_2\left(\frac{y}{x}\right) - f_1\left(\frac{y}{x}\right) \right] dx dy$$

(для упрощения записи мы опустили параметры s и снабдили соответствующими индексами функцию f). Так как $\int f(x, y) dy = f(x)$, то первое слагаемое есть просто $d\rho_x^2$. Второе же можно представить в виде

$$\begin{aligned} \iint \ln \frac{f_2\left(\frac{y}{x}\right)}{f_1\left(\frac{y}{x}\right)} [f_2(x, y) - f_1(x, y)] dx dy = & - \left[\iint \ln \frac{f_1\left(\frac{y}{x}\right)}{f_2\left(\frac{y}{x}\right)} f_2(x) f_2\left(\frac{y}{x}\right) dx dy + \right. \\ & \left. + \iint \ln \frac{f_2\left(\frac{y}{x}\right)}{f_1\left(\frac{y}{x}\right)} f_1(x) f_1\left(\frac{y}{x}\right) dx dy \right] \end{aligned}$$

и показать, что оно неотрицательно. Действительно, из неравенства $\ln a \leq a - 1$ следует, что, например,

$$\begin{aligned} \iint \ln \frac{f_1\left(\frac{y}{x}\right)}{f_2\left(\frac{y}{x}\right)} f_1(x) f_2\left(\frac{y}{x}\right) dx dy &< \iint \left[\frac{f_1\left(\frac{y}{x}\right)}{f_2\left(\frac{y}{x}\right)} - 1 \right] f_1(x) f_2\left(\frac{y}{x}\right) dx dy = \\ &= \iint \left[f_1\left(\frac{y}{x}\right) - f_2\left(\frac{y}{x}\right) \right] dx dy = 0, \end{aligned}$$

так как

$$\int f_1\left(\frac{y}{x}\right) dy = \int f_2\left(\frac{y}{x}\right) dy = 1.$$

Следовательно,

$$- \left[\iint \ln \frac{f_1\left(\frac{y}{x}\right)}{f_2\left(\frac{y}{x}\right)} f_2(x) f_2\left(\frac{y}{x}\right) dx dy + \iint \ln \frac{f_2\left(\frac{y}{x}\right)}{f_1\left(\frac{y}{x}\right)} f_1(x) f_1\left(\frac{y}{x}\right) dx dy \right] > 0$$

и

$$dp_{(xy)}^2 > dp_{(x)}^2. \quad (10)$$

Рассмотрим в заключение замену наблюдаемой x статистически зависящей от нее величиной y . С одной стороны, на основании предыдущего результата $dp_{(y)}^2 \leq dp_{(y,x)}^2$; с другой — формально образованная наблюдаемая (yx) не несет никакой добавочной информации по сравнению с x . Математически это выражается (как и в случае одного параметра) тем, что в формуле для совместной плотности $f(x, y) = f_1(x) f_2\left(\frac{y}{x}\right)$ функция $f_2\left(\frac{y}{x}\right)$ не зависит от параметров α_i . Поэтому, повторив выкладки, проведенные выше (при доказательстве свойства (4) величины $g_{\alpha\alpha}$), получим

$$g_{ik}^{(yx)} = g_{ik}^{(x)},$$

откуда следует

$$dp_{(yx)}^2 = dp_{(x)}^2$$

и, стало быть,

$$dp_{(y)}^2 \leq dp_{(x)}^2. \quad (11)$$

В. П. Козлов показал [5], что величина ρ , вычисленная по формуле (8), позволяет выразить ограничения, возникающие при различных способах интерпретации статистического эксперимента, и в этом смысле является универсальной характеристикой различимости состояний s_1 и s_2 .

Семантическая теория Ю. А. Шрейдера

Благодаря получению информации изменяются представления наблюдателя о внешнем мире: он устанавливает новые, не известные ему ранее свойства объектов, связи между объектами и явлениями, расширяет круг понятий, которыми можно оперировать. Ю. А. Шрейдер предложил математическую модель представления о внешнем мире — тезаурус [6].

Тезаурус включает множества:

свойств $\Pi = \{a, b, c, \dots\}$

объектов $M = \{x, y, z, \dots\}$

событий $C = \{\alpha, \beta, \dots\}$

На множестве Π заданы отношения следования и применимости. «Из a следует b » означает: «если объект обладает свойством a , то он обладает и свойством b ». Применимость a к b означает: «все объекты, обладающие свойством b , обладают и свойством a ». Поэтому

- 1) из a следует a ;
- 2) если b следует из a и c из b , то c следует из a ;
- 3) если из a следует b , то b применимо к a ;
- 4) если a применимо к b и b к c , то a применимо к c ;
- 5) если b следует из a и c применимо к b , то c применимо к a .

С каждым объектом x всегда связано свойство $x^* \in \Pi$ «совпадает с объектом x », а с каждым событием a — свойство $a \in \Pi$ «участвует в событии a ». Из некоторых пар элементов Π и M можно образовывать атомарные высказывания типа «объект x обладает (не обладает) свойством a » — ax ($\neg ax$). Высказывания, образованные из атомарных, содержащих объекты $x_1, \dots, x_l$, обозначаются символом $A(x_1, \dots, x_l)$. Далее Ю. А. Шрейдер вводит кванторы. Обозначения кванторов и выражения, которые вводятся с их помощью, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Обозначение квантора	Выражение	Смысл выражения
$\mathbf{d}$	$\mathbf{d}x (ax)$	Возник x , обладающий свойством a
$\mathbf{i}$	$\mathbf{i}(ix) bx$	Тот x , который обладает свойством b , обладает и свойством a
$\mathbf{e}$	$\mathbf{e}(ex) bx$	Те x , обладающие свойством b , которые входят в M , обладают также и свойством a
$\mathbf{g}$	$\mathbf{g}(gx) bx$	Все те x , обладающие свойством b , которые входят или могут в дальнейшем входить в M , обладают также и свойством a

В табл. 2, заимствованной из работ Ю. А. Шрейдера [6], приведены кванторные выражения с двуместными предикатами (выражения с многоместными предикатами строятся аналогично). Пользуясь данными табл. 2, автор дает рекурсивное определение события. Последним является:

- 1) любое выражение таблицы, в котором участвуют кванторы $\mathbf{d}$, $\mathbf{i}$, $\mathbf{e}$, $\mathbf{g}$;
- 2) логическая связка событий с помощью символов $\vee$, $\wedge$ и $\neg$;
- 3) любое выражение, типа приведенных в табл. 2 с кванторами $\mathbf{d}$, $\mathbf{i}$, $\mathbf{e}$, $\mathbf{g}$, в котором некоторые или все объекты заменены событиями

Таблица 2

Квантор	Тип высказывания
$\mathbf{d}$	$(dx_1) (dx_2) A(x_1, x_2)$
$\mathbf{i}$	$B((ix_1) A_1(x_1), (ix_2) A_2(x_2))$ $B((ix_1) (ix_2) A(x_1, x_2))$
$\mathbf{e}$	$B((ex_1) A_1(x_1), (ex_2) A_2(x_2))$ $B((ex_1) (ex_2) A(x_1, x_2))$
$\mathbf{g}$	$B((gx_1) A_1(x_1), gx_2) A_2(x_2))$ $B((gx_1) (gx_2) A(x_1, x_2))$
$\mathbf{e}, \mathbf{i}$	$B((ix_1) A_1(x_1), (ex_2) A_2(x_2))$ $B((ix_1) (ex_2) A(x_1, x_2))$

Множества Π , M и C с заданными в Π отношениями следования и применимости, а также с указанными допустимыми атомарными высказываниями и составляют тезаурус в узком смысле. Тезаурус в широком смысле получается добавлением правил, позволяющих сопоставить текстам T некоторого класса набор элементарных операторов и указать правила их применения. Оператор A_T , преобразующий тезаурус, получается как произведение элементарных операторов в нужном порядке. Определения элементарных операторов сведены в табл. 3.

Таблица 3

Кванторы, входящие в выражение	Элементарный оператор (преобразование тезауруса)
ϵ	В C добавляется событие a (если его не было ранее) В Π добавляется предикат a^* и устанавливается отношение применимости между предикатами из Π и внешним предикатом, участвующим в записи a
d	В C добавляется a В M добавляются объекты x_i , входящие в область действия квантора d
$\forall$	В Π добавляются предикаты x_i^* , устанавливаются новые отношения следования ($\supset$) в Π (например, выражение $a(gx) \forall x$ требует установления отношения $b \supset a$, если оно не существовало ранее)

Очевидно, анализ текста с помощью тезауруса может закончиться тремя:

1) текст T не удается расчленить на канонические выражения (типа табл. 2), с которыми сопоставлены элементарные операторы, и оператор A_T построить невозможно;

2) текст удается расчленить, но оператор A_T не изменяет тезауруса;

3) текст расчленить удается, и оператор A_T изменяет тезаурус, т. е. пополняет множества Π , M , C и вводит в Π новые отношения следования и применимости.

В первом случае текст непонятен, во втором — не содержит новой информации. В обоих случаях количество информации равно нулю. В третьем же количество информации тем больше, чем сильнее изменяется тезаурус.

Алгоритмический подход А. Н. Колмогорова

Получение информации можно понимать и как возможность составить суждение об изучаемом неизвестном (объекте или явлении) на основе ставшего известным объекта или явления (результата опыта).

Суждение получается применением к исходным данным (результатам опыта) некоторого алгоритма, который в общем случае либо приводит, либо не приводит к построению y по ставшему известным x . Этот подход отражает модель А. Н. Колмогорова.

Положим, на некотором счетном множестве X задана система частных функций $(f_1, f_2, \dots)$. Областью значений функций является то же множество x . Поскольку функции частичные, то возможны случаи, когда элементу $x \in X$ невозможно сопоставить $f_i(x) \in X$. Будем различать два случая:

1) возможно построить хотя бы одну такую последовательность функций $f_1(x); f_2(f_1(x)); \dots; f_m(f_1(\dots f_1(x)) \dots) = y$, что, отправляясь от элемента x , через конечное число шагов придем к элементу y ;

2) такую последовательность построить невозможно.

В первом случае существует программа получения y из x , которую можно записать в виде последовательности из нулей и единиц, во втором случае такой программы не существует. Различным последовательностям функций, приводящим от x к y , соответствуют различные программы. Таким образом, оказывается возможным построить частичную функцию $\varphi(Px) = y$, ставящую в соответствие программе P и объекту x объект y . Функция φ является частично рекурсивной*. А. Н. Колмогоров принял в качестве меры сложности y относительно x (энтропии $H(y(x))$) минимальную длину $l(P)$ программы P , позволяющей строить y по известному x . Неопределенность, связанную с возможностью по-разному определять функцию φ , в значительной мере устраняет теорема А. Н. Колмогорова, устанавливающая существование такой частично рекурсивной функции $A(Px)$, что для любой другой частично рекурсивной функции $\varphi(P, x)$ выполнено неравенство $l(P)_{A(Px)=y} < l(P)_{\varphi(Px)=y} + C_{\varphi}$, в котором постоянная C_{φ} зависит от φ , но не от x и y . Теория А. Н. Колмогорова, по-видимому, в принципе позволяет охватить все подходы, рассмотренные выше. Важным достоинством алгоритмического подхода является также придание смысла понятиям энтропии и информации применительно к индивидуальным объектам x и y .

Теории информации и зрение

Обратимся к сопоставлению рассмотренных математических моделей с известными данными о работе зрения.

Как вытекает из повседневного опыта, при рассматривании имеет место узнавание знакомых предметов по отдельным признакам и пополнение алфавита — запоминание признаков, установление связей между ними. Качественно эти аспекты работы зрения описывают модели Ю. А. Шрейдера и А. Н. Колмогорова. Количественное сопоставление их с опытом пока невозможно. Семантическая модель не учитывает информации, связанной с опознаванием знакомых объектов. В ней отсутствует количественное определение степени изменения тезауруса и не видно возможностей введения его без явного произвола. В алгоритмической модели количество информации определено лишь с точностью до произвольной постоянной. Кроме того, проблема построения конкретной универсальной частичнорекурсивной функции и программ, по которым происходит опознавание, еще далека от практического разрешения. Обе модели не учитывают принципиально неустранимой возможности ошибок, поскольку в зрительном анализаторе, как и во всякой реальной системе, неизбежно имеются помехи. Последнее соображение доказывает необходимость привлечения вероятностных моделей.

В исследованиях зрения с позиций теории информации до сих пор применялась только модель К. Шеннона. Это отразилось в первую очередь на форме подачи экспериментального материала, в данном случае не являющейся существенной. Отметим следующие факты:

1) время опознавания сложного изображения из набора, на который наблюдатель был предварительно натренирован, составляет $t = \frac{1}{c} \log_2 N$, где $N = (4 + 16)$ — число тестов в наборе [8];

2) время опознавания простых изображений (разноориентированных отрезков прямых) почти не зависит от объема набора [8];

* Рекурсивией называется способ задания функции, при котором значения определяемой функции для произвольных значений аргументов определяются известным образом через значения функции для меньших значений аргументов [7].

3) при неравновероятном предъявлении изображений из данного набора время опознания тем больше, чем больше величина энтропии, рассчитанная по формуле К. Шеннона [9];

4) время опознания букв у нетренированного наблюдателя линейно зависит от логарифма числа букв в наборе, у тренированного же не зависит от объема набора [10].

В. Д. Глезер [8] предполагает, что сложные признаки в ходе опознания образа разворачиваются последовательно. Иными словами, опознание сложного изображения осуществляется как выбор из хранящегося в памяти словаря зрительных образов. Опознание же простого изображения происходит по генетически заданной программе и потому определяется не объемом набора, а лишь временем формирования сигнала.

Эти предельные случаи описывают комбинаторная (или шенноновская) и алгоритмическая модели построения зрительного образа*. Следует подчеркнуть, что в работе зрения оба вида процессов взаимосвязаны. Опознанию по методу выбора неизбежно предшествует составление словаря зрительных образов — процесс, который можно описать в рамках алгоритмической и семантической моделей. При тренировке на ограниченном алфавите возможны и обратные переходы от выбора из словаря к построению зрительного образа. Пример такого перехода дают результаты исследований, проведенные И. В. Туркиной [10], из которых очевидна и его биологическая целесообразность; время опознания минимизируется. Ситуация здесь аналогична имеющей место при работе на ЭВМ, когда выгоднее всякий раз вычислять функцию заново, чем занимать ячейки памяти таблицей ее значений. Естественно полагать, что существуют и промежуточные ситуации, когда опознание происходит путем комбинирования выбора и построения зрительного образа.

Возможно, зрительный анализатор реализует некоторый компромисс между требованиями минимизации времени опознания и загрузки памяти.

Указания на реализацию в зрительной системе вероятностных моделей находим в фундаментальных эмпирических законах биофизики зрения, описывающих обнаружение: законе Вебера—Фехнера и законе Блонделя—Реза. В рамках теории К. Шеннона удалось показать, что они выражают принципы оптимального приема информации, и рассчитать кривые порогового контраста для красного и белого светов в достаточно хорошем согласии с экспериментальными данными [11]. Однако для сине-зеленой видимой части спектра рассчитанный пороговый контраст расходится с найденным из эксперимента. Объяснение расхождения, предложенное в [11], содержит неизбежные дополнительные допущения, которые, естественно, требуют дальнейшего обоснования.

При активном участии В. П. Козлова нами были проведены предварительные расчеты порогового контраста по теории Р. Фишера. Как и в [11], отправной точкой служил принцип постоянства информационного порога. Оказалось, что теоретическая кривая хорошо согласуется с экспериментом для сине-зеленого света, но плохо — для красного и белого.

В обоих случаях фигурировал лишь один неопределенный параметр в теоретических формулах, поэтому согласие эксперимента и расчета трудно рассматривать как случайное. Принципиальную ограничен-

* Во втором случае мы имеем в виду такой процесс формирования зрительного образа, при котором роль выбора пренебрежимо мала.

ность вероятностных моделей показал А. Н. Колмогоров [3]. Перефразируя его аргументацию, можно сказать, что при вероятностном подходе не имеет смысла говорить о количестве информации (например, в картине «Утро стрелецкой казни»). Невозможно разумным образом включить ее в совокупность «возможных картин», на которой требуется еще задать распределение вероятностей. Столь же несостоятельно рассматривать отдельные участки картины как случайную последовательность с достаточно быстро затухающими «стохастическими связями».

Итак, модели теории информации, кратко рассмотренные в предыдущем изложении, описывают отдельные особенности работы зрительного анализатора и в этом смысле дополняют друг друга. Следует признать актуальной разработку «синтетической» теории, описывающей все эти особенности с единой точки зрения.

Основная гипотеза, ее проверка и следствия

Располагая математической моделью опознания, для каждой зрительной задачи можно было бы указать число (количество информации), объективно характеризующее ее сложность. К настоящему времени такая теория еще не создана. Однако основную гипотезу о существовании количества зрительной информации можно подтвердить (или опровергнуть) экспериментальной проверкой ее следствий. Опыт позволяет непосредственно измерить время решения зрительной задачи. Оно определяется количеством и скоростью переработки информации и, как показывает опыт, является случайной величиной, которая варьирует, вообще говоря, в довольно широких пределах. Многократно предъявляя наблюдателю одну и ту же задачу, можно выявить закон распределения и построить для данного наблюдателя кривую вероятность — время, связывающую время решения задачи с плотностью вероятности. Изменение скорости переработки информации равносильно преобразованию масштаба кривой по оси времени. Следовательно, несходство кривых, имеющих одинаковый масштаб по оси времени, обусловлено только различием количества переработанной информации. Если построенные в одном масштабе кривые, полученные в опытах с различными наблюдателями, не отличаются слишком сильно одна от другой, то можно говорить о существовании «истинной» кривой вероятность — время (и, следовательно, количества информации в зрительной задаче) применительно к «среднему» наблюдателю, понимая это совершенно так же, как существование, скажем, кривой относительной видности.

Такой подход к обоснованию основной гипотезы был, по-видимому, впервые намечен и осуществлен в 1969 году [11]. Экспериментальный материал, обработанный в [11], получен в опытах, выполненных задолго до того, как была сформулирована основная гипотеза и поставлен вопрос о ее проверке. Тем более показательно, что построенные в одном масштабе для четырех наблюдателей, с которыми проводились опыты, кривые вероятность — время мало отличаются друг от друга.

Полученный обнадеживающий результат делает актуальной задачу проверки основной гипотезы на возможно более обширном и разнообразном экспериментальном материале. Если результат проверки будет отрицательным, то мы окажемся перед альтернативой: либо отказаться от основной гипотезы, либо ввести дополнительные допущения о варьировании закона распределения времени решения зрительной задачи у различных наблюдателей. Первое решение означает отказ от всякого применения теории информации к зрению. Второе выдвинет новые проблемы обоснования и проверки принятых допущений.

Как бы то ни было, намеченный путь, по-видимому, открывает возможность раздельного решения двух достаточно сложных проблем — обоснования гипотезы о существовании объективной числовой характеристики сложности зрительной задачи и определения понятия «количество информации».

В заключение автор выражает признательность В. П. Козлову, А. В. Луизову и Р. А. Сапожникову за обсуждение работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Шеннон. Математическая теория связи. Сб. «Работы по теории информации и кибернетике». Изд-во иностр. лит., 1963.
2. А. Я. Хинчин. Понятие энтропии в теории вероятностей. УМН, 8, 3 (1953).
3. А. Н. Колмогоров. Три подхода к определению понятия «количество информации». Сб. «Проблемы передачи информации», 1, вып. 1, 1965.
4. А. Н. Колмогоров. К логическим основам теории информации и теории вероятностей. Сб. «Проблемы передачи информации», 5, вып. 3, 1969.
5. В. П. Козлов. Информационная метрика и ее применение для оценки предельных возможностей спектрофотометрических измерений. Автореф. канд. дисс., Л., 1967.
6. Ю. А. Шрейдер. Об одной модели семантической теории информации. «Проблемы кибернетики», 1965, № 13.
7. А. Н. Мальцев. Алгоритмы и рекурсивные функции. Изд-во «Наука», 1965.
8. В. Д. Глезер. Механизмы опознания зрительных образов. Изд-во «Наука», 1966.
9. А. Васильев. Временные характеристики опознания неодинаково часто предъявляемых изображений. «Проблемы физиологической оптики», т. 14. Механизмы опознания зрительных образов, 1967.
10. Н. В. Туркина. Исследование опознания букв зрительной системы. Там же.
11. В. К. Каган, Т. Я. Штейншайдер. Принципы оптимального приема информации в зрительной системе человека. Сб. «Проблемы бионики», вып. 2. Изд-во Харьковск. ун-та, 1969.

К ВОПРОСУ О МОДЕЛЯХ ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ

Я. Я. Белик

При движении летательного аппарата относительно поверхности Земли большое значение имеет зрительное восприятие удаленности до нее и изменения этой удаленности.

Восприятие последней осуществляется функциональными системами, формирующимися прижизненно [1]. Изучение функциональных систем может быть осуществлено методом математического моделирования.

В данном сообщении рассматриваются математические модели оценки удаленности и ее изменения для случая вертикального движения, основанные на видимой величине ориентира, аккомодации и конвергенции, монокулярном и бинокулярном параллаксах.

Необходимо отметить, что существуют две зоны расстояний, где видимая величина ориентира либо меняется, либо остается постоянной.

Видимая величина ориентира мало меняется для расстояний, на которых имеет место константность восприятия. Функциональная система константности восприятия величины ориентира обусловлена тем, что восприятие величины ориентира определяется не только величиной сетчаточного образа, но и механизмами аккомодации и конвергенции, которые вносят коррекцию в восприятие величины ориентиров*.

* Механизмы аккомодации и конвергенции уже сами по себе представляют прижизненно формирующиеся функциональные системы и являются неосознаваемыми.

887-00

Поскольку константность восприятия определяется как механизмом конвергенции, так и аккомодации, то ее собственное моделирование сводится к моделированию каждого из указанных механизмов в отдельности.

Для аккомодации находится соответствие между удаленностью оператора до фиксируемого ориентира и кривизной преломляющих поверхностей глаза.

Для конвергенции определяется зависимость между удаленностью и углом конвергенции, а для сетчатого образа — соответствие между его величиной и кривизной преломляющих поверхностей (неявная зависимость величины сетчаточного образа от удаленности).

Поскольку константность восприятия величины ориентира обусловлена сигналами от конвергирующих аккомодационных мышц и раздражаемой области сетчатки, которые зависят соответственно от угла конвергенции, кривизны преломляющих поверхностей глаза, а величина раздражаемой области сетчатки — от удаленности и величины ориентира, то для моделирования константности восприятия необходимо рассмотреть зависимость кривизны преломляющих поверхностей глаза, угла конвергенции и величины сетчаточного образа от удаленности.

Определение удаленностей, не превышающих 15—20 м, возможно по неосознаваемому признаку — углу конвергенции.

Нами предлагается следующая математическая модель функциональной системы, работающей на основе конвергенции:

$$h = \frac{d \cos(\alpha \pm \beta) \cos \beta \sin \gamma}{\sin \alpha}, \quad (1)$$

где α — видимый угол конвергенции;

β — видимый угол между одной из зрительных осей и перпендикуляром к межглазной оси, проведенным через фиксируемую точку;

d — расстояние между зрачками глаз оператора;

h — удаленность до плоскости;

γ — угол визирования.

Знак «минус» в модели (1) относится к случаю фиксирования ориентира, находящегося внутри пространства, которое ограничено двумя плоскостями, перпендикулярными межглазной оси и проведенными через зрачки глаз; знак «плюс» относится к случаю расположения ориентира вне указанного пространства.

Строгая модель (1) во всех реальных условиях взлета и посадки летательного аппарата вследствие малости углов α и β может быть заменена приближенной, но достаточно точной:

$$h = \frac{d \sin \gamma}{\alpha}. \quad (2)$$

Сущность этой модели заключается в том, что с удалением оператора от поверхности видимый угол конвергенции уменьшается.

Оценка удаленности оператора от поверхности осуществляется также механизмом аккомодации. Последняя характеризует свойство отдельных преломляющих поверхностей глаза изменять свою кривизну в зависимости от удаленности фиксируемого ориентира.

Математическая модель оценки удаленности по аккомодации может быть представлена в виде

$$h = \frac{r_1 r_2 r_1^2 r_2^2 [5.1 r_1 r_2 r_1^2 r_2^2 + 2.6 r_1 r_2 (r_2^2 - r_1^2) + 6.45 r_1^2 r_2^2 (r_2 - r_1)]}{[2.8 r_1^2 r_2^2 (r_2 - r_1) + 1.13 r_1 r_2 (r_2^2 - r_1^2) - 0.97 r_1 r_2 r_1^2 r_2^2]} \times$$

$$\times \frac{10 \sin \gamma}{1,265 r_1^2 r_2^2 (r_2 - r_1) + 0,51 r_1 r_2 (r_2^2 - r_1^2) + r_1 r_2^2 r_1^2} \quad (3)$$

где r_1 и r_2 — соответственно радиусы кривизны передней и задней поверхностей хрусталика, мм;

r_1^2 и r_2^2 — соответственно радиусы кривизны передней и задней поверхностей ядра хрусталика, мм;

h и γ — имеют тот же смысл, что и в предыдущих моделях.

В этом выражении представлены все объективные величины, а само уравнение представляет механико-математическую модель аккомодации.

Согласно этой модели, предельно близкое значение удаленности, на которой фиксируемый ориентир еще виден отчетливо, равно 7 см. С другой стороны, уже при фиксировании ориентира в диапазоне $6 < h < \infty$ (h — в метрах) изменения в кривизне преломляющих поверхностей настолько малы, что они не могут служить неосознаваемым критерием удаленности.

Полученные теоретические расчеты являются подтверждением опытных данных, согласно которым аккомодация для расстояний больше 6 м не имеет места; те же выводы правомерны относительно нижней границы аккомодации.

Нами был найден эквивалент глаза в виде толстой линзы и на основании ее параметров определена зависимость величины сетчаточного изображения от радиусов кривизны преломляющих поверхностей хрусталика и его ядра [2]:

$$R' = \frac{23 R r_1 r_2 r_1^2 r_2^2}{h [1,265 r_1^2 r_2^2 (r_2 - r_1) + 0,51 r_1 r_2 (r_2^2 - r_1^2) + r_1 r_2^2 r_1^2] - 23 r_1 r_2^2 r_1^2} \quad (4)$$

где R' — величина изображения ориентира на сетчатке, мм;

R — реальная величина ориентира, мм;

r_1 и r_2 — соответственно радиусы кривизны передней поверхности и ядра хрусталика, мм;

r_2^2 — радиус кривизны поверхности ядра хрусталика, мм.

Для расстояния свыше 15—20 м видимая величина ориентира меняется обратно пропорционально удаленности.

Рассмотрим модель функциональной системы оценки удаленности по видимой величине ориентира.

При наличии в поле зрения оператора континуума однородных ориентиров (при условии, что $S \ll \frac{h^2}{\sin^2 \gamma}$) функциональная система, с помощью которой осуществляется оценка удаленности, может быть описана следующей математической моделью:

$$\Omega = \frac{S \sin^2 \gamma}{h^2} \quad (5)$$

где Ω — видимый телесный угол;

S — площадь ориентира;

γ — угол визирования;

h — удаленность до поверхности.

При постоянном угле визирования (удобнее всего смотреть под $\gamma = 90^\circ$) удаленность обратно пропорциональна корню квадратному из видимой величины, определяемой телесным углом.

При движении летательного аппарата большое значение имеет не только знание абсолютной удаленности, но и относительного изменения удаленности. Оценка этого изменения основывается на восприятии относительного изменения величины рассматриваемого признака.

Математическая модель функциональной системы восприятия относительного изменения удаленности способом прослеживания по относительному изменению видимой величины ориентира представляет собой бесконечно убывающий ряд возрастающих степеней относительного изменения удаленности.

Ограничение этого ряда первыми тремя членами не вносит ошибки в величину относительного изменения видимой величины ориентира, большей 1%, поэтому модель указанной функциональной системы возможно представить в виде

$$\left(\frac{\Delta\Omega}{\Omega}\right)_{\text{пор}} = (1 - 3\sin^2\gamma)\left(\frac{\Delta h}{h}\right)_{\text{пор}} + \left(\frac{15}{2}\sin^4\gamma - \frac{9}{2}\sin^2\gamma\right)\left(\frac{\Delta h}{h}\right)_{\text{пор}}^2 + \left(15\sin^4\gamma - \frac{3}{2}\sin^2\gamma - \frac{105}{6}\sin^6\gamma\right)\left(\frac{\Delta h}{h}\right)_{\text{пор}}^3, \quad (6)$$

где $\left(\frac{\Delta\Omega}{\Omega}\right)_{\text{пор}}$ — пороговое относительное изменение видимой величины ориентира, вызванное относительным изменением $\frac{\Delta h}{h}_{\text{пор}}$; γ имеет тот же смысл, что и в выражении (5).

Во всех рассматриваемых моделях под изменением любой величины понимается разность ее в конечном и начальном состояниях.

Для этой модели существуют области угла визирования, в которых изменения видимой величины противоположны. Так, для малых $\frac{\Delta h}{h}$ в области $0 < \gamma \leq 35^\circ$ с уменьшением h понижается также и Ω ; в области же $35^\circ \leq \gamma < 90^\circ$ с уменьшением h видимая величина возрастает. Чтобы наиболее быстро оценить относительное изменение удаленности, необходимо смотреть под углом визирования, где наблюдается самое большое изменение видимой величины ориентира. Последнее имеет место под углом визирования, близким к 90° .

Для случая скользящего взора математическая модель функциональной системы оценки удаленности также представляет собой бесконечно убывающий ряд

$$\left(\frac{\Delta\Omega}{\Omega}\right)_{\text{пор}} = -2\left(\frac{\Delta h}{h}\right)_{\text{пор}} + 3\left(\frac{\Delta h}{h}\right)_{\text{пор}}^2 - 4\left(\frac{\Delta h}{h}\right)_{\text{пор}}^3 + \dots + n\left(\frac{\Delta h}{h}\right)_{\text{пор}}^{(n-1)}. \quad (7)$$

Способ прослеживания существенно отличается от способа скольжения тем, что в модели скольжения коэффициенты при степенях $\frac{\Delta h}{h}$ постоянны и не зависят от угла визирования (как h в случае прослеживания).

С учетом того, что первый член является определяющим, из модели (7) следует, что изменение видимой величины ориентира обратно изменению удаленности. Это означает, что с уменьшением удаленности видимая величина ориентира увеличивается.

Другой возможный признак оценки удаленности — монокулярный параллакс. Для наиболее интересных случаев вертикального и горизонтального движения нами был промоделирован механизм монокулярного параллакса. В системе координат, связанной с подвижным глазом, математическая модель этого механизма имеет вид

$$\omega_1 = \frac{v}{2h} (-\sin 2\gamma_0 + \sin 2\gamma_1); \quad (8)$$

$$\omega_2 = \frac{v}{2h} (-\sin 2\gamma_0 + \sin 2\gamma_2),$$

где ω_1 и ω_2 — видимые скорости нефиксируемых ориентиров, расположенных ближе и дальше фиксируемого ориентира;
 v — линейная скорость движения оператора;
 h — удаленность оператора от плоскости, на которой находятся наблюдаемые ориентиры;
 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_0$ — соответственно углы визирования нефиксируемых и фиксируемого ориентиров.

Из модели (8) следует характерное для монокулярного параллакса зрительное противоположное направление движения нефиксируемых ориентиров, которое является показателем их относительной удаленности.

Знак видимых скоростей ω_1 и ω_2 в модели (8) разный и непосредственно связывается с направлением движения изображений на сетчатке. Если производить фиксацию среднего ориентира, начиная с малых углов визирования и кончая углом визирования, примерно равным 45° , то, как вытекает из модели (8), видимые перемещения дальних и близких ориентиров будут происходить в разных направлениях от фиксируемого ориентира. Что же касается прослеживания среднего ориентира от $\gamma \approx 45^\circ$ до $\gamma = 90^\circ$, то видимое перемещение нефиксируемых ориентиров теперь имеет место в направлении фиксируемого ориентира и также в разных направлениях.

Различные направления видимых перемещений ближе и дальше расположенных ориентиров (существующее реальное перемещение фиксируемого ориентира компенсируется вращением глазного яблока, так что изображение данного ориентира все время находится в фокусе) положены в основу оценки их относительной удаленности.

Наряду с вышеуказанными функциональными системами подобная система бинокулярного параллакса также позволяет производить оценку удаленности до ориентира. Математическая модель этой функциональной системы при вертикальном движении для случая $d \ll f$ и $d \ll h$ может быть представлена в виде

$$\Theta = d \left(\frac{1}{f} - \frac{\sin \gamma}{h} \right), \quad (9)$$

где Θ — угол бинокулярного параллакса;
 d — база глаз;
 f — удаленность до нефиксируемого ориентира, в конкретных случаях часто остающаяся постоянной;
 $\frac{h}{\sin \gamma}$ — удаленность от глаз до фиксируемого ориентира;
 γ — угол визирования.

Модель (9) — это взаимно-однозначное соответствие между удаленностью до фиксируемого объекта и углом бинокулярного параллакса.

Применение рассмотренных математических моделей функциональных систем оценки удаленности дает возможность осуществлять управление восприятием оператора на тренажере (где вырабатываются, а затем закрепляются перцептивные и другие навыки, необходимые для управления летательным аппаратом) и в реальном полете.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Леонтьев. Проблемы развития психики. Изд-во «Мысль», 1965.
2. Я. Я. Белик. Математическое моделирование константности восприятия величины объекта. Сб. «Проблемы бионики», вып. 3. Изд-во Харьковск. ун-та, 1969.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НЕКОТОРЫХ ЯВЛЕНИЙ ИНЕРЦИИ ЗРЕНИЯ

Е. Г. Качко, М. Ф. Бондаренко

Исследования субъективных реакций зрительного анализатора в ответ на периодические быстрые изменения яркости светового стимула позволили представить соответствующую математическую модель и дать ее экспериментальное обоснование.

Вначале изложим некоторые необходимые математические сведения. Пусть M — множество всевозможных ограниченных периодических функций $x(t)$ с периодом T , заданных на интервале $(-\infty, \infty)$, N — некоторое множество, F — однозначное отображение M на N .

Введем в рассмотрение функционалы

$$P_k(x) = \frac{2}{T} \sqrt{\left(\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cos \frac{2\pi k}{T} t dt \right)^2 + \left(\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \sin \frac{2\pi k}{T} t dt \right)^2} \quad (1)$$

$(k = 1, 2, 3, \dots).$

Пусть отображение F удовлетворяет условию:

Если для всех k

$$P_k(x_1) = P_k(x_2), \quad (2)$$

где $x_1, x_2 \in M$, то

$$Fx_1 = Fx_2. \quad (2a)$$

Общий вид оператора F может быть записан следующим образом:

$$F = fP, \quad (3)$$

где P — вектор с компонентами P_k ($k = 1, 2, 3, \dots$);

f — однозначное отображение.

Условия (2) — (2a) означают, что оператор F не реагирует на фазовые соотношения гармонических компонент сигнала $x(t)$.

Покажем, что исследуемые реакции зрительного анализатора могут быть математически описаны оператором вида (3).

Функции $x_1(t), x_2(t), \dots \in M$ будем интерпретировать как периодические колебания всевозможных форм и одинаковой частоты $\omega = \frac{1}{T}$ яркости светового стимула во времени. Элементы множества N интерпретируем как различные зрительные ощущения, возникающие у испытуемого в ответ на действие того или иного светового стимула. Под отображением F будем понимать математическое описание преобразования светового стимула в зрительное ощущение, которое осуществляется зрительным анализатором человека. Требование однозначности отображения F означает, что зрительный анализатор должен реагировать всегда одним и тем же ощущением на одинаковые световые стимулы, т. е. если $x_1 = x_2$, то $Fx_1 = Fx_2$. Условия (2) — (2a) в применении к органу зрения означают следующее. Пусть подобраны два световых стимула

$$x_1(t) = \sum_{k=1}^{\infty} P_k(x_1) \sin(k\omega t + \varphi_k(x_1)), \quad x_2(t) = \sum_{k=1}^{\infty} P_k(x_2) \sin(k\omega t + \varphi_k(x_2)) \quad (4)$$

таким образом, что у них для всех k амплитуды соответствующих гармоник равны, т. е.

$$P_k(x_1) = P_k(x_2). \quad (5)$$

Вместе с тем фазы этих гармоник, вообще говоря, различны, т. е.

$$\varphi_k(x_1) \neq \varphi_k(x_2). \quad (6)$$

На такие световые стимулы глаз должен реагировать одинаковыми зрительными ощущениями.

Если условия (2) — (2а) в вышеприведенной интерпретации окажутся справедливыми, то функционирование зрительного анализатора может быть математически описано в виде оператора (3).

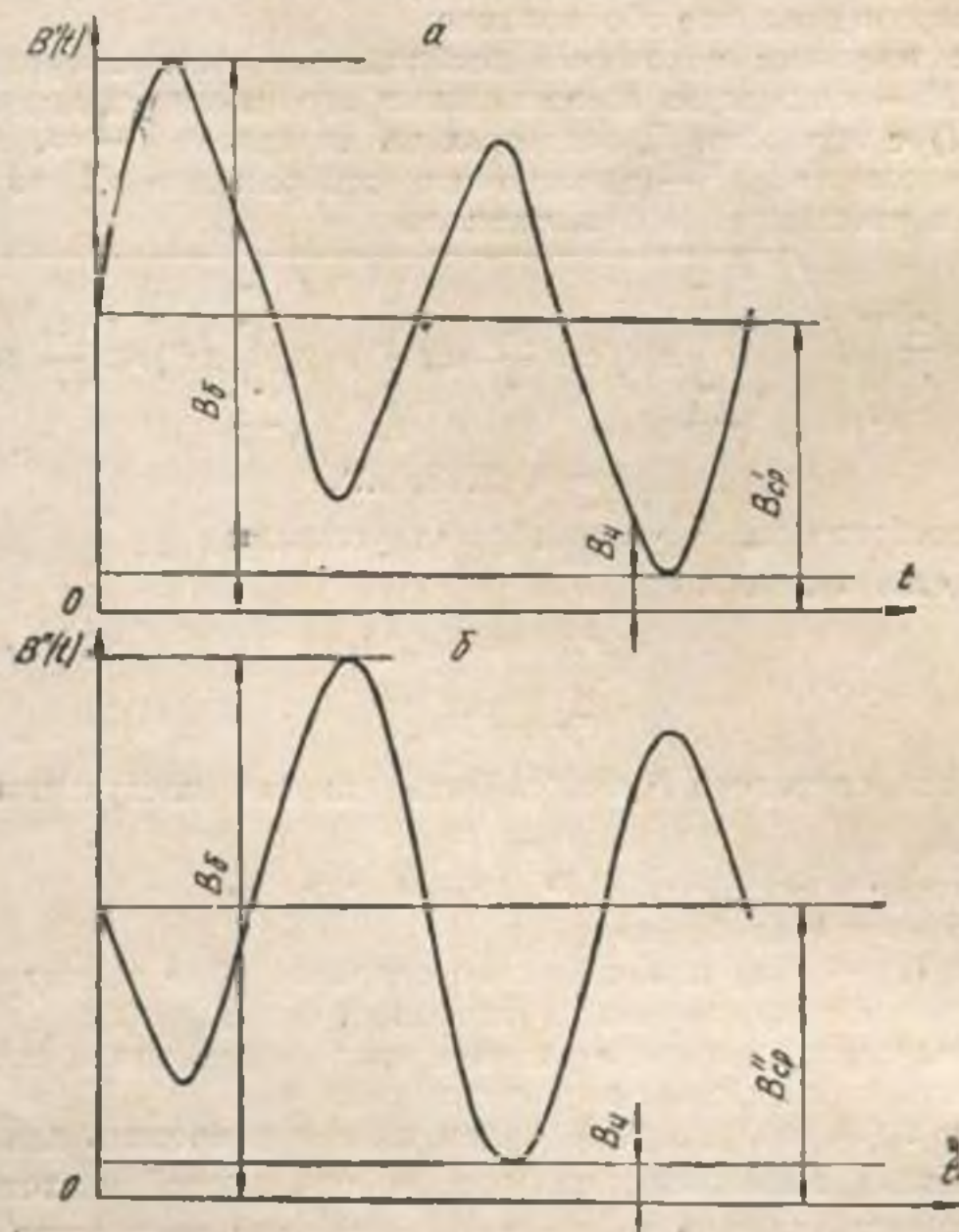


Рис. 1.

Ниже средствами экспериментального материала показана справедливость условий (2) — (2а), обосновывающих правомерность использования формулы (3) для целей математического описания работы органа зрения человека.

Данные экспериментальной проверки условий (2) — (2а) в литературе не встречаются. Мы провели серию специальных опытов, подтверждающих справедливость этого условия. Были взяты такие зрительные картины, которые, согласно формулам (2) — (2а), должны вызывать одинаковые зрительные ощущения. В одном из опытов наблюдателю предъявлялись две зрительные картины $V_1(t)$ и $V_2(t)$, яркость которых менялась во времени согласно диаграмме (рис. 1, а и б). На диаграмме $B_б$ и $B_ч$ означают уровни яркости, соответствующие белому и черному цветам с коэффициентами отражения 83 и 2%. Для обеих зрительных картин средние яркости $B_{ср_1}$ и $B_{ср_2}$ совпадают.

Эксперименты проводились с помощью диска Максвелла. Для формирования необходимых зрительных картин был использован обобщенный закон Тальбота *. Схема кружков, использовавшихся в опыте, представлена на рис. 2. На кружке большего диаметра (200 мм) сформирована зрительная картина, соответствующая диаграмме (рис. 1, а), на кружке меньшего диаметра (120 мм) — соответствующая диаграмме (рис. 1, б); количество секторов, необходимых для формирования зрительных картин, выбрано равным 16; в этом случае быстрые мелькания на обоих полях сравнения сливаются при частоте 2—3 гц.

Оба кружка надевались на диск таким образом, что их центры совпадали. Перед диском устанавливался непрозрачный экран с двумя круглыми отверстиями размером $2,5^\circ$ каждое. Расстояние между ними принималось равным 4 мм, а точка фиксации выбиралась посередине между отверстиями, чтобы наблюдения мельканий на обоих полях сравнения производились симметричными участками сетчатки. В одном из отверстий наблюдатель видел зрительную картину, сформированную на кружке большего диаметра, в другом — соответствующую диаграмме (рис. 1, б).

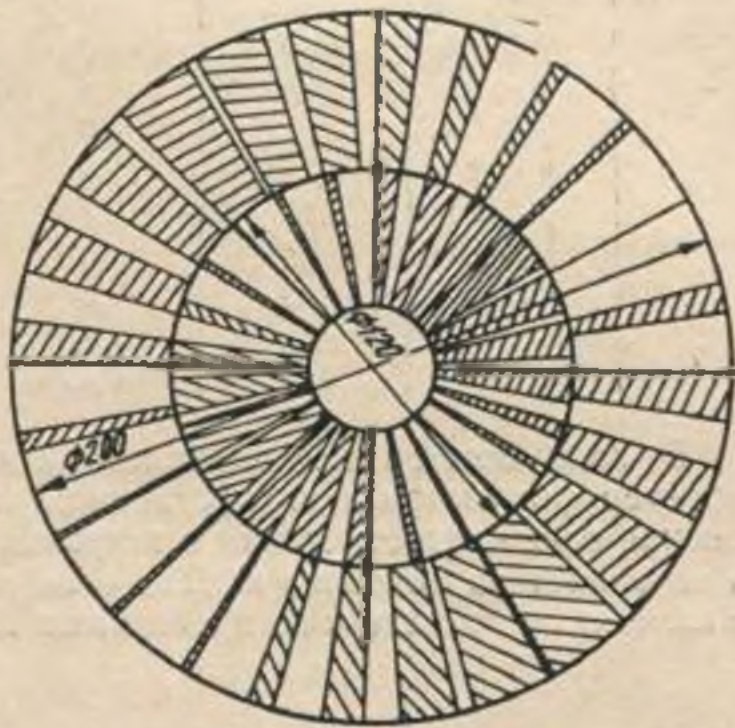


Рис. 2.

При раскручивании диска со скоростью более 50 гц обе зрительные картины были неотличимы, слияние мельканий яркости имело место на обоих полях сравнения.

При уменьшении скорости вращения диска до 30—40 гц появлялись мелькания на обоих полях сравнения, но та и другая зрительные картины по-прежнему вызвали одинаковые ощущения, а мелькания были синфазными. Наконец, при некоторой скорости вращения (менее 8 гц) наблюдатель отмечал несовпадение полей сравнения и несинфазность мельканий. В процессе постепенного уменьшения скорости вращения диска экспериментатор фиксировал максимальную скорость вращения диска, при которой наблюдатель отмечал неравенство полей сравнения л.

Подобные эксперименты проводились с четырьмя испытуемыми для различных $P_n(x)$, φ_n при освещенности диска 140 лк.

Повторяемость результатов для различных испытуемых была хорошей.

Результаты опытов при $\varphi_1 = 0$ сведены в таблице, где каждая цифра в последней колонке ее — среднее значение скорости вращения диска л при десятикратном повторении одинаковых экспериментов для четырех испытуемых.

* Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, Е. Г. Качко. Математическое описание сглаживающих свойств зрения. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5. Изд-во Харьковск. ун-та, 1970.

Номер опыта	P_1	P_2	P_3	φ_1	φ_2	n
1	0,35	0,175	0	0	0	4,45
	0,35	0,175	0	$\pm 180^\circ$	0	
2	0,139	0,4	0	0	0	5,05
	0,139	0,4	0	$\pm 180^\circ$	0	
3	0,05	0,45	0	0	0	5,2
	0,05	0,45	0	$\pm 180^\circ$	0	
4	0,05	0,45	0	0	0	5,1
	0,05	0,45	0	$\pm 90^\circ$	0	
5	0,025	0,45	0	0	0	4,8
	0,025	0,45	0	$\pm 180^\circ$	0	
6	0,025	0,45	0	0	0	4,17
	0,025	0,45	0	$\pm 90^\circ$	0	
7	0	0,05	0,45	0	0	7,9
	0	0,05	0,45	0	$\pm 180^\circ$	

В ходе опытов исследовалось влияние уровня освещенности на характер фотометрических установок. Эксперименты показали, что изменение освещенности диска в широких пределах от 30 до 3000 лк почти не влияет на значение n . Для всех испытуемых в заданном диапазоне изменения яркости n не превышают 10 гц.

ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛОКОН НЕРВА ПО ДИАМЕТРАМ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Ю. В. Парамонов

Пусть $\Phi^*(d)$ обозначает функцию распределения аксонов нерва по диаметрам. Согласно определению, $\Phi^*(d)$ данного нерва принимает целочисленные значения внутри промежутка $d_{\max}$, $d_{\min}$ и тождественно равна нулю в остальных точках ($d_{\max}$ и $d_{\min}$ — соответственно максимальный и минимальный диаметры волокон). В дальнейшем везде вместо реальной ступенчатой $\Phi^*(d)$ будет рассматриваться аппроксимирующая ее непрерывная функция $\Phi(d)$.

Рассмотрим основное предположение: если диаметры волокон одного и того же нерва совпадают, то совпадают также все регистрируемые параметры их потенциалов действия.

Другими словами, пренебрегаем неоднородностью расположения различных аксонов по отношению к отводящим и раздражающим электродам, неоднородностью окружающей среды, разбросом порогов срабатывания и потенциалов покоя у волокон одного и того же диаметра.

При раздражении целого нерва прямоугольными импульсами тока постоянной длительности t_0 и нарастающей амплитуды A первыми начинают срабатывать аксоны, имеющие максимальный диаметр, а затем последовательно включаются все более и более тонкие.

Площадь, или интеграл, $y(A)$ регистрируемого ответа нерва представляет собой в случае униполярного отведения сумму площадей потенциалов действия всех волокон, которые способны срабатывать при данной амплитуде A .

Рассмотрим подробнее изменение $y(A)$ при различных значениях A .

Для этого всю область $d_{\max}$, $d_{\min}$ разобьем на множество равных по величине элементарных отрезков Δd и будем считать, что в пределах каждого такого элементарного участка диаметры равны и совпадают со значением диаметра в начале данного отрезка Δd .

Тогда очевидно, что величина $\Phi(d)\Delta d$ представляет собой количество волокон диаметром d в отрезке Δd .

Пусть теперь амплитуда импульса стимуляции A_1 такова, что срабатывать могут лишь волокна максимального диаметра. В этом случае площадь ответа нерва должна удовлетворять выражению

$$y(A)_1 = \Phi(d_{\max}) S(d_{\max}) \Delta d. \quad (1)$$

где $S(d)$ — регистрируемая площадь потенциала действия волокна диаметра d .

Для $A_2 > A_1$

$$y(A)_2 = \Phi(d_{\max} - \Delta d) S(d_{\max} - \Delta d) \Delta d + \Phi(d_{\max}) S(d_{\max}) \Delta d. \quad (2)$$

Аналогично (1), (2) для произвольной величины $A > \dots > A_2 > A_1$ можно записать

$$\begin{aligned} y(A) &= \Phi[d(A)] S[d(A)] \Delta d + \Phi[d(A) + \Delta d] S[d(A) + \Delta d] \Delta d + \\ &+ \dots + \Phi[d(A) + n\Delta d] S[d(A) + n\Delta d] \Delta d + \dots + \Phi[d_{\max}] S[d_{\max}] \Delta d = \\ &= \sum_{i\Delta d=0}^{i\Delta d=d_{\max}-d(A)} \Phi[d(A) + i\Delta d] S[d(A) + i\Delta d] \Delta d, \end{aligned} \quad (3)$$

где $d(A)$ — минимальный диаметр волокна, способного срабатывать при амплитуде A и длительности τ_0 импульса стимуляции.

Выражение (3) представляет собой Риманову сумму и при $\Delta d \rightarrow 0$ может быть представлено интегралом

$$y(A) = \int_{d(A)}^{d_{\max}} \Phi(x) S(x) dx. \quad (4)$$

Дифференцируя (4), получаем выражение для функции распределения

$$\Phi[d(A)] = - \frac{y'(A)}{S[d(A)] d'(A)}; \quad (5)$$

в этом случае

$\Phi[d(A)] = 0$ при $d(A) > d_{\max}$ и $d(A) < d_{\min}$.

Для нахождения зависимости $d(A)$ воспользуемся эквивалентной схемой мембраны [1] (рис. 1, а). Рассматриваем два случая:

первый $\tau_{0.1} \ll \frac{1}{2} r_i C_m$;

второй $\tau_{0.2} \gg \frac{1}{2} r_i C_m$.

Рис. 1, б и в представляют собой преобразованную соответственно первому и второму случаям эквивалентную схему мембраны.

Первый случай (рис. 1, б). Дифференциальное уравнение цепочки имеет вид

$$r_i C_m \frac{dU_c}{dt} + 2U_c = U_e, \quad (6)$$

где

$$U_e = A [1(t) - 1(t - \tau_{0.1})], \quad (7)$$

а его решение

$$\Delta U_c(\tau_{0.1}) = \frac{A}{2} \left(1 - e^{-\frac{2\tau_{0.1}}{r_i C_m}} \right). \quad (8)$$

Аксон срабатывает, если выполняется условие

$$\Delta U_c(\tau_{0.1}) = h. \quad (9)$$

представляющее собой пороговую деполяризацию. Деполяризация, вызываемая внешним источником, развивается под катодом и по величине равна изменению напряжения на емкости C_m . Значение h определяется

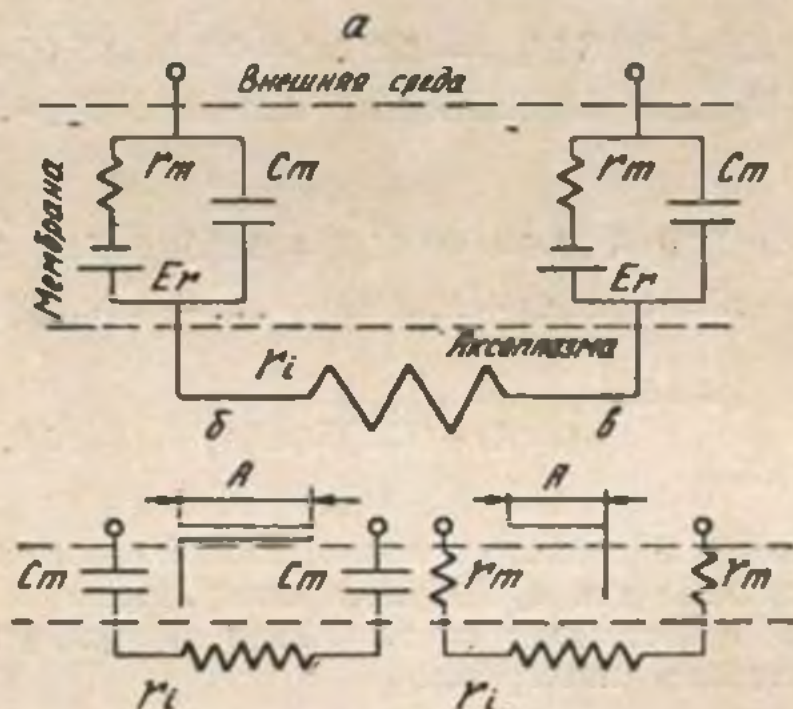


Рис. 1.

в основном удельными свойствами мембраны, а также ионными составами внешнего раствора и аксоплазмы. Если теперь в (8) подставить значения $r_i = \frac{4R_i l}{\pi d^2}$, $C_m = C_m \pi d l$ и выполнить необходимые преобразования, учитывая соотношение (9), то можно получить

$$d(A) = -\frac{2R_i C_m l^2}{\tau_{0.1}} \ln \left(1 - \frac{2h}{A} \right) = -\beta_1 \ln \left(1 - \frac{2h}{A} \right), \quad (10)$$

где $d(A)$ — минимальный диаметр волокна, для которого деполяризация, вызванная импульсом стимуляции амплитуды A и длительности $\tau_{0.1}$, достигает порогового значения.

Второй случай (рис. 1, б). Условие генерации потенциала действия имеет вид

$$h = \frac{A r_m}{2r_m + r_i}. \quad (11)$$

Подставив в (11) значения r_i и $r_m = \frac{R_m}{\pi d}$, получаем

$$d(A) = \frac{2R_i l}{R_m \left[\frac{A}{2h} - 1 \right]} = \beta_2 \frac{1}{\frac{A}{2h} - 1}. \quad (12)$$

Для нахождения зависимости $S(d)$ воспользуемся тем, что амплитуда спайка, распространяющегося по нервному волокну, не зависит от диаметра данного волокна и определяется удельными свойствами мембраны, а также ионными концентрациями наружной и внутренней среды. Однако данное напряжение потенциала действия развивается на внутреннем сопротивлении r_m , которое определяется размером аксона; следовательно, энергия импульса обратно пропорциональна внутреннему сопротивлению. С другой стороны, благодаря шунтирующему действию окружающих тканей и интерцитиальной жидкости, сопротивление которых $r_e \ll r_m$, при отведении от целого нерва регистрируемая величина потенциала действия, согласно [2], пропорциональна $\frac{r_e}{r_e + r_m} \approx \frac{r_e}{r_m}$ и,

следовательно, пропорциональна энергии. Теперь, учитывая, что энергия импульса определяется его площадью, можно записать

$$S(d) = S_0 \frac{r_e}{r_m} = \frac{S_0 r_e \pi d}{R_m} = \alpha d. \quad (13)$$

Здесь S_0 — площадь потенциала действия волокна без учета шунтирования; другими словами, под S_0 понимается удельная энергия мембраны в импульсе.

Подставив (10) и (13) в (5), получим окончательное выражение для функции распределения при стимуляции (первый случай):

$$\Phi[d(A)] = \frac{y'(A) A (A - 2h)}{2\alpha\beta_1 h \left[\beta_1 \ln \left(1 - \frac{2h}{A} \right) \right]} \quad (14)$$

Аналогично находим такое же выражение для второго случая:

$$\Phi[d(A)] = \frac{2h}{\alpha\beta_2^2} y'(A) \left[\frac{A}{2h} - 1 \right]^2. \quad (15)$$

Подробные результаты исследования выражений, полученных для первого и второго случаев, выходят за рамки настоящей работы.

Заметим лишь, что погрешность измерения площади ответа нерва при стимуляции (первый случай) нарастает с уменьшением диаметров волокон, тогда как при стимуляции (второй случай) погрешность нарастает в противоположном направлении.

Нахождение значения диаметра, при котором эти погрешности совпадают, и на основании этого установление границы применимости первого и второго случаев не представляют больших трудностей.

Методика эксперимента, выбор объекта и параметров стимуляции являлись предметом отдельного рассмотрения. Остановимся более подробно лишь на процессе определения площади кривой по ее энергетическому спектру, построенному на многоканальном анализаторе импульсов.

Как видно из рис. 2, в m -й канал анализатора добавляется единица всякий раз, когда амплитуда исследуемого процесса попадает в полосу

$$m\delta \text{ } (m - 1)\delta, \quad (16)$$

где δ — уровень дискриминации входного аналого-цифрового преобразователя.

Так как измерение производится через одинаковые промежутки времени, задаваемые частотой квантования, то содержимое m -го канала пропорционально относительному времени пребывания сигнала в полосе (16), а произведение $a_m m$ представляет собой сумму площадей столбцов, основание которых равно интервалу между квантуемыми

импульсами, высота же — номеру канала. Таким образом, полная площадь исследуемой кривой составит

$$y(A) = \sum a_m t, \quad (17)$$

где a_m — содержимое m -го канала.



Рис. 2.

Для уменьшения ошибки, вызванной вероятностным характером срабатывания некоторых аксонов нерва [3], производилось усреднение

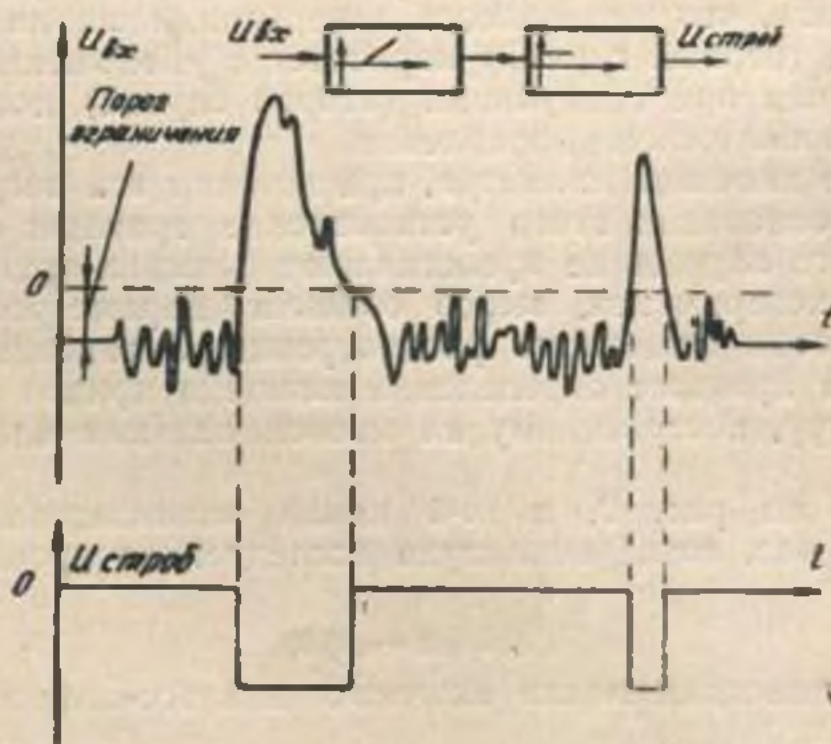


Рис. 3.

площади ответа по результатам нескольких десятков измерений. Частота стимуляции выбиралась достаточно низкой с целью обеспечения

статистической независимости возбуждения волокон от импульса к импульсу.

В этом случае относительная площадь энергетического спектра, обусловленная полезным сигналом, невелика по сравнению с площадью, обусловленной шумом. Устранение этого недостатка достигалось путем применения схемы стробирования, характер работы которой очевиден из рис. 3.

Вход аналого-цифрового преобразователя открывался только на время, равное длительности строб-импульса; таким образом, полученный спектр представляет собой только спектр полезного сигнала (рис. 4, 5).

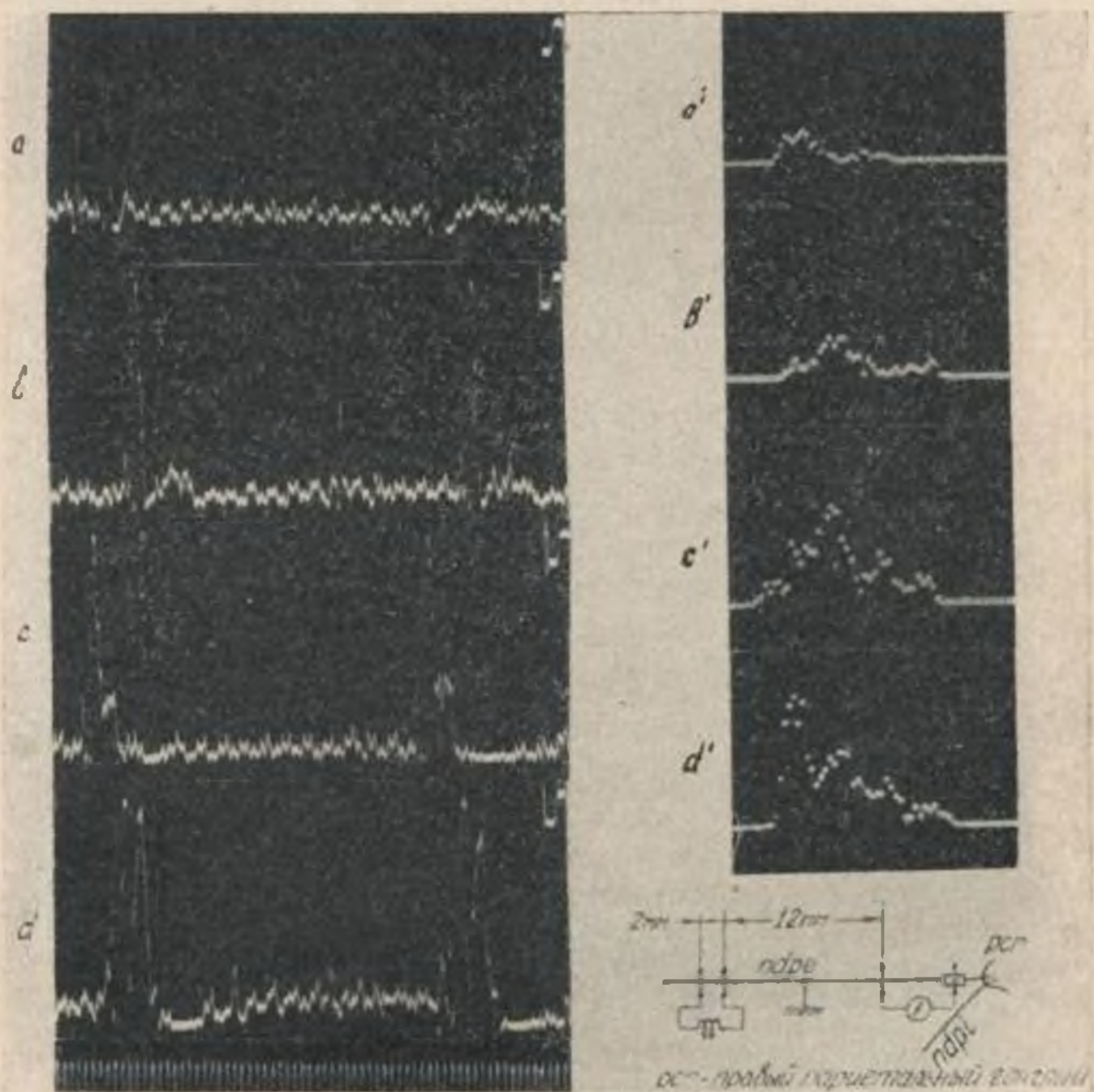


Рис. 4.

Экспериментальные кривые $y(A)$ (второй случай) стимуляции, полученные для двух нервов $ndpe$ и $ndpi$ [4] улитки *Helix*, изображены на рис. 6, а результат преобразования данных кривых, согласно выражению (15), — функции $\Phi(d)$ распределения аксонов в нервах по диаметрам — на рис. 7.

Построенные таким образом зависимости в области малых значений диаметров отличаются от реальных функций распределения. Это происходит потому, что, как заметили еще Эрлангер и Гассер, волна возбуждения от самых тонких волокон даже при униполярном отведении имеет отрицательную фазу, которая искажает величину измеренной площади ответа при больших амплитудах стимуляции. Однако во многих случаях знание качественного поведения функции $\Phi(d)$ позволяет достаточно полно судить о функциональной нагрузке того или иного нерва.

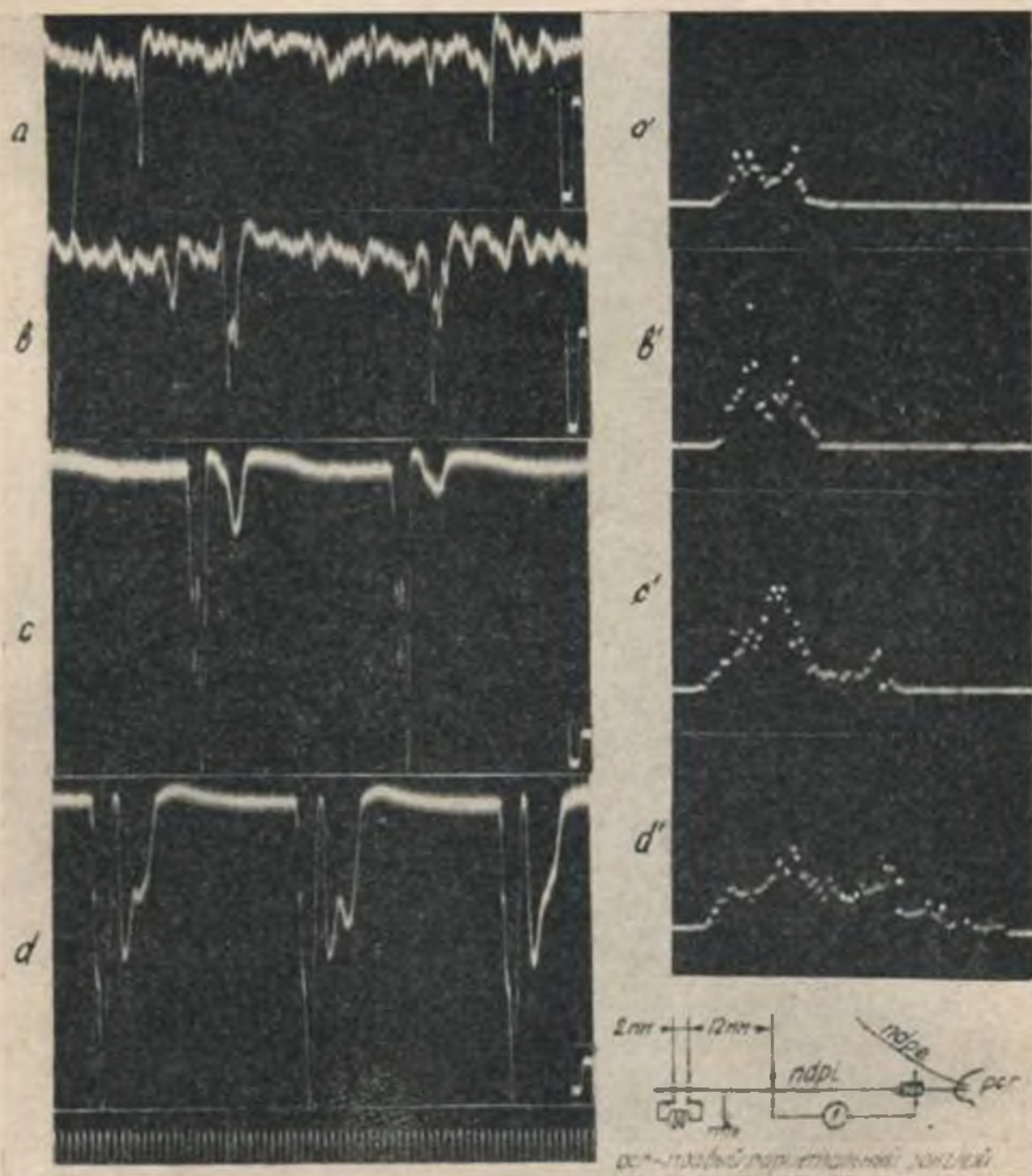


Рис. 5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fulton. A textbook of general Physiology, 17 ed. Sounder, 1955.
2. Б. Кату. Нерв, мышца и синапс. Изд-во «Мнр», 1968.
3. A. A. Verveen, H. E. Derksen. Fluctuation of membrane potential of axons and the problem of coding. «Kybernetik», 2, 1965.
4. Meisenheimer. Die Weinbergschnecke—*Helix pomatia*. 1912.

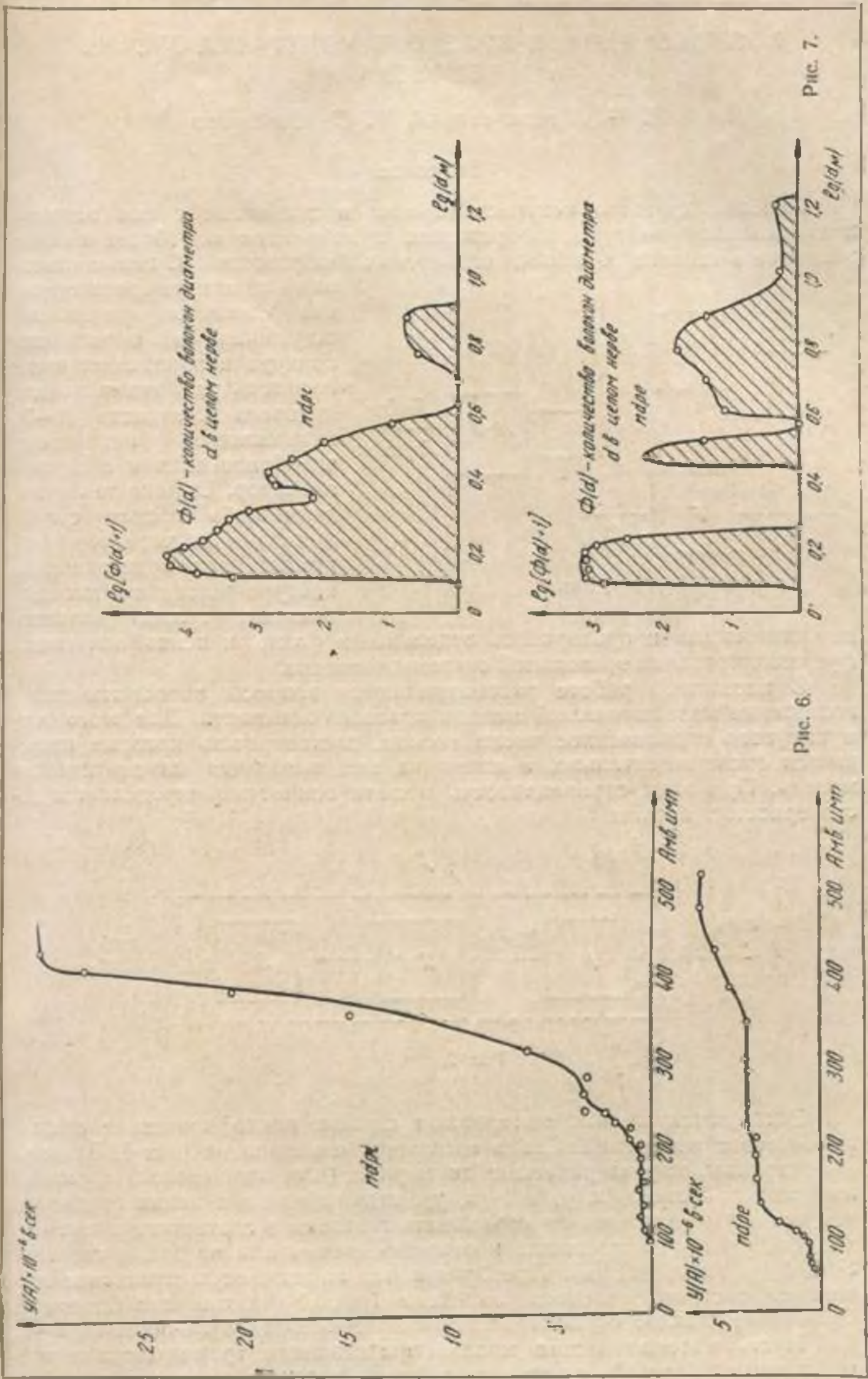


Рис. 6.

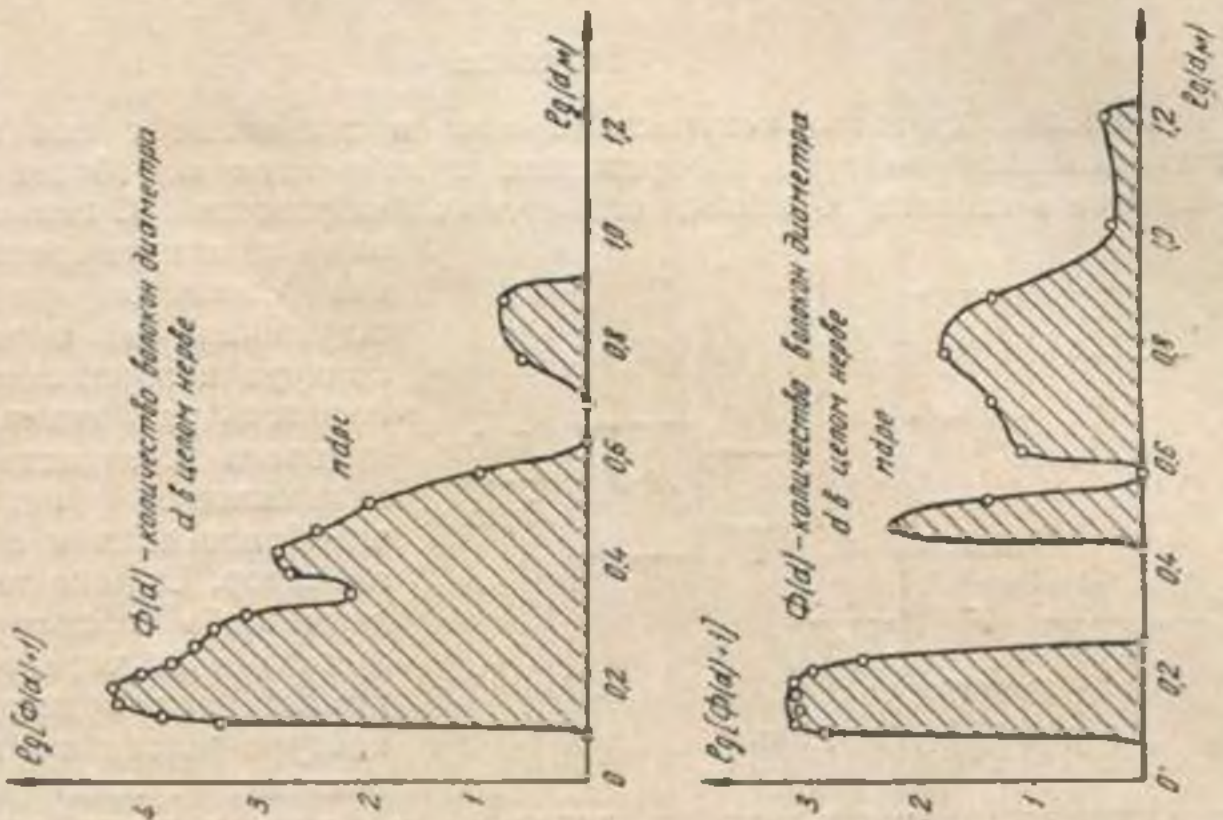


Рис. 7.

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ КРАЕВОГО КОНТРАСТА ЗРЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Е. П. Путятин, В. Я. Сердюченко

Введение

Явление краевого контраста зрения и связанные с ним вопросы подчеркивания контура изображения приобретают все более важное значение в технике обработки оптических изображений. С целью описа-

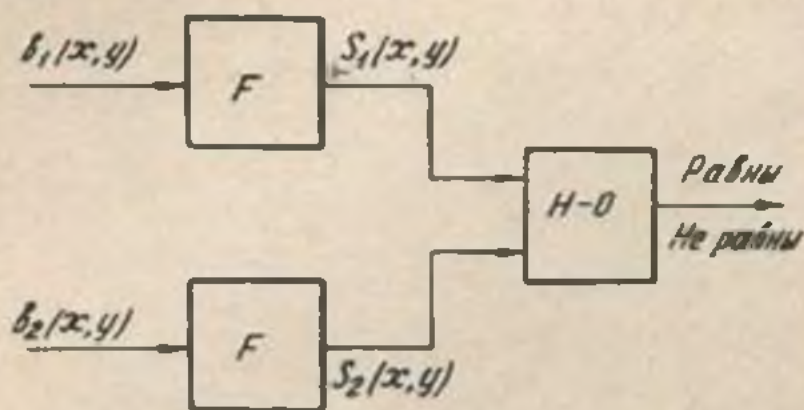


Рис. 1.

ния характера распределения светлоты зрительного ощущения в окрестности контура изображения предлагались различные модели краевого контраста [1—3], содержащие нелинейные преобразования и линейный оператор. Однако такие модели либо носили сугубо прикладной характер (например, для подчеркивания контура телевизионного изображения), либо являлись

эвристическими и проверялись отдельными фактами психофизического функционирования зрительной системы человека.

В настоящей работе рассматриваются вопросы аксиоматического построения математической модели краевого контраста. Для этого формулируется ограниченное число аксиом, достоверность которых проверяется экспериментально, а затем из них выводится математическая модель. При этом справедливость модели полностью определяется достоверностью аксиом.

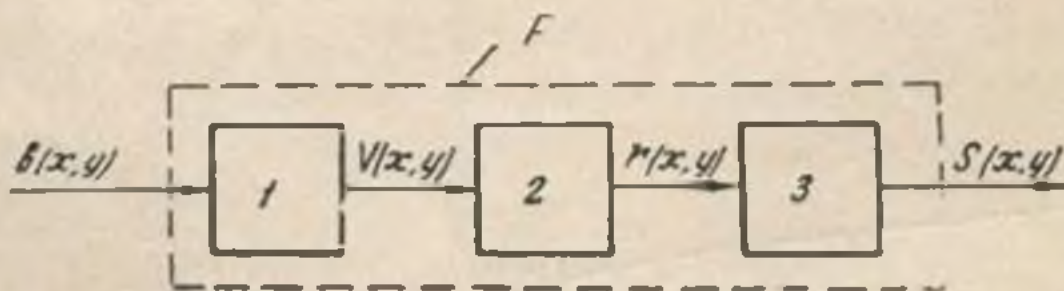


Рис. 2.

Экспериментальным материалом служат психофизические данные нуль-метода измерений. Схема измерений показана на рис. 1. Зрительные картины, характеризующиеся двумерной (или одномерной) функцией лучистой яркости $b_1(x, y)$ и $b_2(x, y)$, заданы на двух полях сравнения, так что испытуемый может сравнивать светлоты в соответствующих точках (x_0, y_0) полей сравнения и отвечать, равны или не равны светлоты S_1 и S_2 в точке (x_0, y_0) . Преобразование картин, осуществляемое зрительной системой человека, на схеме (рис. 1) обозначено блоком F . Сравнение светлот осуществляется гипотетическим нуль-органом $н.-о.$

Пусть математическая модель представлена тремя блоками преобразований (рис. 2), суммарное действие которых соответствует общему оператору F краевого контраста зрения.

В блоке 1 осуществляется преобразование вида $V = f(b)$, где f — непрерывная монотонно возрастающая функция, причем $f(b) > 0$. Это преобразование соответствует известным законам преобразования яркости в светлоту [4], например, степенному или же Вебера — Фехнера (в определенном диапазоне). В дальнейшем вид преобразования в первом блоке будем считать заданным.

Блок 2 — некоторый линейный оператор L , так что выход блока связан с входом соотношением $r = L(V)$. Светлота зрительного ощущения связана с выходом линейного блока взаимно-однозначной функцией $S = \varphi(r)$. В частном случае блок 3 может осуществлять тождественное преобразование. Конкретный вид функции φ не влияет, как легко убедиться, на экспериментальную процедуру измерений, представленную в настоящей работе. Докажем справедливость предложенной модели.

Аксиоматика линейного преобразования

Как известно, краевой контраст проявляется в местах резкого изменения яркости зрительной картины, т. е. вблизи границ контура изображений. На рис. 3, а показаны характерные входные одномерные сигналы математической модели, а на рис. 3, б — распределение светлоты, субъективно воспринимаемое зрительной системой человека для каждо-

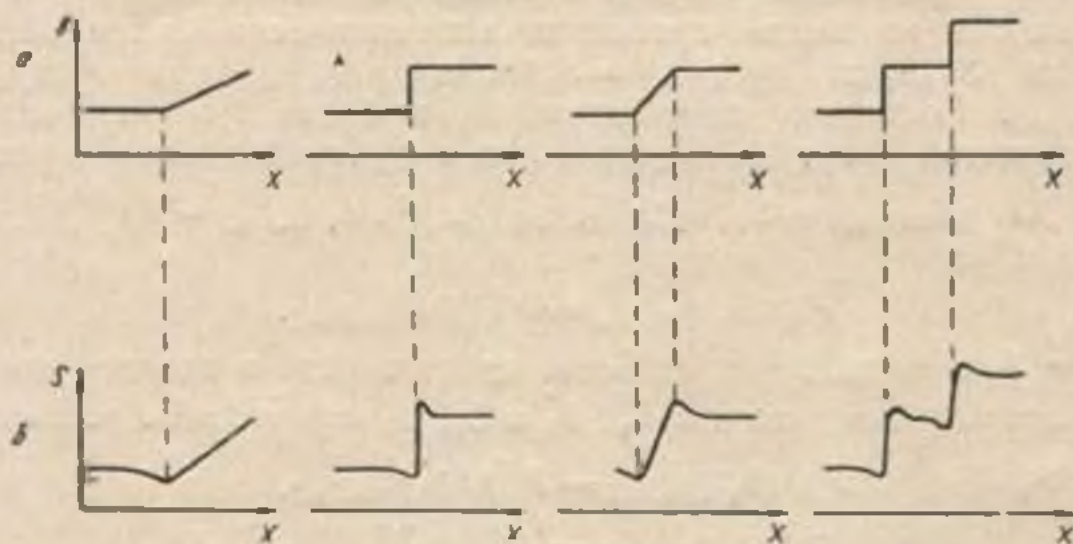


Рис. 3.

го входного сигнала. Естественно считать входные сигналы кусочно-непрерывными ограниченными положительными функциями, имеющими конечное число точек разрыва. Будем полагать, что область задания входных сигналов соответствует центральной части поля зрения (ввиду различия контрастных свойств периферии и центра сетчатки). Функции $b(x, y)$ можно складывать, умножать на вещественные (положительные) числа, возводить в степень. Физически это означает соответствующее изменение величины лучистой яркости в каждой точке зрительной картины. В силу отмеченных свойств преобразования в первом блоке функции $V(x, y)$ также являются кусочно-непрерывными неотрицательными ограниченными функциями. Как и входные сигналы, функции $V(x, y)$ можно умножать на вещественные положительные числа и складывать. Например, пусть имеется некоторая реакция первого блока модели $V_1 = f(b_1)$. Чтобы получить реакцию αV_1 , нужно вычислить соответствующую

ший входной сигнал $\alpha V_1 = f(b_2)$. Если f^{-1} обратная функция, то $b_2 = f^{-1}[\alpha f(b_1)]$. Для двух функций $V_1 = f(b_1)$ и $V_2 = f(b_2)$ всегда можно найти их сумму $V = f(b) = f(b_1) + f(b_2)$. Значение входного сигнала при этом вычисляется по формуле $b = f^{-1}[f(b_1) + f(b_2)]$. Отметим, что в случае логарифмического преобразования в первом блоке (закон Вебера — Фехнера) умножению сигнала V на постоянную величину α соответствует возведение сигнала b в степень (b^α) , а сложению $V_1 + V_2$ — умножение входных сигналов $b_1 \times b_2$.

Каждой функции $V(x, y)$ поставим в соответствие вещественное число, называемое нормой:

$$\|V\| = \max_{(x, y)} |V(x, y)|. \quad (1)$$

Нетрудно убедиться, что выражение (1) удовлетворяет всем аксиомам определения нормы. Ограниченность и существование нормы вытекают из естественных условий работы глаза: энергия входных сигналов в каждой точке поля зрения, а следовательно, и норма функции $V(x, y)$ являются величиной ограниченной.

Сказанное выше позволяет рассматривать функции $\alpha V(x, y)$, $\alpha > 0$ как элементы конуса в пространстве кусочно-непрерывных функций с равномерной метрикой.

Для обоснования характера преобразования информации в блоке 2 модели сформулируем аксиомы, непосредственно проверяемые в эксперименте по красному контрасту с помощью нуля-метода. В соответствии с рис. 1 факт равенства светлот в некоторой точке (x_0, y_0) двух зрительных картин на полях сравнения математически будем обозначать равенствами $S_1[b_1(x, y)]_{(x_0, y_0)} = S_2[b_2(x, y)]_{(x_0, y_0)}$ или $F(b_1)_{(x_0, y_0)} = F(b_2)_{(x_0, y_0)}$. Поскольку преобразование в блоке 1 модели задано, то эти же равенства могут быть записаны в функциональном масштабе f :

$$S_1[V_1(x, y)]_{(x_0, y_0)} = S_2[V_2(x, y)]_{(x_0, y_0)}; F(V_1)_{(x_0, y_0)} = F(V_2)_{(x_0, y_0)}$$

или

$$F[f(b_1)]_{(x_0, y_0)} = F[f(b_2)]_{(x_0, y_0)}.$$

Аксиома 1 характеризует свойство аддитивности в краевом контрасте. Если для зрительных картин b_1, b_1' и b_2, b_2' справедливы равенства

$$F[f(b_1)]_{(x_0, y_0)} = F[f(b_1')]_{(x_0, y_0)}, \quad (2)$$

$$F[f(b_2)]_{(x_0, y_0)} = F[f(b_2')]_{(x_0, y_0)},$$

то для них выполняется также соотношение

$$F[f(b_1) + f(b_2)]_{(x_0, y_0)} = F[f(b_1') + f(b_2')]_{(x_0, y_0)}. \quad (3)$$

Другими словами, равенство светлот в точке (x_0, y_0) для двух зрительных картин на полях сравнения не нарушится при попарном прибавлении в функциональном масштабе первого блока модели двух других зрительных картин с равенством светлот в той же точке. Эта аксиома проверяется экспериментом.

Аксиома 2 характеризует одномерность. Существует фиксированная функция $V_0(x, y)$ такая, что для любой другой функции $V(x, y)$ найдется такое единственное вещественное число r , что имеет место равенство

$$F(rV_0)_{(x_0, y_0)} = F(V)_{(x_0, y_0)}. \quad (4)$$

Зафиксируем некоторую функцию $V_0(x, y) = f[b_0(x, y)]$ на одном из полей сравнения. На другом поле сформируем зрительную картину $b(x, y)$, которой соответствует функция $V(x, y) = f[b(x, y)]$. Равенство

(4) означает, что светлоты в произвольной точке (x_0, y_0) всегда можно выровнять, умножая фиксированную функцию V_0 на коэффициент r . Входной сигнал, соответствующий функции rV_0 , определяется с помощью обратной функции.

Аксиома 3 характеризует непрерывность. Непрерывному изменению функции $V(x, y)$ соответствует непрерывное изменение числа r в опытах, соответствующих аксиоме 2.

Вследствие непрерывности функции f из близости в смысле расстояния по норме (1) двух функций $V'(x, y)$ и $V''(x, y)$ всегда следует близость соответствующих входных сигналов $b'(x, y)$ и $b''(x, y)$ в той же метрике. Это значит, что для проверки аксиомы непрерывности на опыте нужно лишь убедиться в том, что близким входным сигналам $b'(x, y)$ и $b''(x, y)$, т. е. таким, для которых расстояние в равномерной метрике мало, соответствующее число $\Delta = r' - r''$, определенное в точке (x_0, y_0) , также достаточно мало.

Теперь, руководствуясь тремя аксиомами, докажем, что число r представляет собой линейный непрерывный функционал от функции $V(x, y)$. Для этого достаточно показать, что $r[V(x, y)]$ аддитивен и непрерывен [6].

Пусть имеется некоторая функция $V(x, y)$, равная сумме двух других функций: $V(x, y) = V'(x, y) + V''(x, y)$. Возьмем фиксированную функцию $V_0(x, y)$. Тогда, согласно аксиоме 2, для каждой из функций $V(x, y)$, $V'(x, y)$, $V''(x, y)$ найдутся числа r , r' , r'' такие, что будут иметь место равенства светлот в точке (x_0, y_0) :

$$F(rV_0)_{(x_0, y_0)} = F(V)_{(x_0, y_0)}; \quad (5)$$

$$F(r'V_0)_{(x_0, y_0)} = F(V')_{(x_0, y_0)}; \quad (6)$$

$$F(r''V_0)_{(x_0, y_0)} = F(V'')_{(x_0, y_0)}. \quad (7)$$

Но в соответствии с аксиомой 1 будет иметь место и следующее равенство:

$$F(r'V_0 + r''V_0)_{(x_0, y_0)} = F(V' + V'')_{(x_0, y_0)}. \quad (8)$$

Следовательно, в силу (5) $r = r' + r''$. Непрерывность непосредственно вытекает из аксиомы 3.

Из аксиомы 2 следует, что если для функций V_1 и V_2 в точке (x_0, y_0) коэффициенты α одинаковы, то одинаковы и светлоты в той же точке. Справедливо и обратное утверждение. Пусть для двух функций V_1 и V_2 светлоты в точке (x_0, y_0) одинаковы, т. е. $F(V_1)_{(x_0, y_0)} = F(V_2)_{(x_0, y_0)}$. Всегда можно подобрать положительные числа r_1 и r_2 такие, что

$$F(r_1V_0)_{(x_0, y_0)} = F(V_1)_{(x_0, y_0)} \text{ и } F(r_2V_0)_{(x_0, y_0)} = F(V_2)_{(x_0, y_0)}$$

для некоторой фиксированной функции V_0 . Но тогда $F(r_1V_0)_{(x_0, y_0)} = F(r_2V_0)_{(x_0, y_0)}$; следовательно, $r_1 = r_2$. Таким образом, светлота S в точке (x_0, y_0) и коэффициент r , определенный в соответствии с аксиомой 2, находятся во взаимно-однозначном соответствии.

Мы показали, что из трех аксиом вытекает математическая модель, согласно блок-схеме, представленной на рис. 2. Поскольку все вышеприведенные рассуждения относятся к точке (x_0, y_0) , блок 2 модели является частным видом линейного оператора — линейным функционалом.

В общем же случае функционал r представляет собой параметр координат поля зрения x и y ; кроме того, он зависит от выбора фиксированной функции V_0 , а также от задания точек фиксации глаза a и b , т. е. $r = L(x, y, V, V_0, a, b)$. При естественном предположении, что точки фиксации глаза совпадают с точками измерения светлоты ($x = a$, $y = b$), параметр r можно рассматривать как линейный оператор, заданный на множестве функций $V(x, y)$:

$$r(x, y, V) = L(V). \quad (9)$$

Сигнал $r(x, y)$ на выходе блока линейного оператора также связан взаимно-однозначной функцией со светлотой $S(x, y)$. Чтобы убедиться в этом, вспомним, что, согласно аксиоме 2, значение функции $r(x, y)$ в некоторой точке (x_0, y_0) определяется функционалом $r(x_0, y_0, V)$, который полностью характеризует светлоту в данной точке. Другими словами, для определения светлоты в точке (x_0, y_0) значение $r(x, y)$ в других точках может быть неизвестным. Таким образом, блок 3 математической модели не является оператором в общем виде, а осуществляет взаимно-однозначное преобразование.

Легко доказать обратное утверждение, что из математической модели в виде

$$S(x, y) = F[b(x, y)] = \varphi[L(V)] = \varphi[r(x, y, V)] \quad (10)$$

вытекают все три аксиомы.

Так, если взять две пары функций V_1, V_2 и V'_1, V'_2 таких, что для них имеет место равенство светлот в произвольной точке (x_0, y_0) , то равенство светлот будет наблюдаться и для сумм $V_1 + V'_1$ и $V_2 + V'_2$. Действительно, в силу взаимной однозначности в третьем блоке модели имеем равенства $r(x_0, y_0, V_1) = r(x_0, y_0, V_2)$ и $r(x_0, y_0, V'_1) = r(x_0, y_0, V'_2)$. Сложим эти равенства, а так как r — линейный функционал от функций V , то получим $r(x_0, y_0, V_1 + V'_1) = r(x_0, y_0, V_2 + V'_2)$ т. е. равенство светлот в точке (x_0, y_0) .

Возьмем теперь некоторую фиксированную функцию $V_0 = f(b_0)$. Тогда для произвольной точки (x_0, y_0) всегда можно найти единственным образом вещественное положительное число r такое, что для произвольной функции V и функции rV_0 будет иметь место равенство светлот. Из математической модели (10) вытекает, что при равенстве светлот в точке (x_0, y_0) справедливо соотношение

$$L(V)_{(x_0, y_0)} = L(rV_0)_{(x_0, y_0)} = rL(V_0)_{(x_0, y_0)}, \quad (11)$$

откуда r определяется однозначно.

При непрерывности функций f и φ аксиома непрерывности из (10) вытекает очевидным образом.

Уточнение вида линейного оператора

Приведенным выше экспериментальным аксиомам удовлетворяет, вообще говоря, любой линейный оператор во втором блоке математической модели. Для дальнейшего изучения свойств краевого контраста зрения целесообразно остановиться на наиболее общем виде оператора, а затем уточнить его, привлекая дополнительные надежные экспериментальные данные. С целью упрощения записей будем рассматривать одномерные входные сигналы.

Воспользуемся общим видом неотрицательного (положительного) линейного функционала, определенного на конусе пространства кусочно-непрерывных функций $V(x)$, заданных на интервале (a, b) [7].

$$\begin{aligned} r[V]_{(x_0)} = & \int_a^b V(\xi) d\alpha(\xi) + \sum_{i=1}^n \{V_{\alpha}(\xi_i) [\bar{\alpha}_n(\xi_i) - \bar{\alpha}(\xi_i)] + \\ & + V_{\beta}(\xi_i) [\bar{\alpha}(\xi_i) - \bar{\alpha}_n(\xi_i)]\} + \sum_{j=1}^m \sigma(\eta_j) V(\eta_j), \end{aligned} \quad (12)$$

где $\bar{\alpha}(\xi)$ — неубывающая характеристическая функция, причем $\bar{\alpha}(\xi) = \alpha(\xi) - \sum_{\eta_j < \xi} \sigma(\eta_j)$, $\alpha(\xi)$, $\sigma(\eta_j)$ — характеристические функции функционала $r(V)$; $\alpha(\xi)$ — реакция на «скачок»; $\sigma(\eta_j)$ — реакция на значение «в точ-

ках»; $\bar{a}(\xi_l)$, $\bar{a}_l(\xi_l)$, $\bar{a}_n(\xi_l)$ — значения характеристической функции в точках разрывов ξ_l , а также слева и справа; $a(\xi)$ — непрерывная часть функции; $V(\eta_l)$, $V_\Delta(\xi_l)$, $V_n(\xi_l)$ — значения функции в точках разрыва, а также слева и справа.

Интеграл в соотношении (12) понимается в смысле Стильтьеса. Поскольку в общем случае функционал $r(V)$ зависит от параметра x , приходим к выражению для линейного оператора:

$$r(V, x) = \int_a^b V(\xi) d\alpha(\xi, x) + \sum_{l=1}^{\infty} [V_n(\xi_l(x)) [\bar{a}_n(\xi_l(x)) - \bar{a}(\xi_l(x))] + \\ + V_\Delta(\xi_l(x)) [\bar{a}(\xi_l(x)) - \bar{a}_l(\xi_l(x))]] + \sum_{l=1}^{\infty} \sigma(\eta_l(x)) V(\eta_l(x)). \quad (13)$$

Исследуем реакцию оператора (13) на «точечную» функцию, предъявляемую при постоянном уровне яркости C :

$$V_l(\eta_l(x)) = C + \pi_l(x), \quad (14)$$

где $\pi_l(x) = 1$ при $x = l$,
0 при $x \neq l$.

Физически такой функции соответствует, например, белая узкая полоса на темном фоне, предъявляемая в различных местах поля зрения, скажем, путем перемещения вдоль оси абсцисс.

Аксиома 4. *Значение светлоты в произвольной точке наблюдения определяется лишь значением яркости в этой же точке и не зависит от положения «точечной» яркости в других точках поля зрения.*

Экспериментальная достоверность данной аксиомы очевидна. Зафиксируем точку наблюдения и будем двигать узкую полосу с отличной от фона яркостью в поле зрения. Тогда яркость в точке наблюдения изменится только при совпадении полосы с точкой наблюдения.

Для функций вида (14) $V_{l_n}(\eta_l(x)) = V_{l_n}(\eta_l(x)) = C$. При этом оператор (13) для функций (14) будет иметь вид

$$r(V_l, x) = C [a(b, x) - a(a, x)] + C \sum_{l=1}^{\infty} [\bar{a}_n(\xi_l(x)) - \bar{a}_n(\xi_l(x))] + \\ + \sum_{l=1}^{\infty} \sigma(\eta_l(x)) V_l(\eta_l(x)). \quad (15)$$

Первые два слагаемых не содержат переменной части функции (14) и образуют постоянную составляющую C_0 . В последнем слагаемом характеристические коэффициенты $\sigma(\eta_l(x))$ в соответствии с аксиомой 4 равны нулю во всех случаях, кроме $\eta_l(x) = x$. Следовательно,

$$\sum_{l=1}^{\infty} \sigma(\eta_l(x)) V(\eta_l(x)) = C \sum_{l=1}^{\infty} \sigma(\eta_l(x)) + \sigma(\eta_l(x)) \pi_l(x) = \sigma(x) V(x). \quad (16)$$

Для дальнейшей конкретизации вида линейного оператора привлечем свойство пространственной однородности.

Аксиома 5. *Распределение светлоты, характеризуемое функцией $S(x) = F[b(x)]$, не зависит от смещения координат носителя входной зрительной картины, т. е. для зрительной картины $b(x - \xi)$*

$$S(x - \xi) = F[b(x - \xi)] = F[V(x - \xi)], \quad (17)$$

где φ — произвольное вещественное число.

Достоверность этой аксиомы очевидна.

Пусть имеются две функции $V(x)$ и $V_1(x)$, отличающиеся лишь сдвигом по оси $V_1(x) = V(x - a)$. Тогда распределение светлот для них

будет относительно одинаковым; при этом $S[x+a, V(x-a)] = S[x, V(x)]$ и, кроме того, справедливо равенство

$$r[x+a, V(x-a)] = r[x, V(x)]. \quad (18)$$

Воспользуемся оператором (13) и с учетом (16) перепишем правую часть равенства (18) в развернутом виде:

$$\begin{aligned} r[x+a, V(x-a)] = & \int_a^b V(\xi-a) d\alpha(\xi, x+a) + \\ & + \sum_{l=1}^{\infty} |V_n(\xi_l(x+a)-a) [\bar{\alpha}_n(\xi_l(x+a)) - \bar{\alpha}(\xi_l(x+a))] + \\ & + V_n(\xi_l(x+a)-a) [\bar{\alpha}(\xi_l(x+a)) - \bar{\alpha}_n(\xi_l(x+a))]| + \\ & + \alpha(x+a) V(x+a-a). \end{aligned} \quad (19)$$

Равенство (18) должно выполняться для самых произвольных функций $V(x)$. На основании этого произведем почленное сравнение соотношений (13) и (19).

Предполагая, что всевозможные смещения не выводят функцию $V(x)$ за пределы интегрирования (a, b) , осуществим замену переменных в подынтегральном выражении соотношения (19) и сравним интегралы

$$\int_a^b V(\xi) d\alpha(\xi+a, x+a) = \int_a^b V(\xi) d\alpha(\xi, x). \quad (20)$$

Экспериментальные исследования ядра оператора краевого контраста показали, что оно дифференцируемо, а его производная непрерывна. На основании этого в равенстве (20) можно перейти к интегралам Римана и, руководствуясь основной леммой вариационного исчисления, записать равенство для ядер $\alpha(\xi+a, x+a) = \alpha(\xi, x)$.

Полагая $a = -\xi$, получим

$$\alpha(\xi, x) = \alpha(x-\xi). \quad (21)$$

Коэффициент под знаком суммы в (19) в общем случае можно рассматривать как базис со счетным множеством векторов, на основании чего осуществляется почленное сравнение слагаемых сумм в соотношениях (13) и (19). Из сравнения коэффициентов следуют функциональные равенства

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_n(\xi_l(x)) &= \bar{\alpha}_n(\xi_l(x+a)); \\ \bar{\alpha}(\xi_l(x)) &= \bar{\alpha}(\xi_l(x+a)); \\ \bar{\alpha}_n(\xi_l(x)) &= \bar{\alpha}_n(\xi_l(x+a)). \end{aligned} \quad (22)$$

Эти соотношения могут выполняться только при $\xi_l(x) = \text{const}$, но тогда и $\xi_l(x+a) - a$ также будет постоянной величиной, что невозможно, так как величина смещения произвольна. Таким образом, функции $\bar{\alpha}_n(\xi_l(x))$, $\bar{\alpha}_n(\xi_l(x))$, $\bar{\alpha}(\xi_l(x))$ должны быть тождественно равны нулю.

Наконец, сравнение третьих слагаемых операторов (13) и (19) $\alpha(x) V(x) = \alpha(x+a) V(x)$ позволяет заключить, что $\alpha(x) = \text{const}$.

Тогда преобразование во втором блоке модели будет иметь вид

$$r(x, V) = CV(x) + \int_a^b V(\xi) d\alpha(x-\xi). \quad (23)$$

Естественно ожидать, что для двумерных зрительных картин

$$r(x, y, V) = CV(x, y) + \iint_D V(\xi, \eta) d\alpha(x-\xi, y-\eta). \quad (24)$$

Математическая модель краевого контраста зрения представится в виде

$$S(x) = \varphi \left\{ Cf[b(x)] + \int_a^b f[b(\xi)] d\alpha(x-\xi) \right\}. \quad (25)$$

Эксперименты, проведенные на диске Максвелла в одномерном варианте, подтвердили достоверность модели в виде (25) для скачкообразных входных сигналов в диапазоне изменения скачков до 7—10%.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. Kovacszy, H. Joseph. Image processings. Proc. IRE, 5/6 (1955).
2. Тр. Ин-та инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. Спец. выпуск по устранению избыточности, 55, 3 (1967).
3. Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, В. Я. Сердюченко. К вопросу моделирования явления краевого контраста. Сб. «Проблемы бионики», вып. 2. Изд-во Харьковск. ун-та, 1969.
4. В. В. Мешков. Основы светотехники, ч. II. Физиологическая оптика и колориметрия. Госэнергиздат, 1961.
5. Функциональный анализ. Справочная математическая библиотека. Под ред. Виленкина. Физматгиз, 1961.
6. Л. А. Люстерник, В. И. Соболев. Элементы функционального анализа. Физматгиз, 1951.
7. А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. О представлении линейных функционалов в классе разрывных функций. Докл. АН СССР, 122, 2 (1958).

К АНАЛИЗУ ИЗОБРАЖЕНИЙ НЕИРОПОДОБНЫМИ СТРУКТУРАМИ

С. Ф. Марченко, В. Г. Червов

Изображение, находящееся в поле зрения, вносят неоднородность в значения наблюдаемых или измеряемых физических величин в каждой точке поля. Среди этих величин важное значение имеют цвет отражаемого излучения, его интенсивность и данные о положении точек изображения в поле зрения. В каждом конкретном случае любая точка поля зрения характеризуется всеми свойствами того участка изображения, к которому она принадлежит, — величиной яркости, цветом, формой контурной линии и другими, а в более общем случае и изменением этих характеристик во времени. Под признаком изображения будем понимать значение наблюдаемой или измеряемой физической величины. Связную совокупность точек с однородными признаками или (в общем случае) эквивалентных друг другу в каких-либо отношениях естественно считать элементом изображения. Предположим, что у нас есть прибор, измеряющий величину яркости излучения в каждой точке поля зрения. Если по окончании измерений все результаты окажутся эквивалентными друг другу, то это свидетельствует об отсутствии изображения в поле зрения. Если же эти результаты можно разделить хотя бы на два класса (например, точки с нулевыми значениями яркости и значениями выше некоторого порогового), то это подтверждает наличие изображения. Пусть далее имеется прибор, измеряющий положение каждой точки изображения в выбранной системе координат или по отношению к границам поля зрения. Результаты этих измерений позволяют обнаружить отношения между точками, определяющие те или иные элементы изображения или его характеристики в целом. Например, если все точки с одинаковой яркостью принадлежат связной области, то в поле зрения имеется только одно изображение и т. д.

Задача анализа изображений, заключающаяся в разработке методов выделения элементов изображения и средств их реализации, в тех-

нике решается разнообразными способами и с различными целями. В основе ее решения лежит выделение элементов изображения.

В данном сообщении рассматривается возможность использования нейроподобных элементов и биологических принципов переработки сигналов для анализа изображений.

Из физиологии зрительного анализатора известно, что рецепторы сетчатки формируют импульсные ответы только при изменении входного воздействия во времени и пространстве. Эти операции, по-видимому, уменьшают избыточность входного сигнала [1]. Нейроны, реагирующие на изменение сигнала, обнаружены на всех уровнях организации нервной системы от ее рецепторных отделов до корковых [2, 3]. Они изучены в различных аспектах, однако организация нервных центров, перерабатывающих сложную информацию, до сих пор, по существу, остается неизвестной. Поэтому представляет интерес изучение возможностей переработки информации такими сетями, организация которых хотя бы учитывает уже известные принципы связей между нейронами — иерархичность структуры, конвергенцию, дивергенцию и др.

Для этой цели вполне удовлетворителен формальный подход к описанию информационных свойств нейронов. Такое описание можно получить, анализируя форму переходного процесса при воздействии адекватного раздражителя на нейрон. Так как в дальнейшем будут использованы пороговые свойства нейронов и адаптация, т. е. прекращение возбуждения на неизменный сигнал, то для получения описания используем характеристики реакции на ступенчатое воздействие раздражителя [4]. Такой переходный процесс свойственен реальному дифференцирующему звену, описываемому передаточной функцией вида $W(p) =$

$= \frac{Kp}{Tp+1}$. В области низких частот амплитудные и частотные характеристики этого элемента и дифференцирующего звена совпадают. Поэтому для упрощения последующих операций и получения наглядных выводов в дальнейшем нейроподобный элемент будем считать чисто дифференцирующим с передаточной функцией $W(p) = Kp$. Выходная величина нейроподобного элемента в этом случае пропорциональна производной от входной.

Пороговые свойства нейрона для одинаковых значений веса на каждом входе и без учета накопительных свойств можно описать по аналогии с [5] уравнением

$$y(t) = \text{sign} \left[\sum_1^n x_i(t) - m_j \right],$$

где $y(t)$ — состояние выхода в момент времени t ;

$x_i(t)$ — состояние i -го входа в момент времени t ;

m_j — величина порога для данного нейрона j .

Функция $\text{sign } z$ определяется следующим образом:

$$\text{sign } z = \begin{cases} -1 & \text{при } z < 0. \\ 1 & \text{при } z > 0. \end{cases}$$

Такой нейрон реализует логические функции для пространственно-временных сигналов, поступающих на его вход.

Пусть анализатор или его рецепторный орган обладают возможностью изменять совокупность своих параметров в каждой точке изображения в соответствии с характеристиками измеряемых физических величин. Закон движения рецепторного органа, или фиксации внимания от точки к точке поля зрения, может быть задан или определяется каждый раз характером исследуемого изображения. Измерение состояний

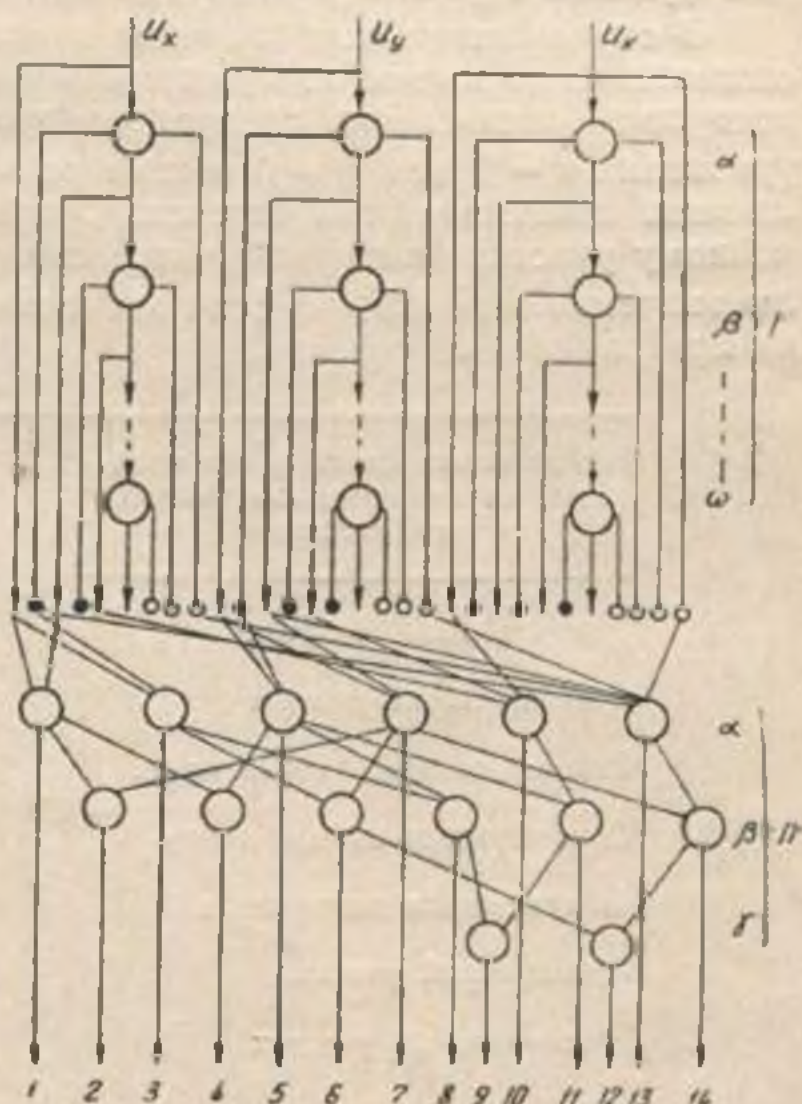
наблюдаемых физических величин может быть как последовательным во времени, так и одновременным, т. е. параллельным. Для определенности будем рассматривать последовательный вариант.

С целью обработки результатов измерений будем использовать нейроподобные элементы, образующие некоторые сети, имеющие вход и выход. Каждый элемент сети может иметь связь с ее выходом, а также со входом хотя бы одного из ее элементов. Такие требования не противоречат известным результатам физиологических исследований об организации нейронов в анализаторах.

Рассмотрим простейшую сеть (рисунок) из нейроподобных элементов, описанных выше, и ее возможности анализировать сигналы от рецепторного органа. На первом уровне (слои $\alpha, \beta, \dots, \omega$) осуществляется аналоговая обработка сигналов. Стрелками обозначены возбуждающие выходы, сплошными кружочками — тормозящие, а пустыми — нулевые значения выходов. На втором уровне (слои $\alpha, \beta, \gamma, \dots$) осуществляется дискретная обработка сигналов.

Будем считать, что помехи отсутствуют. Для определенности проанализируем сигналы односвязных контурных изображений, получаемых в ходе движения рецепторного органа по границе изображения в одном направлении. При этом положению каждой точки контурного изображения соответствует некоторое состояние параметров анализатора. Кроме положения, которое полностью определяется координатами в выбранной системе, в каждой точке могут оцениваться параметры, характеризующие текущий участок контурной линии, — кривизна, наклон и т. п.

Пусть на выходы U_x , U_y и U_k поступают сигналы x , y , k , соответствующие положению точки линии по отношению к осям ординат и абсцисс в прямоугольной декартовой системе координат и кривизне линии. Если положения точек на некотором участке линии характеризуются соотношениями $x \neq 0$ и $y \neq 0$, а $\dot{x} = 0$ или $\dot{y} = 0$, то это свидетельствует о принадлежности точек к вертикальным или горизонтальным участкам линии. Если $x \neq 0$ и $y \neq 0$, то информационным параметром становится и их знак $\text{sign } x$ и $\text{sign } y$. Если слежение происходит в одном направлении, например, против часовой стрелки, положительный знак функции $\text{sign } x$ (условие 1) свидетельствует о положении точки внизу на рассматриваемой части фигуры, а отрицательный (условие 2) — о положении сверху. Положительный знак функции $\text{sign } y$ (условие 3) говорит о положении точки справа на рассматриваемой части фигуры, а отрицательный (условие 4) — о положении слева. Одно-



временное выполнение некоторых их перечисленных выше условий является признаком более точного положения наблюдаемой точки на рассматриваемой части фигуры. Так, выполнение условий 2 и 3 свидетельствует о положении вверху справа (северо-восток), 2 и 4 — вверху слева (северо-запад), 1 и 4 — внизу слева (юго-запад), 1 и 3 — внизу справа (юго-восток). Оценка положения наблюдаемой точки возможна также при использовании в качестве логических переменных значений функций $\text{sign } x$, $\text{sign } x$, $\text{sign } y$, $\text{sign } y$.

В случае ненулевых значений x или y и нулевых значений $\dot{x}$ или $\dot{y}$ соответственно имеем точку, принадлежащую прямолинейному отрезку контурной линии. Это следует из того, что для дифференциальных уравнений $\dot{x} = 0$ или $\dot{y} = 0$ общим решением является функция, описывающая прямолинейный отрезок. О принадлежности точки к прямолинейному участку контурной линии свидетельствует также равенство нулю значений величины k . Если значения x , y или k не равны нулю, имеем криволинейный участок.

Тип элемента линии и его положение на наблюдаемом участке изображения	Код элемента
Прямолинейный участок	$\dot{x}_n \wedge \dot{x}_0 \vee \dot{y}_n \wedge \dot{y}_0 \vee \kappa_0$
Криволинейный участок	$\ddot{x}_n \vee \ddot{y}_n \vee \kappa_n$
Наличие концевой точки линии	$\dot{x}_n \wedge \dot{x}_T \wedge \dot{x}_0 \vee \dot{y}_n \wedge \dot{y}_T \wedge \dot{y}_0$
Наличие точки излома линии	$\dot{x}_l \wedge \dot{x}_j \vee \dot{y}_l \wedge \dot{y}_j$
Наличие точки сопряжения	$\kappa_l \wedge \kappa_j$
Вертикальный участок	$x_n \wedge \dot{x}_0 \wedge y_n$
Горизонтальный участок	$x_n \wedge y_n \wedge \dot{y}_0$
Внизу	$x_n \wedge \dot{x}_n$
Вверху	$\dot{x}_T \wedge x_n$
Справа	$y_n \wedge \dot{y}_n$
Слева	$y_n \wedge \dot{y}_T$
Вверху справа (северо-восток)	$\dot{x}_T \wedge x_n$
Вверху слева (северо-запад)	$\dot{x}_T \wedge \dot{y}_T$
Внизу слева (юго-запад)	$\dot{x}_n \wedge \dot{y}_T$
Внизу справа (юго-восток)	$\dot{x}_n \wedge y_n$

Точка, в которой $x \neq 0$ и $\dot{x} = 0$ или $y \neq 0$ и $\dot{y} = 0$, а значения функций $\text{sign } x$ и $\text{sign } y$ изменяются, принадлежит концу прямолинейного отрезка. Абсолютное значение величин x или y пропорционально величине угла наклона прямолинейного отрезка или касательной к криволинейному отрезку в данной точке. Если множество точек, характеризуемых величинами $|x|$ или $|y|$, можно разделить хотя бы на две связанные совокупности с различными значениями этих величин, то это мно-

жество принадлежит участку линии, имеющему по меньшей мере два прямолинейных участка с различным наклоном и общей точкой излома. Аналогично этому, если множество точек, характеризующихся ненулевыми значениями величины k , можно разделить на несколько связных совокупностей с различными значениями k , то это множество точек принадлежит такому же количеству дуг различных окружностей и имеет точки сопряжения. Подобным образом можно определить точки излома и сопряжения между различными типами участков контурной линии. Анализируя выходы лежащих выше слоев нейроподобных элементов, получаем более точные значения параметров криволинейных участков, что позволяет разбить контурную линию на структурные элементы с более тонкими характеристиками.

Все операции структурного анализа осуществляются в реальном масштабе времени на описанных выше нейроподобных элементах. Логические операции выполняются нейроподобными элементами с пороговыми свойствами. Эта часть сети не показана полностью из-за нецелесообразности усложнения рисунка. Выше рассматривались свойства, используемые обычно человеком при анализе изображений, однако сеть дает возможность получать и другие свойства с теми же логическими переменными. Рассматривавшиеся свойства изображений и операций по их определению сведены в таблице, где индексами В и Т соответственно обозначены возбуждающий и тормозящий выходы; 0 — нулевой выход при отсутствии возбуждения нейроподобного элемента.

Изложенный выше метод анализа, а также использование других свойств нейронов делают возможным описание изображения или другого континуального сигнала с любой требуемой точностью. Такое описание содержит признаки, адекватные как условиям задач распознавания, так и другим информационным целям.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Д. Глезер. Механизмы опознания зрительных образов. Изд-во «Наука», 1966.
2. Исследование принципов переработки информации в зрительной системе. Изд-во «Наука», 1970.
3. Сб. «Теория связи в сенсорных системах». Изд-во «Мир», 1964.
4. А. Л. Бызов. Электрофизиологическое исследование сетчатки. Изд-во «Наука», 1966, стр. 52, рис. 20.
5. В. П. Сочинко. Электронные модели нейронов. Изд-во «Энергия», 1965.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГРОМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В СЛУХЕ

Г. С. Еремин, Г. Ф. Дюбко

Громкость звукового сигнала зависит от многих физических параметров. Так как каждый сигнал однозначно характеризуется амплитудно- и фазочастотным спектрами, с точки зрения моделирования процессов переработки информации в слуховой системе человека важно выяснить роль фазовых спектров в формировании громкости сложных звуковых сигналов.

Большинство исследователей отмечает, что в случае сигналов с дискретными спектрами фазовые соотношения влияют на тембр и реж — на высоту основного тона [1, 2]. Известны случаи, когда испытуемые наблюдали колебания громкости при периодических изменениях фазы одного из тонов в некоторых консонирующих интервалах [3, 4].

Отмечалось даже уменьшение громкости при добавлении к чистому синусоидальному тону верхней гармоники с определенным фазовым углом [5]. Однако более поздние исследования, проведенные Баухом [6] на амплитудно-модулированных сигналах, показали, что при сдвиге фазы не-сушей на 90° громкость не изменяется, если расстояние по частоте между соседними гармониками превышает 10 гц.

В настоящем сообщении рассматривается влияние фазовых соотношений на громкость в некоторых консонирующих интервалах. Кроме того, исследовались более сложные звуковые сигналы — созвучия из пяти равногромких синусоидальных тонов. Для некоторого класса сигналов предлагается математическая модель независимости громкости от фазовых спектров.

Экспериментальные исследования

Опыты проводились с помощью установки, блок-схема которой приведена на рис. 1. Два звуковых сигнала, отличавшиеся только фазовыми спектрами, формировались идентичными генераторами Γ_1 и Γ_2 . В схеме использовались генераторы напряжений сложной формы Г6-1 (ГСН).

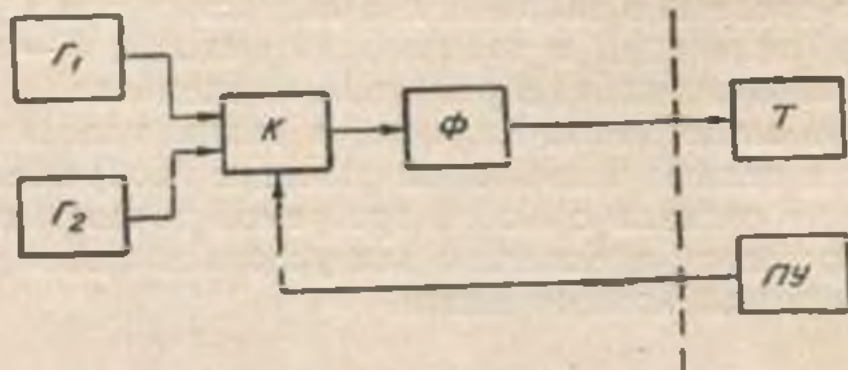


Рис. 1.

дающие возможность получать сигналы, в спектре которых содержится до шести гармонических составляющих. Генераторы допускают регулировку амплитуды и фазы каждой гармоники. Выходы генераторов заведены на электронный коммутатор К. Из коммутатора по запускающему импульсу из пульта управления ПУ оба сигнала последовательно в виде коротких импульсов (звуковая посылка) подаются на телефон испытуемого Т.

Резкое включение и выключение сигналов сопровождается неприятными щелчками в телефоне, что сильно затрудняет проведение экспериментов. Для ликвидации щелчков в схему включен формирователь фронтов Ф, с помощью которого осуществлялось замедленное нарастание и спад звуковых импульсов.

Испытуемый, находясь в звукоизолированном помещении, прослушивал сигналы моноаурально и, имея доступ к пульта управления, мог не только подавать запускающий импульс в коммутатор, но и менять очередность звуковых сигналов в посылке.

Временные соотношения в звуковой посылке (рис. 2) выбирались следующим образом. Длительность сигналов t_{c1} и t_{c2} , с одной стороны, должна быть достаточно продолжительной, чтобы закончились временные процессы громкостной суммации. С другой стороны, нельзя допускать влияния слуховой адаптации. С учетом этого было принято $t_{c1} = t_{c2} = 0,3 \text{ сек.}$

Продолжительность паузы t_p между сигналами ограничена снизу маскировкой второго сигнала первым (остаточная маскировка),

а сверху — временем переходного процесса механизмов памяти. В экспериментах принималось $t_n = 0,4$ сек. Длительность фронтов составляла 0,01 сек и подбиралась опытным путем.

Таким образом, продолжительность одной звуковой посылки $t_{\Sigma} = 2t_{c1} + t_n = 1$ сек.

В опытах участвовал один испытуемый с нормальным слухом. Методика проведения экспериментов следующая. От испытуемого требовалось сравнение сигналов в звуковой посылке по громкости. При

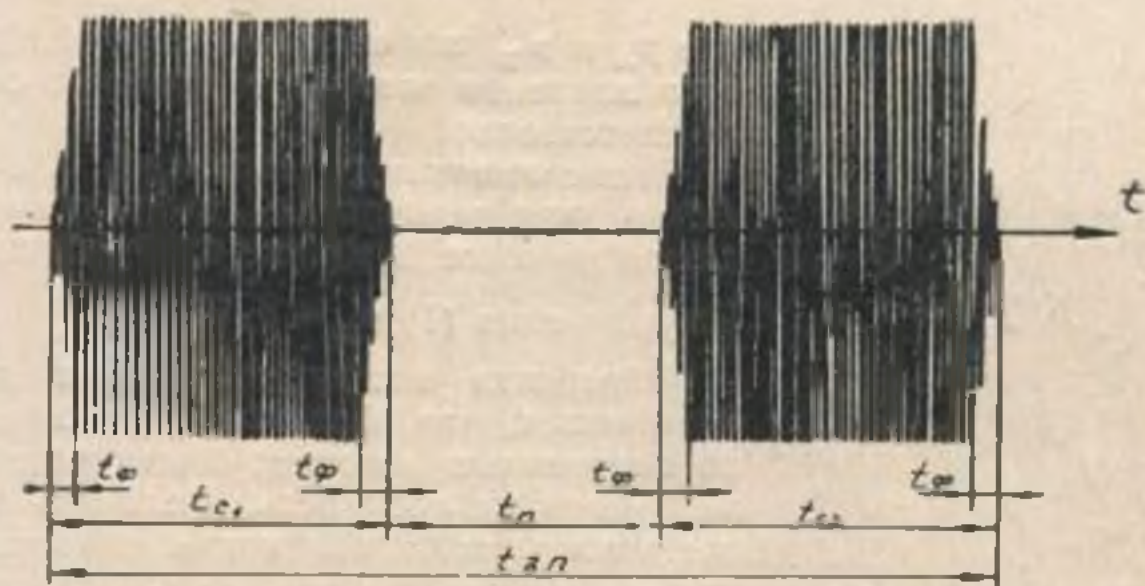


Рис. 2.

этом сознание человека использовалось в качестве нуль-прибора: экспериментатор получал только ответы «да» и «нет», т. е. равны или не равны громкости. Перед произнесением определенного ответа испытуемый прослушивал необходимое с его точки зрения число звуковых посылок, периодически меняя очередность сигналов в посылке.

Подравнивание осуществлялось методом констант [7]. Один из сигналов считался эталонным, и его интенсивность в ходе эксперимента поддерживалась постоянной. Первоначально путем проб находилось приблизительное значение интенсивности второго (пробного) сигнала, ощущаемого как равногромкий эталонному. Вокруг найденной точки выбиралось семь значений, каждое из которых предъявлялось испытуемому в случайном порядке десять раз в паре с эталоном. Затем строилась психометрическая функция: зависимость частоты ответов «да» от интенсивности пробного сигнала. Искомым считалось то значение, при котором психометрическая функция имеет максимум.

В экспериментах брались созвучия двух равногромких тонов f_1 и f_2 , рассматривались консонирующие интервалы 2:3, 1:3 и 1:3. Эталонный сигнал (назовем его А) имел нулевой фазовый спектр ($\varphi_1 = \varphi_2 = 0$). Сигнал Б (пробный) отличался начальным фазовым углом второй гармоники φ_2 . В интервалах 2:3 и 1:2 $\varphi_2 = 90^\circ$, а в интервале 1:3 $\varphi_2 = 180^\circ$.

Согласно принятой в настоящее время гипотезе, влияние фазовых спектров на слуховые ощущения связывается с изменениями в форме волны звуковых сигналов [2]. На рис. 3 приведены осциллограммы напряжения на телефоне, по которым можно судить о форме волны вышеуказанных сигналов при изменении фазовых соотношений. В осциллограммах амплитуды спектральных составляющих одинаковы.

Опыты проводились при двух уровнях громкости эталонного сигнала.

ла L_A : 50 фон и 80 фон. В одной серии экспериментов частота низкого тона f_1 равнялась 200 гц, в другой — 800 гц.

Результаты опытов сведены в табл. 1. Здесь ответы испытуемого «да» и «нет» закодированы соответственно «1» и «0». В четвертом столбце таблицы откладывалась разность уровней звукового давления эталонного и пробного сигналов. Эта величина определяется по формуле

$$\Delta N = 20 \lg \frac{p_A}{p_B} \cdot \partial \delta, \quad (1)$$

где p_A и p_B — эффективные значения звукового давления эталона и пробного сигнала соответственно.

Экспериментатор, задаваясь значением ΔN и зная величину p_A , вычислял необходимое звуковое давление пробного сигнала.

Из уравнения (1) $p_B = p_A 10^{-\frac{\Delta N}{20}}$.

Обработка экспериментальных данных показывает, что фазовые соотношения в рассмотренных консонирующих интервалах не влияют на громкость. Величина ΔN не превышает $\pm 0,5 \partial \delta$, когда эталонный и пробный сигнал ощущались испытуемым как равногромкие.

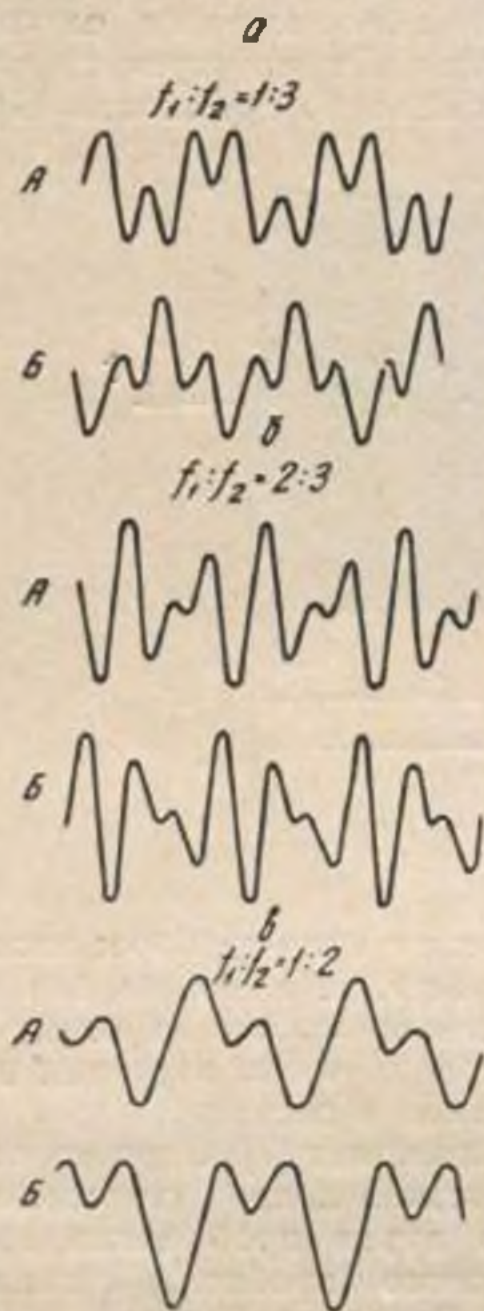


Рис. 3.

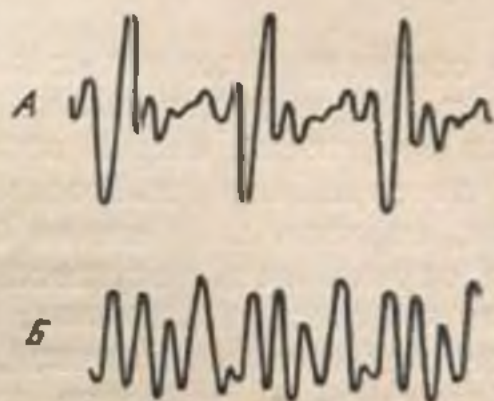


Рис. 4.

Аналогичные опыты проводились с более сложными звуками. Испытуемый сравнивал по громкости сигналы, в спектре которых содержалось пять равногромких тонов с частотами 300; 600; 900; 1200 и 1500 гц. Спектральные составляющие эталонного звука имели одинаковые начальные фазовые углы $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4 = \varphi_5 = 0$. Для пробного сигнала фазовые соотношения были следующими: $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = 80^\circ$, $\varphi_3 = 180^\circ$, $\varphi_4 = 30^\circ$, $\varphi_5 = 0$. При таких звуковых сигналах осциллограммы напряжений на телефоне резко отличаются (рис. 4).

Эксперименты проводились также на двух уровнях громкости эталонного сигнала — 50 и 80 фон. Из табл. 2, в которой сведены результаты опытов, следует, что частота ответов «да» максимальна при равенстве интенсивностей эталона и пробного сигнала.

Таким образом, фазовые спектры рассмотренных сигналов не участвуют в громкостных преобразованиях. Очевидно, периодические изменения слуховых ощущений при прослушивании расстроенных консонансов

Таблица 1

[illegible]

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
2:3	800	50	+3	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0
			+2	0 0 0 0 1 0 0 1 1 0	0,3
			+1	1 1 1 1 1 0 1 1 1 1	0,9
			0	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0	0,9
			-1	0 0 1 1 0 0 1 1 0 1	0,5
			-2	0 0 0 0 0 0 1 0 0 0	0,1
			-3	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0
		80	+3	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0
			+2	0 0 0 0 1 0 0 1 0 0	0,3
			+1	0 0 1 1 0 0 0 1 0 0	0,7
			0	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	1,0
			-1	0 1 0 1 1 1 0 0 0 0	0,4
			-2	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0
			-3	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0,1
1:2	200	50	+3	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0
			+2	0 0 0 1 0 0 0 0 0 0	0,1
			+1	1 0 0 1 1 0 0 0 1 0	0,4
			0	1 1 1 1 1 1 1 1 0 1	0,9
			-1	1 1 0 0 1 0 0 0 0 0	0,3
			-2	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0
			-3	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0
		80	+3	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0
			+2	0 0 0 1 0 0 1 0 0 0	0,2
			+1	0 0 1 1 0 0 0 1 1 0	0,4
			0	1 1 1 0 0 1 1 1 1 1	0,8
			-1	0 0 0 0 1 1 1 0 1 1	0,5
			-2	0 0 0 0 1 0 0 0 0 0	0,1
			-3	0 0 0 0 0 0 1 0 0 0	0,1
	800	50	+3	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0
			+2	0 0 1 1 0 0 0 0 0 0	0,2
			+1	1 1 1 0 0 0 1 0 0 1	0,5
			0	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	1,0
			-1	0 0 1 1 1 0 1 1 0 0	0,5
			-2	0 0 0 0 0 0 1 0 0 0	0,1
			-3	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0
		80	+3	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0
			+2	0 0 1 1 0 1 0 0 0 0	0,3
			+1	0 1 1 1 1 0 1 0 1 0	0,6
			0	1 0 0 1 1 1 1 1 1 1	0,8
			-1	1 0 0 0 0 1 1 0 0 0	0,3
			-2	0 0 0 0 1 0 0 0 1 0	0,2
			-3	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0

На основании проведенных экспериментов, а также руководствуясь положениями работы Бауха [6], сделаем вывод, что в случае звуковых сигналов с дискретным спектром фазовые соотношения не влияют на громкость, если расстояние по частоте между соседними гармониками в спектре более 10 гц. Такие сигналы с точки зрения громкости однозначно характеризуются амплитудно-частотными спектрами.

Таблица 2

L_A , фон	ΔN , дБ	Номер опыта										Частота ответов «за»
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
50	+3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	+2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,1
	+1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0,4
	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0,9
	-1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0,5
	-2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0,3
	-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	+3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	+2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0,2
	+1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0,6
	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0,8
	-1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0,7
	-2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,1
	-3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,1

Математическая модель

Введем следующие обозначения: G — оператор громкости; $p(t)$ — звуковой сигнал с дискретным спектром; $X = (X^{(1)}, \dots, X^{(n)})$ — n -мерный вектор, каждая координата которого $X^{(i)}$ определяется амплитудой i -й гармоники в спектре сигнала $p(t)$.

При аксиоматическом построении математических моделей какого-либо явления предварительно формулируются экспериментальные постулаты (аксиомы), из которых логически выводится модель.

Сформулируем явление независимости громкости звуковых сигналов от фазовых спектров в виде следующей аксиомы.

Если для двух сигналов $p_1(t)$ и $p_2(t)$ совпадают все $X^{(i)}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), то $G(p_1(t)) = G(p_2(t))$.

Пусть M — множество сигналов, для которых справедлива аксиома. Тогда из аксиомы следует математическая модель

$$G = G(p(t)) = f(X) \quad (p(t) \in M), \quad (2)$$

где f — однозначное преобразование.

Модель (2) и аксиома с очевидностью эквивалентны друг другу.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Plomp. Heats of Mistuned Consonances. JASA, 42, 462 (1967).
2. R. Plomp, H. J. Steeneken. Effects of Phase on the Timbre of Complex Tones. JASA, 46, 409 (1969).
3. A. de Morgan. On the Beats of Imperfect Consonances. Trans. Cambridge Phil. Soc., 10, 129 (1864).
4. W. Beasley. Differential Responses to Cyclic Phase Variations in Compound Sounds. Journ. Gen. Psychol., 5, 329 (1931).
5. E. K. Chapin, F. A. Firestone. The Influence of Phase on the Tone Quality and Loudness; the Interference of Subjective Harmonics. JASA, 5, 173 (1934).
6. H. von Baum. Die Bedeutung der Frequenzgruppe für die Lautheit von Klängen. Acustica, 6, 40 (1956).
7. А. Пьерон. Психофизика. Сб. «Экспериментальная психология», под ред. П. Фресс и Ж. Пиаже. Изд-во «Прогресс», 1966.

ПСИХОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ НОРМАЛИЗАЦИИ ЧЕЛОВЕКОМ ЗРИТЕЛЬНЫХ КАРТИН*

*Е. П. Путятин, И. В. Шульгин, Б. К. Лопатченко,
В. П. Юрченко*

Повседневная практика подтвердила одно из важных свойств зрительного образа — его инвариантность. Человек узнает предметы независимо от преобразований, которым эти предметы подвергались, — изменений масштаба и освещенности, поворота, сдвига и т. д. Очевидно, на выходе зрительной системы происходит нормализация зрительных образов, т. е. вырабатываются сигналы, инвариантные указанным преобразованиям зрительной картины на входе. В ряде исследований [1, 2] путем использования тахистоскопических методов предъявления зрительных картин и установления зависимости времени опознавания от числа предъявляемых картин подтверждены выводы об инвариантности зрительных образов. Было высказано мнение, что это свойство у человека врожденное, но может также вырабатываться и в процессе обучения [1, 3], причем в эволюционном ряду человек обладает наивысшей способностью к инвариантным преобразованиям [4].

Как показано в работах [5, 6], частные виды операторов, удовлетворяющие необходимым и достаточным условиям аксиоматики нормализации зрительных картин, с точностью до взаимно-однозначного соответствия характеризуют работу зрительной системы человека по нормализации образов.

Особый интерес представляет количественная оценка действия операторов нормализации, в частности, вопрос о минимальных границах их действия, т. е. установлении порогов нормализации зрительных картин. С этой целью были проведены психофизические эксперименты установления порогов классификации человеком зрительных картин, подвергнутых ряду аффинных преобразований — изменению масштаба, сдвигу и повороту.

Методика экспериментов

Психофизические эксперименты проводились на основании нуля-метода в соответствии с принятой нами аксиоматикой [5, 6], характеризующей работу зрительной системы человека по нормализации зрительных образов.

Испытуемому последовательно предъявлялись эталонная и контрольная зрительные картины. Контрольная по отношению к эталонной подвергалась одному из аффинных преобразований — изменению масштаба, сдвигу или повороту (испытуемый знал, какому преобразованию подвергается картина). Задачей испытуемого было отвечать «да», если картины отличались только указанным преобразованием, и «нет», если замечены дополнительные отличия. Последними выбирались также аффинные преобразования, которые можно было оценить количественно. При этом производилась оценка порогов нормализации, т. е. тех минимальных различий в масштабе, сдвиге или повороте картин, начиная с которых человек уверенно относит картины, отличающиеся указанными аффинными признаками, к одному классу.

* Статья является продолжением работы: Е. П. Путятин, И. В. Шульгин, В. П. Юрченко, О. М. Абрамов. К вопросу о моделировании механизмов нормализации зрительных образов. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5. Изд-во Харьковск. ун-та, 1970.

Оценка порогов нормализации в этих экспериментах, как следует из изложенной методики, осуществлялась с учетом действия одного из механизмов нормализации.

Для сравнения в другой серии опытов производилась оценка порогов нормализации без введения дополнительных отличий между картинками. При этом испытуемому предъявлялись картины, отличающиеся лишь масштабом, сдвигом или поворотом. Местоположение и точка фиксации эталонной и контрольной зрительных картин устанавливались на прозрачном экране с подсветом строго одинаково при неподвижных голове и глазах испытуемого и определенных углах поля зрения. В целях избежания систематических ошибок последовательность предъявления зрительных картин, как и изменение стимула самой зрительной картины, выбирались случайным образом. Для определения влияния формы фигуры на порог классификации испытуемому предъявлялись картины различной конфигурации (фигура неправильной формы, треугольник, круг, прямая линия). Рассматривались черные фигуры на белом фоне. Необходимость выявить изменения порогов в поле зрения потребовала проведения экспериментов для каждой фигуры при различных углах поля зрения.

Специфика данных экспериментов состоит в том, что величина наблюдаемых значений X — прерывная случайная величина только с двумя возможными значениями: единица (при условии правильного ответа) и нуль (когда испытуемый отвечает неправильно или сомневается). В этом случае в качестве точечной оценки для неизвестной вероятности p события A принимается частота правильных ответов p^* события A в n независимых опытах. При этом дисперсия $D[p^*]$ является минимальной, а оценка p^* для p — эффективной [7]. Точность и надежность точечной оценки для вероятности p определялась доверительным интервалом $I_p [p_1; p_2]$.

Наиболее вероятным значением порога принималось то значение стимула, при котором наблюдалось одинаковое количество положительных и отрицательных реакций испытуемого, т. е. для $p^* = 0,5$. Оценкой надежности определения порога одним испытуемым служит дисперсия распределения порогов $D[p^*]$. При участии же в опытах нескольких испытуемых для доказательства того, что полученные нами значения являются наиболее вероятными, необходима проверка гипотез об однородности ряда дисперсий.

Незначимость расхождений между дисперсиями порогов у отдельных испытуемых дает возможность в наших экспериментах судить о пороге, присущем среднему гипотетическому наблюдателю, т. е. для $p_{\text{ср}}^*$. Для этого по известной методике вычисляется G_{max} — критерий расхождения дисперсий, который должен быть меньше $G_{\text{табл}}$ [8].

Эксперименты по классификации человеком масштабоподобных картин

В соответствии с изложенной выше методикой испытуемому предъявлялись картины, отличающиеся лишь масштабом. Эта разница выбиралась в пределах центральной части поля зрения. Если картины отличались только масштабом, испытуемый отвечал «да», если же у картин были дополнительные отличия, он отвечал «нет». Этими отличиями в одном случае являлся сдвиг картин, в другом — поворот.

Сдвиг масштабоподобных картин. Испытуемому предъявлялись сдвинутые одна относительно другой картины разных масштабов, причем точка фиксации эталонной и сдвинутой картин оставалась неиз-

менной. Для уточнения ответа «нет» испытуемый должен был определить, каким образом картины сдвинуты относительно друг друга.

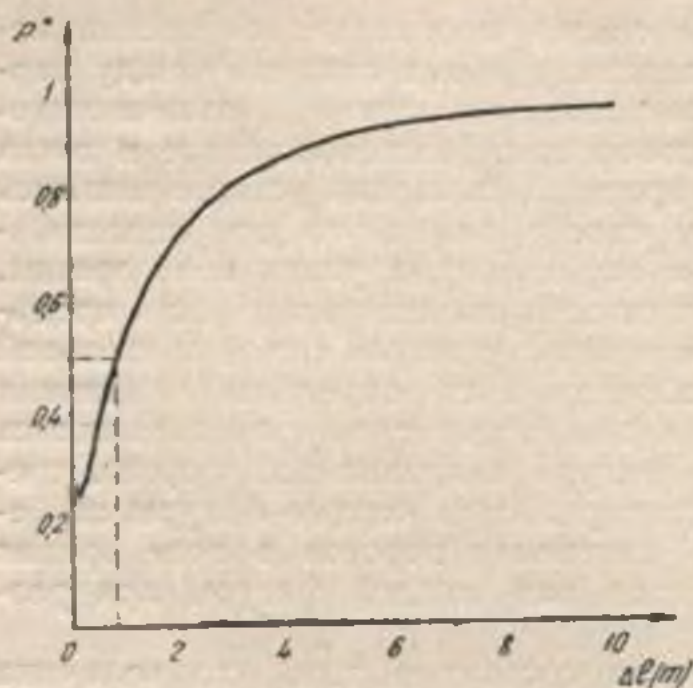


Рис. 1.

В этих экспериментах определялся порог нормализации сдвига картин при действии механизмов отстройки от масштаба $\Delta l_{(m)}$.

Табл. 1 составлена на основании экспериментальных данных для фигуры неправильной формы при угле поля зрения $\alpha = 8^\circ$. Величина $\Delta l_{(m)}$ в таблице обозначает сдвиг фигур относительно друг друга (в миллиметрах). Как видно из табл. 1, $G_{\max} = 0.360 < G_{\text{табл}} = 0.424$; иными словами, расхождение дисперсий незначимо.

На основании данных табл. 1 была построена интегральная кривая распределения вероятности (рис. 1), из которой видно, что в случае $p = 0.5$ порог классификации человеком сдвинутых зрительных картин $\Delta l_{(m)}$ составляет для вышеуказанных условий 0.8 мм. Доверительный интервал для $p = 0.5$ с доверительной вероятностью $\beta = 0.9$ составляет $\beta = (0.4; 0.61)$, т. е. значения порога, лежащие в этом интервале, совместимы с опытными данными (табл. 1, рис. 1). Для угла поля зрения $\alpha = 2^\circ$ был определен порог $\Delta l_{(m)} = 0.6$ мм, для $\alpha = 20^\circ$ соответственно $\Delta l_{(m)} = 1.2$ мм, т. е. с увеличением угла поля зрения порог классификации человеком сдвинутых картин возрастает.

Таблица 1

Испы- туемые	$\Delta l_{(m)}$		0		1		2		3		5		7		10	
	p^*	D	p^*	D	p^*	D	p^*	D	p^*	D	p^*	D	p^*	D	p^*	D
1	0.4	0.024	0.8	0.016	0.8	0.016	0.8	0.016	0.9	0.009	1	0	0.9	0.009	0.9	0.009
2	0.2	0.016	0.4	0.024	0.8	0.016	0.8	0.016	0.9	0.009	0.9	0.009	1	0	1	0
3	0.2	0.016	0.6	0.024	0.7	0.021	0.7	0.021	0.9	0.009	0.9	0.009	1	0	1	0
4	0.1	0.009	0.5	0.025	0.6	0.018	0.8	0.016	0.9	0.009	0.9	0.009	1	0	1	0
5	0.3	0.021	0.5	0.025	0.8	0.016	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
$p_{\text{ср}}^*$	0.24		0.56		0.74		0.82		0.92		0.94		0.98			
$G_{\max}$	0.280		0.36		0.242		0.306		0.252		0.336		—			

Поворот масштабоподобных картин. Он производился относительно точки фиксации. Для уточнения ответа «нет» испытуемый должен был определять, в какую сторону одна картина повернута относительно другой. На основании данных этих опытов определяем порог нормализации поворота зрительных образов при действии механизмов отстройки от масштаба $\Delta \varphi_{(m)}$. Экспериментальные данные для фигуры неправильной формы при угле поля зрения $\alpha = 8^\circ$ сведены в табл. 2, где $\Delta \varphi_{(m)}$

обозначает угол поворота эталонной и предъявляемой фигур (в градусах): $G_{\max} = 0,373 < G_{\text{табл}} = 0,4241$, т. е. расхождения дисперсий незначимы.

На основании данных табл. 2 построена интегральная кривая распределения вероятности (рис. 2), из которой видно, что для $p = 0,5$ порог классификации человеком повернутых картин составляет $\Delta\varphi_{(m)} = 1,8^\circ$. Для угла поля зрения $\alpha = 2^\circ$ аналогичным образом был определен порог $\Delta\varphi_{(m)} = 1,6^\circ$; соответственно для $\alpha = 20^\circ$ $\Delta\varphi_{(m)} = 2^\circ$ и для $\alpha = 30^\circ$ $\Delta\varphi_{(m)} = 3,5^\circ$. Таким образом, с увеличением угла поля зрения порог нормализации поворота также приобретает склонность к возрастанию.

Таблица 2

Испытуемые \ $\Delta\varphi_{(m)}$	0		1,5		3		6		10	
	p^*	D	p^*	D	p^*	D	p^*	D	p^*	D
1	0,2	0,016	0,3	0,021	0,8	0,016	0,9	0,009	1	0
2	0,3	0,021	0,8	0,016	0,7	0,021	0,9	0,009	1	0
3	0,1	0,009	0,5	0,025	0,7	0,021	1	0	1	0
4	0,3	0,021	0,3	0,021	0,5	0,025	0,9	0,009	1	0
5	0,1	0,009	0,1	0,009	0,9	0,009	0,8	0,016	1	0
$p_{\text{ср}}$	0,20		0,40		0,72		0,9		1	
$G_{\max}$	0,276		0,272		0,272		0,373		—	

Определение порогов классификации масштабоподобных картин. В этом случае опыты проводились без учета действия механизмов нормализации сдвига или поворота, а испытуемому предъявлялись картины только различного масштаба, причем каждая градация масштаба в течение опыта повторялась не менее 10 раз. Испытуемый должен был определить, равны ли эти картины либо какая из них больше.

На основании экспериментальных данных составлена табл. 3 для фигуры неправильной формы при угле поля зрения $\alpha = 8^\circ$, где Δm обозначает разницу в площадях предъявляемых фигур (в процентах).

Таблица 3

Испытуемые \ Δm	0		2		3		5		10		15	
	p^*	D	p^*	D	p^*	D	p^*	D	p^*	D	p^*	D
1	0,2	0,016	0,9	0,009	0,8	0,016	0,9	0,009	0,9	0,009	1	0
2	0,4	0,024	0,3	0,021	0,6	0,024	0,8	0,016	1	0	1	0
3	0,8	0,016	0,5	0,025	0,4	0,024	0,6	0,024	1	0	1	0
4	0,1	0,009	0,7	0,021	1	0	0,9	0,009	1	0	1	0
5	0,5	0,025	0,4	0,024	0,5	0,025	0,9	0,009	1	0	1	0
$p_{\text{ср}}$	0,4		0,56		0,66		0,82		0,98		—	
$G_{\max}$	0,278		0,250		0,285		0,358		—		—	

Для 5%-ного предела значимости при объеме выборок $n = 10$ и числе испытуемых $k = 5$ $G_{\max} = 0,358 < G_{\text{табл}} = 0,4241$, т. е. расхождение дисперсий незначимо.

На основании данных табл. 3 построена интегральная кривая распределения вероятности (рис. 3), из которой видно, что частота правильных ответов достигает 50% при $\Delta m = 1,3\%$, т. е. это является вероятным значением порога масштабной классификации человеком зрительных картин.

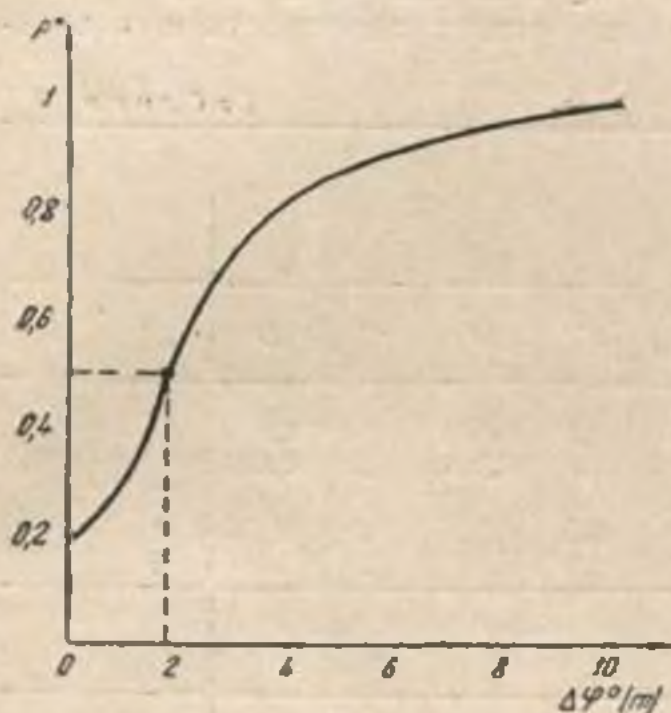


Рис. 2.

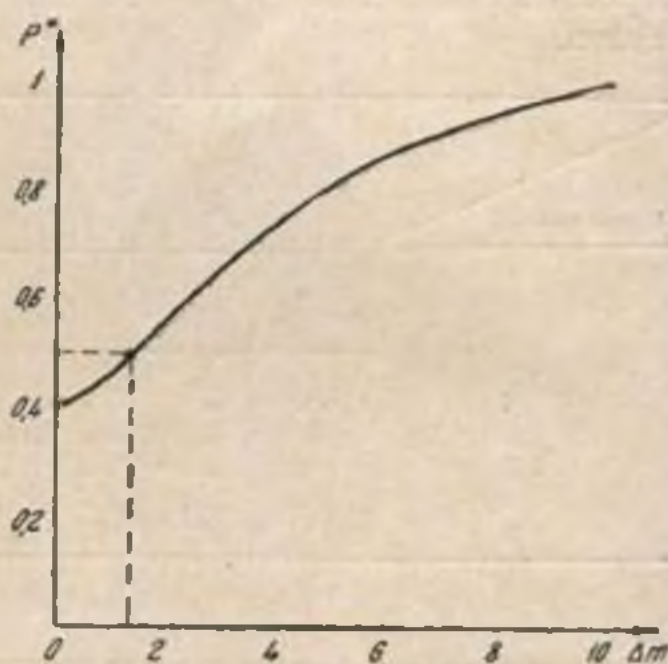


Рис. 3.

Для той же фигуры в аналогичных условиях, но при угле поля зрения $\alpha = 20^\circ$ порог масштабной нормализации Δm составил 1,7%, т. е. с увеличением угла поля зрения наблюдалась тенденция к возрастанию порога масштабной нормализации.

Эксперименты по классификации сдвинутых картин

Испытуемому предъявлялись одинаковые, но сдвинутые одна относительно другой на плоскости в произвольном направлении и в пределах ясного поля видения картины. Если последние отличались только сдвигом, испытуемый относил их к одному классу, т. е. отвечал «да»; если картины отличались дополнительными признаками, он относил их к другому классу, т. е. отвечал «нет». Отличиями в одном случае выбиралось изменение масштаба, в другом — поворот картин.

Изменение масштаба сдвинутых картин. Испытуемому предъявлялись сдвинутые картины различных масштабов. Для уточнения ответа «нет» испытуемый должен был определить, одинаковы ли предъявляемые картины, если же он находил их разными — то какая из двух больше.

На основании этих экспериментов определялся порог масштабной нормализации картин при действии механизмов отстройки от сдвига $\Delta m_{(0)}$. После обработки экспериментальных данных аналогичным образом были получены следующие значения порога $\Delta m_{(0)}$: для угла поля зрения $\alpha = 8^\circ$ $\Delta m_{(0)} = 1,35\%$; для угла поля зрения $\alpha = 20^\circ$ $\Delta m_{(0)} = 1,75\%$.

Поворот сдвинутых картин. Сдвинутые картины поворачивались одна относительно другой вокруг точки фиксации. Для уточнения ответа «нет» испытуемый определял, в какую сторону одна картина повернута относительно другой.

После обработки экспериментальных данных были получены следующие значения порогов нормализации поворота картин при действии механизмов отстройки от сдвига $\Delta\varphi_{(n)}$: для угла поля зрения $\alpha = 2^\circ$ $\Delta\varphi_{(n)} = 1,58^\circ$; для $\alpha = 8^\circ$ $\Delta\varphi_{(n)} = 1,8^\circ$; для $\alpha = 20^\circ$ $\Delta\varphi_{(n)} = 2,1^\circ$; для $\alpha = 30^\circ$ $\Delta\varphi_{(n)} = 3,5^\circ$.

Определение порогов классификации сдвинутых картин. В этих опытах не учитывалось действие механизмов нормализации масштаба или поворота. Испытуемому предъявлялись картины, только сдвинутые одна относительно другой. Он должен был определять, какая из двух предъявляемых картин являлась сдвинутой и в какую сторону.

На основании обработки экспериментальных данных были получены следующие значения порогов классификации сдвинутых картин Δl : для угла поля зрения $\alpha = 2^\circ$ $\Delta l = 0,62$ мм; для $\alpha = 8^\circ$ $\Delta l = 0,8$ мм; для $\alpha = 20^\circ$ $\Delta l = 1,3$ мм; для $\alpha = 30^\circ$ $\Delta l = 2$ мм.

Эксперименты по классификации повернутых картин

Испытуемому предъявлялись одинаковые, но повернутые одна относительно другой вокруг точки фиксации картины. Угол поворота выбирался в пределах узнавания человеком предъявленных картин. Если последние отличались только поворотом, испытуемый относил их к одному классу, т. е. отвечал «да», если картины имели еще дополнительные отличия, он отвечал «нет». В качестве этих отличий в одном случае выбирался масштаб, в другом — сдвиг.

Изменение масштаба повернутых картин. Предъявлялись повернутые картины различных масштабов. Для уточнения ответа «нет», как и в предыдущих случаях, испытуемый должен был определять, какая из предъявляемых картин больше, или же они одинаковы.

На основе обработки экспериментальных данных были получены следующие значения порога нормализации масштаба при действии механизмов отстройки от поворота $\Delta m_{(p)}$: для угла поля зрения $\alpha = 8^\circ$ $\Delta m_{(p)} = 1,28\%$; для $\alpha = 20^\circ$ $\Delta m_{(p)} = 1,7\%$.

Сдвиг повернутых картин. Испытуемому предъявлялись сдвинутые одна относительно другой и повернутые относительно точки фиксации картины. Для уточнения ответа «нет» испытуемый, как и в предыдущих случаях, должен был определять, каким образом картины сдвинуты относительно друг друга. После обработки экспериментальных данных получены следующие значения порогов нормализации сдвига при действии механизмов отстройки от поворота $\Delta l_{(p)}$: для угла поля зрения $\alpha = 2^\circ$ $\Delta l_{(p)} = 0,58$ мм; для $\alpha = 8^\circ$ $\Delta l_{(p)} = 0,78$ мм; для $\alpha = 20^\circ$ $\Delta l_{(p)} = 1,2$ мм; для $\alpha = 30^\circ$ $\Delta l_{(p)} = 2,1$ мм.

Определение порогов классификации поворота. В этих экспериментах не учитывалось действие механизмов нормализации масштаба и сдвига. Испытуемому предъявлялись одинаковые, но повернутые одна относительно другой зрительные картины. Поворот проводился относительно точки фиксации. Испытуемый определял, какая из двух предъявленных картин являлась повернутой и в какую сторону.

После обработки экспериментальных данных были установлены следующие значения порогов классификации человеком повернутых картин: для угла поля зрения $\alpha = 2^\circ$ порог нормализации поворота $\Delta\varphi = 1,55^\circ$; для $\alpha = 8^\circ$ $\Delta\varphi = 1,8^\circ$; для $\alpha = 20^\circ$ $\Delta\varphi = 2^\circ$; для $\alpha = 30^\circ$ $\Delta\varphi = 3,5^\circ$.

На основе полученных опытных данных можно сделать ряд выводов о работе механизмов классификации зрительных образов. Прежде всего, определены минимальные границы действия операторов нормализации масштаба, сдвига и поворота, причем порог нормализации повышается от центральной части к периферии поля зрения. Существенные отличия значений порогов нормализации для различных форм зрительных картин не наблюдались, что свидетельствует об ограниченном влиянии форм зрительных картин на пороги их нормализации. Последние существенно не изменялись при введении дополнительных аффиных признаков.

Эти выводы, а также количественная оценка минимальных границ действия операторов нормализации могут быть полезны при создании и оценке технических устройств, решающих аналогичные задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Стефанова. Об инвариантности зрительных образов. Вторая национальная конференция Болгарского общества физиологических наук, София, 1964.
2. В. Д. Глевер. Механизмы опознания зрительных образов. Изд-во «Наука», Л., 1966.
3. А. А. Невская. Исследование инвариантности опознания у человека. Сб. «Проблемы физиологической оптики», т. 13. Механизмы кодирования зрительной информации. Изд-во «Наука», Л., 1966.
4. А. А. Невская. О пределах инвариантности зрительного опознания у человека. Сб. «Проблемы физиологической оптики», т. 14. Механизмы опознания зрительных образов. Изд-во «Наука», Л., 1967.
5. Ю. П. Шабанов-Кушнаренко, И. В. Шульгин, Б. К. Лопатченко. О математическом моделировании узнавания. Сб. «Проблемы бионики», вып. 3. Изд-во Харьковск. ун-та, 1969.
6. Е. П. Путятин, И. В. Шульгин, В. П. Юрченко, О. М. Абрамов. К вопросу о моделировании механизмов нормализации зрительных образов. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5. Изд-во Харьковск. ун-та, 1970.
7. Е. С. Вентцель. Теория вероятностей. Физматгиз, 1962.
8. М. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. Курс теории вероятностей и математической статистики. Изд-во «Наука», 1969.

МОДЕЛЬ ЗАПОМИНАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА НЕЙРОПОДОБНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ, РЕАЛИЗУЮЩЕГО ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ЗАПИСИ И СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

В. Ф. Соломатин

Различными авторами [1—8] неоднократно подчеркивалась аналогия между свойствами голограмм как носителей информации и свойствами следов памяти в мозгу. Но так как в голографии оперируют понятиями волновых полей и рассеивающих их объектов, а для мозга основным представляется движение нервных импульсов в нейронных сетях, возникает необходимость в разработке запоминающих устройств (ЗУ), реализующих голографические принципы записи и считывания информации в сетях нейроподобных элементов.

Ниже описывается модель такого ЗУ, обладающего следующими свойствами: распределенным хранением информации, устойчивостью к повреждениям запоминающих элементов, параллельной записью и считыванием, ассоциативностью. Схема ЗУ представлена на рис. 1. Оно состоит из трех слоев элементов: рецепторных (или входных) — первый слой, ассоциирующих (запоминающих) — второй слой и эффекторных

(выходных) — третий слой. Число элементов первого слоя равно числу элементов третьего слоя.

Все элементы первого слоя соединены со всеми элементами второго слоя связями, веса которых v_{ji} выбираются случайно, причем математическое ожидание величины веса связи равно нулю.

Все элементы второго слоя соединены со всеми элементами третьего слоя связями с весами v_{kj}^1 . Если ввести в рассмотрение матрицы весов связей $\|v_{ji}\|$ и $\|v_{kj}^1\|$, то вторая матрица должна представлять из себя транспонированную первую.

Предполагается, что сигналы (или возбуждения), распространяющиеся по связям, могут характеризоваться, например, частотой (если это последовательность импульсов) или амплитудой (если это отдельные импульсы).

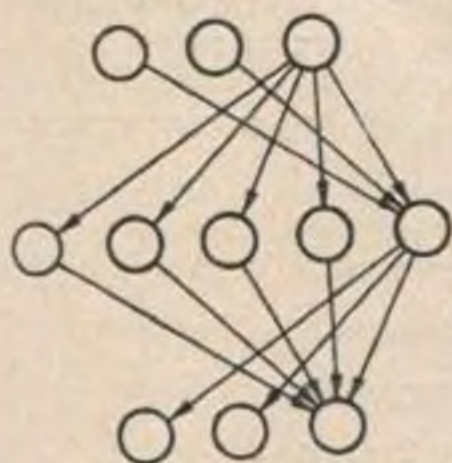


Рис. 1. Схема ЗУ (показана только часть связей).

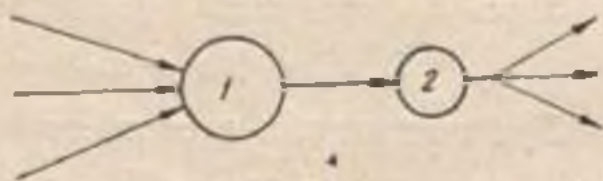


Рис. 2. Ассоциирующий элемент: 1 — суммирующий элемент; 2 — блок изменяемого коэффициента передачи.

Ассоциирующий элемент состоит из суммирующего элемента и блока изменяемого коэффициента передачи (рис. 2).

Коэффициентом передачи p мы называем отношение величины сигнала на выходе блока к величине сигнала на его входе.

Если описывать распределение возбуждения на выходе рецепторных элементов («изображения») векторами со значком «1», а на выходе суммирующих — со значком «2», то предполагается, что

$$A_2 = \|v_{ji}\| A_1, \quad (1)$$

где A — вектор, описывающий распределение возбуждения.

Возбуждение на выходе ассоциирующих элементов описывается вектором A'_2 , причем

$$A'_2 = p A_2. \quad (2)$$

Аналогично (1) предполагается, что $A_3 = \|v_{kj}^1\| A'_2$.

Запоминание сводится к изменению коэффициента передачи p в соответствии с формулой

$$p_{ji} = p_{j0} + a a_{2j}^2, \quad (3)$$

где j — номер ассоциирующего элемента;

a — компонента вектора A ;

L — константа;

p_{j0} — коэффициент передачи до записи.

Пусть

$$p_{j0} = 1. \quad (4)$$

Тогда до запоминания, как можно показать,

$$M[b_{3k}] = TD[v] b_{1k}. \quad (5)$$

где b_{1k} — величина k -й компоненты вектора B_1 ;

$m[b_{3k}]$ — математическое ожидание величины k -й компоненты вектора B_3 ;

T — число ассоциирующих элементов;

$D[v]$ — дисперсия случайной величины веса v .

Соотношение (5) означает, что вектор B_2 на выходе в среднем отличается от вектора B_1 на входе лишь постоянным множителем.

Можно также показать, что для дисперсии $D[b_{2k}]$ справедлива формула

$$D[b_{2k}] = T/D^2[v] \bar{b}_1^2, \quad (6)$$

где $\bar{b}_1^2$ — среднее значение квадрата компонент вектора B_1 ;

I — число входных элементов.

Пусть нами произведена запись и предъявлен для считывания любой фрагмент записанного «изображения» (фрагмент будет получен при условии замены части компонент вектора A_1 нулями).

Чтобы объяснить процесс считывания, разобьем a_{2j} в соотношении (3) на две части:

$$a_{2j} = a_{2j\parallel} + a_{2j\perp}.$$

Здесь $a_{2j\parallel}$ создается фрагментом, а $a_{2j\perp}$ — остатком. Тогда

$$a_{2j}^2 = (a_{2j\parallel} + a_{2j\perp})^2 = a_{2j\parallel}^2 + a_{2j\perp}^2 + 2a_{2j\parallel}a_{2j\perp}. \quad (7)$$

При считывании в соответствии с (2) — (4) получим

$$a'_{2j} = \rho a_{2j} = [1 + \alpha(a_{2j\parallel}^2 + a_{2j\perp}^2)] a_{2j\parallel} + 2\alpha a_{2j\parallel}^2 a_{2j\perp}. \quad (8)$$

Учитывая, что $a_{2j\parallel}^2$ и $a_{2j\perp}^2$ в среднем постоянны, заключаем, что возбуждение на выходе ассоциирующего элемента при считывании представляет собой в среднем сумму возбуждения фрагмента и восстановленного возбуждения остатка (взятых с разными множителями). Следовательно, на выходе системы (в слое 3, рис. 1) получим восстановленное (с точностью до постоянного множителя) «изображение» остатка (называемое в голографии фантомным).

Для соответствующего математического ожидания получается выражение

$$M[a_{3kra}] = 2\alpha/M[a_{2j}^2] D[v] b_{1k},$$

где a_{3kra} — величина k -й компоненты восстановленного вектора A_3 при предъявлении на входе вектора A_{1r} .

Восстановленное «изображение» будет сопровождаться шумом. Последний обусловлен действием следующих факторов: случайными отклонениями $a_{2j\parallel}^2$ от среднего значения, такими же отклонениями множителя при $a_{2j\parallel}$ в соотношении (8) и тем, что матрица $\|v'_{kr}\|$ является не обратной матрице $\|v_{kr}\|$, а транспортированной ей.

Здесь не приводится полная формула для отношения шум — сигнал ввиду ее громоздкости; укажем только, что в нее входит множитель $\sqrt{\frac{I}{J}}$, т. е. при достаточно большом J указанное отношение можно сделать достаточно малым.

Рассматриваемое ЗУ позволяет осуществить многократную запись при последующем раздельном считывании. Для этого необходимо, чтобы различные считывающие возбуждения создавали некоррелированные распределения возбуждения в слое 2 (рис. 1). В этом случае вместо множителя $a_{2j\parallel}^2$ в последнем члене формулы (8) окажется множитель $a_{2j1} a_{2j2}$, математическое ожидание которого будет равно нулю, что означает отсутствие восстановленного «изображения» (a_{2j1} — компонента вектора, описывающего опорное возбуждение в слое 2, a_{2j2} — то же для считывающего возбуждения).

Рассматриваемое запоминающее устройство сохраняет свою работоспособность и в случае выхода из строя запоминающих элементов (при этом увеличивается отношение шум — сигнал и восстановленный вектор приобретает постоянный множитель, связанный с изменением числа ассоциирующих элементов).

Следует отметить, что это ЗУ в некоторой степени напоминает трехслойный перцептрон, существенно отличаясь от него только одноактностью обучения. Чтобы использовать ЗУ в перцептронном режиме (для распознавания), рецепторные элементы следует разбить на две группы (одна — для приказов, другая — для распознаваемого возбуждения), а между элементами второй группы и ассоциирующими включить сеть, обладающую нелинейными свойствами в отношении преобразования возбуждений. При этом после одноактного обучения в ответ на предъявление объекта, который запомнил испытуемый, будет возбуждаться эффективный элемент, соответствующий признаку.

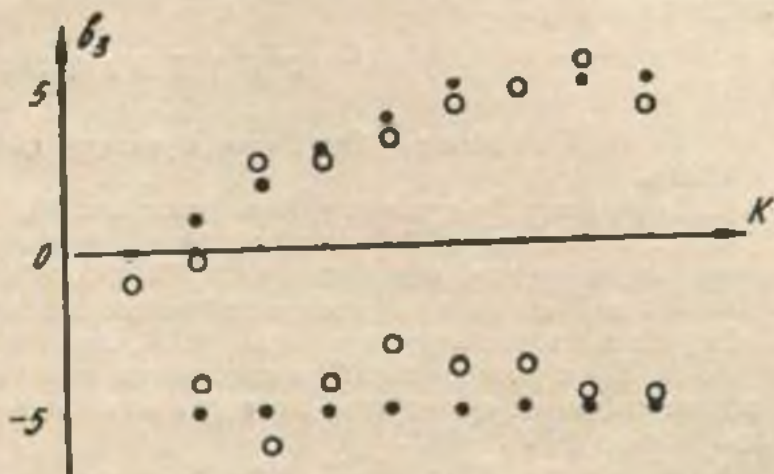


Рис. 3. Записанные и считанные распределения возбуждений (точками показаны для разных записанных распределения, кружками — считанные распределения).

Анализ указанной модели позволяет сделать следующие предположения относительно возможных способов функционирования памяти мозга.

1. Возможно, что формирование следа памяти в мозгу происходит при встрече двух возбуждений, т. е. эграмма памяти представляет собой в некотором смысле запись «интерференционной» картины, создаваемой возбуждениями (интерференция возбуждений рассматривалась авторами работ [9, 10] и др.).

2. Необходимость большого числа ассоциирующих элементов в ЗУ для уменьшения отношения шум — сигнал и увеличения емкости ЗУ можно попытаться связать с ростом величины поверхности коры в филогенезе.

3. Чтобы ассоциирующие нейроны могли передавать отрицательные сигналы, они должны быть спонтанно активны.

4. Опорно-считывающее возбуждение должно быть диффузным и однородным, т. е. создаваться неспецифическими структурами мозга.

Процесс технической реализации ЗУ на реальных элементах сопровождается некоторой сложностью ассоциирующих элементов (сумматор с большим числом входов и аналоговый блок изменяемого коэффициента передачи) и необходимостью большого числа связей.

Емкость ЗУ не превосходит n l -разрядных двоичных кодов, причем

$$n = \frac{J}{C^2 l},$$

где C — отношение сигнал — шум.

На основе рассмотренного ЗУ можно сконструировать ЗУ с перекодированием (чтобы не запоминать те фрагменты предъявляемых «изображений», запоминание которых было осуществлено ранее). Емкость ЗУ увеличивается при этом пропорционально l , но возрастает

время обращения к ЗУ. Наконец, данное ЗУ можно использовать для моделирования течения ассоциаций в мозгу.

Результаты числовых расчетов подтвердили выводы, полученные аналитическим путем. Два распределения возбуждения рецепторных элементов были записаны, а затем раздельно считаны. Результат считывания представлен на рис. 3, где число рецепторных и эффекторных элементов было взято равным 10, число ассоциирующих — 272. Для уменьшения объема вычислений отбрасывались члены $a_{2/1}^2$ и $a_{2/2}^2$ в соотношении (8).

ЛИТЕРАТУРА

1. K. H. Pribram. The Neurophysiology of Remembering. Scientific American, 7, 1 (1969).
2. Is Memory holographic? New Scientist, 33, 531 (1967).
3. B. Jalesz, K. Pennington. Equidistributed Information Mapping. An Analogy to Holograms and Memory. JOSA, 55, 604 (1965).
4. Ван Хирден. Теория оптического запоминающего устройства на твердом теле. «Зарубежная радиоэлектроника», 1964, № 2.
5. И. В. Еременко. О возможности изучения процессов в нейронных сетях на основе гипотезы существования голограммной памяти. Сб. «Проблемы нейрокибернетики». Изд-во РГУ, 1967.
6. «Природа», 1968, № 12, стр. 101.
7. Norman S. Neidel. Is visual Memory Holographic. Nature, 221, 5182 (1969).
8. Ю. А. Воронов. Голограммная гипотеза памяти и нейронного импульса. Тезисы докл. I Всесоюз. конф. по нейрокибернетике, Ростов, Д., 1970.
9. К. С. Лешли. Мозг и интеллект. М.—Л., 1933.
10. П. К. Анохин. Биологические и нейрофизиологические основы условного рефлекса. Изд-во «Медицина», 1968.

О СТРУКТУРЕ ПРОЦЕССА ЗАПОМИНАНИЯ И ЕЕ МОДЕЛИРОВАНИИ

В. П. Клевцов, В. Я. Ляудис

Известно, что одним из существенных аспектов изучения проблем надежности комплексной системы человек — машина является исследование и моделирование закономерностей работы человеческой памяти и ее специфических свойств. Значительная часть исследований, проведенных в этом направлении, имеет отношение к характеристике кратковременной памяти и попыткам ее математического и технического моделирования. Внимание, которое исследователи уделяют проблемам кратковременной памяти, объясняется тем, что ее процессы более всего зависят от характера, объема и формы предъявления информации, в связи с чем именно кратковременная память человека бывает источником большого числа ошибок, снижающих надежность системы человек — машина. Однако анализ процессов переработки информации в кратковременной памяти — задача чрезвычайной сложности. Поэтому до настоящего времени еще не удалось получить расчлененной операционной характеристики процесса переработки информации на уровне кратковременной памяти. Вместе с тем решение такой задачи можно значительно ускорить, если обратиться к анализу структуры процесса долговременного запоминания. Дело в том, что переработка информации в долговременной памяти человека — процесс, часто развернутый не только во времени, но и по форме протекания отдельных действий, связанных с более или менее сознаваемыми целями отбора и фиксации нужных свойств в полученной человеком информации. Задача пред-

стоящего использования последней выступает здесь как регулятор, изменяющий характер селективных операций и операций, фиксирующих необходимые для последующей деятельности свойства информации. Поэтому данные переработки информации на высших уровнях памяти человека (там, где процессы перекодирования регулируются сознательными задачами и целями предстоящей деятельности) могут быть продуктивно использованы для анализа процессов переработки и на уровне кратковременной памяти. Вместе с тем исследование структуры информационных процессов долговременной памяти — задача, имеющая самостоятельное значение в цикле исследований надежности системы человек — машина.

В экспериментальном психологическом исследовании наиболее развитых форм произвольного запоминания человеком [1] была выявлена следующая структура процесса долговременного запоминания:

- 1) установление алфавита предъявленной информации, ее категоризация;
- 2) поиск и выделение способа группировки элементов (т. е. законов организации групп) на основе анализа межэлементных связей;
- 3) группировка элементов в целостные структуры (группы);
- 4) синтез групп (создание целостной модели ряда).

Опытами установлено [2], что указанная операционная структура долговременного запоминания обладает высокой надежностью. В результате первых двух операций (селективных), обеспечивающих направленный отбор необходимых свойств информации, еще не достигается полнота и точность воспроизведения. Функция фиксации и сохранения отобранной информации обеспечивается двумя последними операциями, благодаря которым возникает высокая готовность памяти к быстрому точному воспроизведению и последующему разнообразному использованию полученной информации.

Анализ структуры сенсорно-перцептивных и мнемических действий на разных уровнях восприятия приводит к мысли о том, что указанные выше принципы характерны для всей иерархической структуры познавательного процесса в целом и являются в известной степени общими существенными закономерностями обработки и запоминания информации [3].

Правомерность такого заключения доказывается результатами исследования и моделирования различных уровней зрительного восприятия, в том числе низших — рецепторных. К настоящему времени накоплены многочисленные данные относительно общей организации сенсорных процессов и их эфферентной регуляции, роли обратных связей в этой регуляции. Они могут рассматриваться не только как подтверждение справедливости мнения об активности и уподобительном (адаптивном) характере восприятия и оперативного запоминания, но и как проявление описанных выше законов мнемической деятельности на «нижних этажах» восприятия.

Довольно четко структура этой деятельности проявилась при моделировании зрительного анализатора в ходе разработки и экспериментального исследования универсальной системы автоматического анализа изображений. Модель, описанная нами ранее [3], предназначалась для решения прикладных задач различного характера в естественных условиях и поэтому строилась на основе принципов активности и адаптивности. Высшие уровни модели имеют вид алгоритмической структуры, низшие разработаны алгоритмически и конструктивно, реализованы на установке, состоящей из ЭЦВМ «Днепр» и оптико-электронного устройства обзора входного изображения.

Результаты моделирования показали, что для воплощения в модели принципов активности и адаптивности необходимо и возможно использование основных мнемических принципов и позволили выявить конкретный вид процессов, в которых эти принципы реализуются. В частности, в модели выделены два отдела, работающие на аналогичных принципах, но с информацией разного характера (двумерной и одномерной). В функции каждого отдела входит реализация процедур выделения, опознания и запоминания в оперативной памяти характерных локальных элементов входного сигнала.

Эти процедуры реализуются блоками измерения, накопления и локального анализа в виде следующей последовательности операций:

1) измерение характеристики заданного множества микроэлементов изображения и их взаимосвязей с последующим анализом групповых характеристик;

2) поиск (с помощью процедур самонастройки по параметрам рецептивных полей) закона организации элементов в группы при пробных изменениях числа и состава группируемых элементов, а также способа группировки;

3) группировка и анализ межгрупповых отношений;

4) синтез групп в целостную структуру (локальный элемент изображения) с последующим распознаванием ее.

Специфика структуры этих операций на нижних уровнях (краткосрочная память) в отличие от верхних (долговременная память) заключается в том, что в самой конструкции рецепторного аппарата зафиксированы возможные законы организации групп элементарных отсчетов. К примеру, классические рецептивные поля Хьюбеля и Визеля [4] являются аппаратом выделения групп элементов (т. е. двумерных участков) разной формы, величины и яркости в условиях шумов. Именно обнаружение смежных групп темных и светлых элементов позволяет выделить как отдельный элемент контура, так и контур объекта в целом. Все выделенные двумерной рецептивной системой локальные элементы изображения, представляющие собой разные типы групп, служат материалом для дальнейших мнемических операций на высших уровнях. Так, на уровне одномерной рецептивной системы, где проводится анализ описания контура, отыскиваются такие законы организации элементарных микроинтервалов линии, которые представляют собой существенные характеристики контура (отрезки между особыми точками).

Группировка отрезков в целостные структуры дает основание манипулировать более сложными образованиями (фигурами).

Математическое и машинное моделирование работы краткосрочной памяти зрительного анализатора свидетельствует о возможности рассмотрения операционной структуры переработки информации на различных уровнях памяти с точки зрения общих принципов ее функциональной организации.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Я. Ляудис. О структуре мнемического действия. Сб. «Проблемы инженерной психологии», вып. 3. Психология памяти. Л., 1965.
2. В. Я. Ляудис. Строение процесса запоминания. «Вестник Харьковского университета», № 30. Серия психологии, вып. 2. Проблемы психологии памяти и обучения. Изд-во Харьковск. ун-та, 1969.
3. В. П. Клевцова. Некоторые принципы организации памяти в моделях анализаторов. Там же.
4. D. N. Hubel, T. N. Wiesel. Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. J. Physiol., 160 (1962).

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО РАСПОЗНАВАНИЮ ОБРАЗОВ С ПОМОЩЬЮ РАСТУЩИХ СЕТЕЙ

В. П. Гладун, С. П. Мазаева, И. Г. Сава

Ранее [1] нами рассматривался особый класс обучаемых сетей, названных *растущими*. Подобно другим обучаемым сетям, например, персептронам [2, 3], растущие сети реализуют некоторую гипотезу о нейробиологической структуре мозга. Особенностью их является способность достраиваться в процессе своего обучения новыми элементами из числа находящихся в резерве. Данная особенность отражает одно из важнейших свойств мозга — возможность устанавливать и изменять функциональные связи между нейронами.

В настоящем сообщении кратко описывается алгоритм обучения растущих сетей распознаванию образов, а также излагается процесс проведения экспериментов на ЦВМ, иллюстрирующих работу этого алгоритма.

Алгоритм обучения распознаванию образов

Введем несколько определений.

Рецептором называется элемент с одним входом и выходом, который в момент поступления сигнала на его вход вырабатывает выходной сигнал и переходит в особое состояние, называемое состоянием *возбуждения*, сохраняя его в течение периода τ .

Передающей связью называется канал, передающий сигнал с выхода одного элемента на вход другого без изменения.

Запрещающей связью называется канал, передающий сигнал с выхода одного элемента на вход другого и осуществляющий инвертирование передаваемого сигнала.

Активным входом элемента называется вход, связанный передающей или запрещающей связью с выходом другого элемента.

Ассоциативным элементом называется элемент с одним выходом и n входами ($n > 2$), который после поступления в момент t сигналов на некоторые его входы вырабатывает в момент $t + 1$ выходной сигнал и переходит в состояние *возбуждения* при условии, что в течение периода τ , оканчивающегося моментом t , сигналы поступили на все его активные входы. Состояние возбуждения сохраняется в течение периода τ .

Каждый рецептор и ассоциативный элемент характеризуется некоторым числом — *весом*.

Распознаватель — элемент с n входами ($n > 1$) и двумя выходами, который вырабатывает выходной сигнал на одном из выходов в моменты, когда на входы поступает хотя бы один сигнал по передающей связи и отсутствуют инвертированные входные сигналы (поступающие по запрещающей связи), на другом же — в моменты, когда хотя бы на один вход поступает инвертированный сигнал. Выход распознавателя, на котором появляется сигнал при поступлении инвертированного входного сигнала, называется *отрицательным выходом*, другой — *положительным*.

Входы ассоциативных элементов и распознавателей, не связанных с выходами других элементов, будем называть *пассивными входами*.

Растущая сеть представляет собой совокупность рецепторов, ассоциативных элементов и распознавателей, соединенных между собой не-

редающими и запрещающими связями при условии выполнения следующих требований:

а) выход элемента может быть соединен с любым числом входов других элементов;

б) каждый вход не может быть соединен более чем с одним выходом;

в) входы рецепторов и выходы распознавателей не должны быть связаны с другими элементами;

г) все запрещающие связи должны соединять выходы ассоциативных элементов или рецепторов со входами распознавателей.

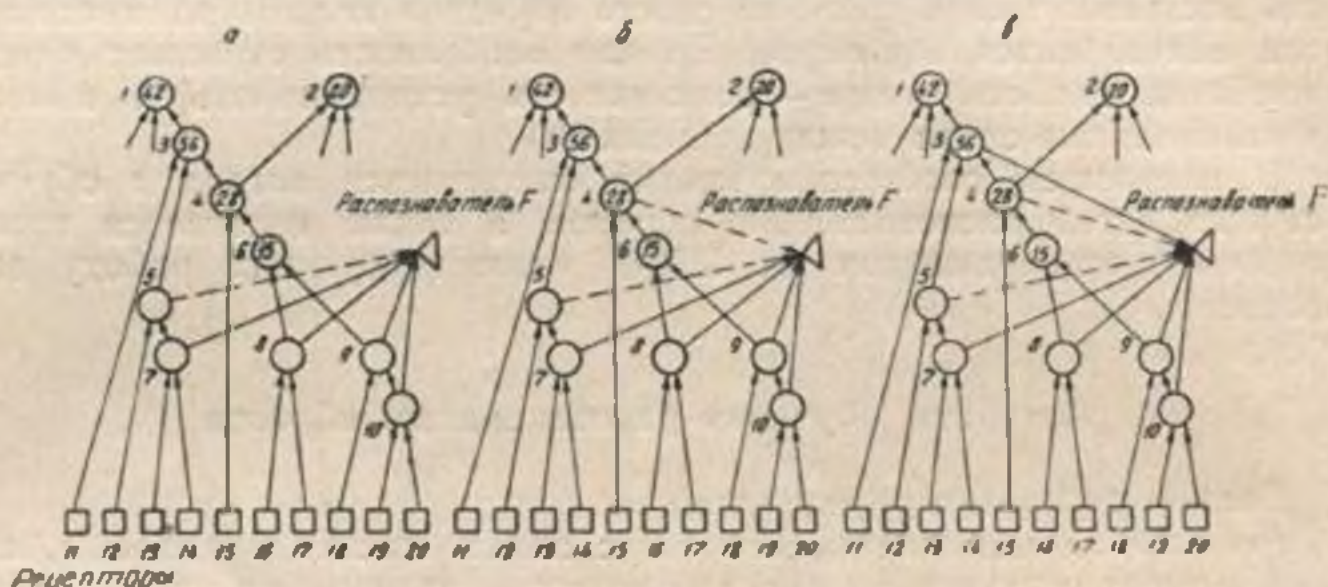


Рис. 1.

На рис. 1 растущая сеть изображена в виде графа, вершины которого соответствуют элементам сети. Запрещающие связи показаны пунктирными линиями. В пунктах записаны веса узлов.

Элемент a считается подчиненным элементу b , если на графе сети имеется путь в направлении стрелок от вершины, изображающей элемент a , к вершине, изображающей элемент b .

Множество, содержащее все элементы, подчиненные некоторому элементу a , и сам элемент a , называется *субмножеством элемента a* .

Субмножество рецептора состоит только из этого рецептора.

Все ассоциативные элементы, которым подчинен элемент a , составляют его супермножество.

Элементы из субмножества элемента a , связанные с элементом a непосредственно, образуют его 0-субмножество. Аналогично ассоциативные элементы, которым непосредственно подчинен элемент a , составляют его 0-супермножество.

Задача обучения распознаванию образов рассматривается здесь в детерминистской постановке, т. е. предполагается, что распознаваемые классы не пересекаются. Обучение состоит в последовательном вводе в обучаемую систему информации об объектах, составляющих обучающую выборку, вместе с указаниями типа «объект принадлежит классу F » или «объект не принадлежит классу F ». Процесс обучения считается оконченным, если обучаемая система правильно классифицирует все объекты из обучающей выборки. Обязательным условием нетриivialности системы является ее способность правильно распознавать после обучения не только объекты из обучающей выборки, но и не используемые для обучения. Обучаемая система состоит из двух частей: сети, создаваемой в процессе обучения из резервных элементов, и устройства или программы, осуществляющей постройку сети. Организация па-

мости в виде сети позволяет избавиться от сложных вычислений и многократных переборов больших массивов, свойственных другим алгоритмам обучения распознаванию [4, 5], а также значительно сократить объем хранимой информации.

Перед началом обучения сеть состоит лишь из рецепторов и распознавателей, не связанных между собой. Распознаваемые объекты представляются совокупностью признаков, принимающих дискретные значения. Распознаватели соответствуют распознаваемым классам, каждый из рецепторов предназначается для восприятия сигнала, соответствующего одному из значений признаков.

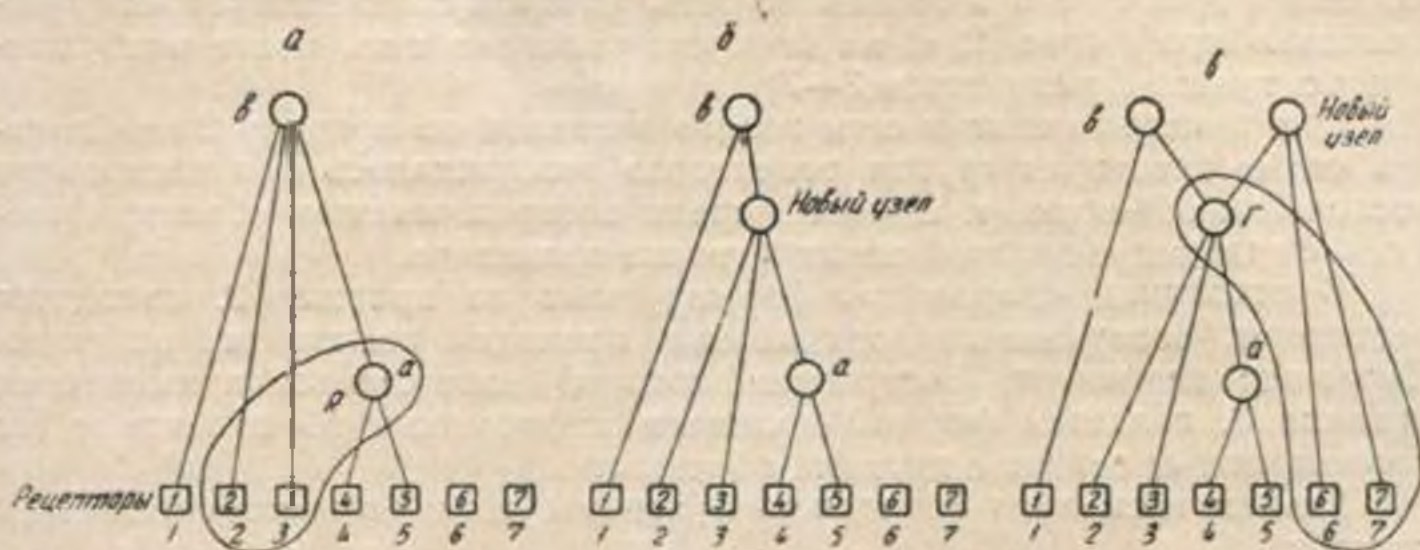


Рис. 2.

Введение в сеть информации об объекте, или, как мы будем говорить, *восприятие объекта*, осуществляется путем одновременной подачи внешних сигналов на входы рецепторов, которые соответствуют признакам данного объекта. Алгоритм обучения запускается при восприятии каждого объекта. Интервал времени между последовательными восприятиями больше периода возбуждения τ , поэтому к моменту восприятия очередного объекта в сети возбужденные элементы отсутствуют. Время действия алгоритма обучения не превышает τ .

При обучении распознаванию объектов класса F в обучающую выборку, помимо объектов из класса F , могут быть введены объекты, не входящие в класс F . Объекты первого типа будем называть *положительными объектами* класса F , объекты второго типа — *отрицательными объектами* класса F .

Алгоритм обучения описывается шестью правилами.

Правило 1. При восприятии объекта осуществляется пересчет весов всех возбужденных рецепторов и ассоциативных элементов по формуле $w = m(k + 1)$, где w — вес элемента; k — число рецепторов в его субмножестве; m — число возбуждений элемента в процессе обучения.

Правило 2. Если при восприятии объекта возбуждается множество элементов R , составляющее часть 0-субмножества некоторого ассоциативного элемента b и содержащее не менее двух элементов, связи элемента b с элементами из множества R ликвидируются и к сети присоединяется новый ассоциативный элемент, входы которого объединены передающими связями со всеми элементами множества R , а выход соединяется передающей связью с одним из пассивных входов элемента b . Новый элемент сразу же после возникновения находится в возбужденном состоянии.

Действие правила 2 очевидно из рис. 2, а, б. На рис. 2, б показана сеть после возбуждения в ситуации рецепторов 2, 3, 4, 5. Правило 2

применяется после реализации правила 1 во всех ситуациях, где оно применимо. Затем выполняется правило 3.

Правило 3. Пусть T — множество элементов сети, возбужденных в результате поступления внешних сигналов на рецепторы и не имеющих других возбужденных элементов в своих 0-супермножествах.

Если T содержит не менее двух элементов, к сети присоединяется новый ассоциативный элемент, входы которого соединяются передающими связями со всеми элементами множества T . Новый элемент сразу же после возникновения находится в состоянии возбуждения.

Действие правила 3 иллюстрируется рис. 2, б, в. В результате выполнения правил 2 и 3 возникает сеть, которой соответствует «пирамидальный» граф (рис. 2, в, на котором показана сеть после возбуждения в ситуации б рецепторов 2—7).

Для присоединения к сети нового элемента по правилу 2 необходимо, чтобы некоторая группа рецепторов возбуждалась при восприятии нескольких объектов, т. е. чтобы среди воспринимаемых объектов имелись обладающие группой одних и тех же признаков.

В основании «пирамид», формируемых по правилу 2, находятся рецепторы, воспринявшие одинаковые признаки нескольких объектов. Пирамида элементов, построение которой завершается применением правила 3, является формой хранения информации об объекте и его ассоциативных связях с другими объектами.

Введем несколько определений, используемых в оставшихся трех правилах.

Будем говорить, что элементы из супермножества элемента a , возбужденные при восприятии некоторого объекта, составляют *возбужденное супермножество элемента a* . Те из возбужденных элементов, которые связаны с распознавателем класса F передающими или запрещающими связями, но не подчинены другим возбужденным элементам, имеющим связи с этим распознавателем, будем называть *контрольными элементами класса F* .

На рис. 1, а при возбуждении пирамиды, возглавляемой элементом 1, контрольными элементами класса F являются элементы 5, 8, 9.

Правила 4, 5, 6 выполняются после реализации правил 1, 2, 3.

Правило 4. Если при восприятии положительного объекта класса F нет возбужденных элементов, связанных передающими связями с распознавателем класса F , выход возбужденного элемента, имеющего наибольший вес, соединяется передающей связью с одним из пассивных входов распознавателя класса F .

Правило 5. Если при восприятии отрицательного объекта класса F среди возбужденных элементов имеются контрольные элементы этого класса с возбужденными супермножествами $Q_1, Q_2, \dots, Q_l$, связанные с распознавателем класса F передающими связями, выход элемента, имеющего наибольший вес среди всех элементов множества $Q_0 = \bigcup_i Q_i$, соединяется запрещающей связью с одним из пассивных входов распознавателя класса F .

В соответствии с этим правилом возбуждение пирамиды элемента 2 (рис. 1, а) при условии, что она представляет отрицательный объект класса F , приводит к формированию запрещающей связи между распознавателем и выходом элемента 4 (рис. 1, б).

Правило 6. Если при восприятии положительного объекта класса F среди возбужденных элементов имеются контрольные элементы этого класса с возбужденными супермножествами $Q_1, Q_2, \dots, Q_l$, связанные с распознавателем класса F запрещающими связями, выход элемента,

имеющего наибольший вес среди всех элементов множества $Q_0 = \bigcap_{i=1}^n Q_i$, соединяется передающей связью с одним из пассивных входов распознавателя класса F .

Например, возбуждение в ситуации (рис. 1, б) пирамиды элемента 1 при условии, что она представляет положительный объект класса F , приводит к формированию передающей связи между распознавателем и выходом элемента 3 (рис. 1, в).

Путем построения передающих связей осуществляется выделение наиболее характерных (имеющих наибольший вес) групп признаков положительных объектов.

Наличие передающей связи элемента 9 (рис. 2, а) означает выделение группы признаков, воспринимаемых рецепторами 18, 19, 20.

Средствами построения запрещающих связей выделяются группы признаков отрицательных объектов. Заметим, что выделение таких групп происходит в тех случаях, когда при восприятии отрицательных объектов возбуждаются элементы, уже имеющие передающие связи, т. е. при восприятии тех объектов, которые являются отрицательными, хотя и обладают выделенными признаками положительных объектов. Путем построения передающих связей по правилу 6 выделяются группы признаков тех объектов, которые являются положительными, несмотря на то, что обладают выделенными признаками отрицательных объектов.

При обучении сети распознаванию образов обучающая последовательность состоит из отдельных участков — циклов, каждый из которых полностью включает обучающую выборку. Правила 1, 2, 3 применяются только на первом цикле. Обучение заканчивается, если во время восприятия всех объектов очередного цикла обучающей последовательности совсем не применялись правила 4, 5, 6. Восприятие объектов сопровождается поступлением сигналов на входы распознавателей в порядке возбуждения элементов, с которыми они связаны. После обучения для распознавания принадлежности объекта к классу F используется следующее правило.

Объект принадлежит классу F , если при его восприятии распознаватель этого класса вырабатывает выходные сигналы, причем последовательность выходных сигналов завершается сигналом на положительном выходе этого распознавателя. Появление завершающего выходного сигнала на положительном выходе распознавателя класса F означает, что при восприятии объекта возбудился контрольный элемент класса F , связанный с распознавателем этого класса передающей связью. Следовательно, воспринятый объект обладает выделенной группой признаков положительных объектов.

В примере на рис. 1, в при возбуждении «пирамиды», возглавляемой элементом 3, на распознаватель класса F сначала одновременно поступают сигналы элементов 7, 8, 10, затем элементов 5 и 9, после — 4 и, наконец, элемента 3. Так как последний входной сигнал поступает по передающей связи, последний выходной сигнал распознавателя возникает на его положительном выходе. Это означает, что воспринятый объект принадлежит классу F .

В решающем правиле распознавания не используются элементы сети, которым подчинены контрольные элементы. Элементы, не применяемые для распознавания, могут быть исключены из сети. Например, в сети (рис. 1, а) после этапа обучения могут быть исключены элементы 2, 3, 4, 6. Таким образом, после обучения из сети исключаются те ее участки, в структуре которых отображена информация об отдельных объектах, используемых для обучения, и остаются участки, хранящие

информацию о признаках, характеризующих распознаваемый класс в целом.

В Институте кибернетики АН УССР алгоритм обучения распознаванию образов реализован в виде программы вычислительной машины. При программной реализации элементам и связям сети соответствуют ячейки оперативной памяти ЦВМ. Ячейки связей каждого элемента образуют ассоциативный список, возглавляет который ячейка, соответствующая элементу. В данных ячейках содержатся адреса ячеек элементов, к которым ведут эти связи. Веса элементов хранятся в ячейках элементов. Для формирования новых элементов и связей используются свободные ячейки памяти, которые объединяются в ассоциативный список-магазин.

Первый эксперимент

Для описанного алгоритма доказывается следующая *теорема сходимости*.

Пусть обучающая выборка состоит из объектов двух классов: объектов класса F , образующих множество F' , и объектов класса G , образующих множество G' .

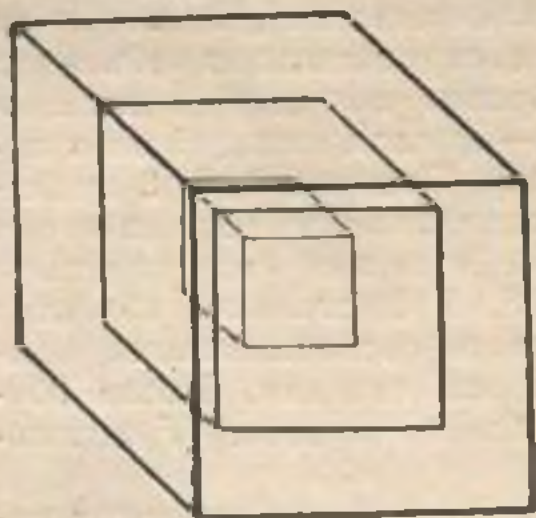


Рис. 3.

Если множества F' и G' не пересекаются, правильное распознавание всех принадлежащих им объектов достигается при использовании описанного алгоритма обучения за конечное число циклов обучающей последовательности.

Основная цель первого эксперимента заключалась в том, чтобы проиллюстрировать справедливость теоремы сходимости на конкретном примере. Суть опыта сводилась к выполнению всего описанного процесса обучения для обучающей выборки, состоящей из двух множеств F' и G' . Объекты описывались тремя призна-

ками, принимающими шесть различных значений. Каждому такому объекту соответствует точка в трехмерном евклидовом пространстве признаков.

Доказательство данной теоремы в отличие от других теорем сходимости [2, 3] никак не обусловлено формой поверхности, разделяющей классы в пространстве признаков. Поэтому множества F' и G' выбирались таким образом, чтобы поверхность, разделяющая их в пространстве признаков, оказалась достаточно сложной, во всяком случае, не линейной и не квадратичной.

Области распределения в пространстве признаков точек, представляющих объекты множеств F' и G' , ограничивались тремя вложенными друг в друга кубами, имеющими совпадающие оси симметрии (рис. 3).

Множеству F' принадлежали точки, входящие во внутренний куб, а также расположенные между внешним и средним кубами. Точки между внутренним и средним кубами принадлежали множеству G' . Всего в множество F' входило 160 объектов, в множество G' — 56. Обучение было полностью выполнено за два цикла обучающей последовательности.

Второй эксперимент

Цель второго эксперимента заключалась в проверке способности обучаемой системы распознавать объекты, не входящие в обучающую выборку.

Успех распознавания объектов, не участвующих в обучении, зависит от того, насколько хорошо обучающая выборка представляет класс, которому принадлежат эти объекты.

Во втором эксперименте определялись размеры обучающей выборки, достаточной для того, чтобы после обучения обучаемая система правильно распознавала все объекты заданного класса. Как и в первом эксперименте, объекты описывались тремя признаками. Область распределения распознаваемого класса в трехмерном пространстве признаков имела форму куба. Путем случайного отбора небольшого числа заданного класса формировалась обучающая выборка, после чего полностью выполнялся этап обучения. Затем делалась попытка распознать объекты, не вошедшие в обучающую выборку. Если при этом распознавались не все объекты заданного класса, обучающая выборка дополнялась частью неправильно опознанных объектов, и обучение выполнялось сначала. Процесс повторялся, пока не достигалось правильное распознавание всех объектов заданного класса.

Ход обучения растущей сети можно интерпретировать как процесс покрытия области распределения класса в пространстве признаков многомерными плоскостями, каждая из которых соответствует некоторому ассоциативному элементу или рецептору сети, имеющему передающую или запрещающую связь. Исходя из этих соображений можно рассчитать минимальный размер обучающей выборки, достаточной для покрытия многомерными плоскостями области распределения некоторого класса. Например, наименьшее число плоскостей, которыми можно покрыть все точки трехмерного куба, равно числу точек на его ребре.

Для выделения плоскости в трехмерном пространстве необходимо, чтобы в обучающей выборке было не менее четырех объектов, содержащих одинаковый признак. Следовательно, наименьшая обучающая выборка, достаточная для распознавания всех объектов класса, областью распределения которого является куб $6 \times 6 \times 6$, должна содержать 24 объекта. В наших экспериментах фактическая обучающая выборка содержала 31 объект.

Отношение объема минимальной, а следовательно, и фактической обучающей выборки к числу всех объектов класса уменьшается по мере роста числа объектов в классе.

Сеть, построенная при выполнении первого и второго экспериментов, размещалась в 1500 ячейках памяти. Общий объем программ не превышал 1900 одноадресных команд.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Г л а д у н. Формирование понятий путем обучения растущих сетей. «Кибернетика», 1970, № 2.
2. Ф. Р о з е н б л а т т. Принципы нейродинамики. Изд-во «Мир», 1965.
3. Н. Н и л ь с о н. Обучающиеся машины. Изд-во «Мир», 1967.
4. В. М. Г л у ш к о в. Введение в кибернетику. Изд-во АН УССР, Киев, 1964.
5. И. Т. Т у р б о в и ч, Е. Ф. Ю р к о в, В. Г. Г и т и с. Детерминированный метод принятия решения при опознании образов. Сб. «Опознание образов». Изд-во «Наука», 1968.

К ВОПРОСУ ОБ АКСИОМАТИЧЕСКОМ ПОСТРОЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

*Ю. П. Шабанов-Кушнаренок, Г. С. Еремин,
Е. Г. Качко, Ю. С. Марченко, В. П. Пчелинов, В. В. Тищенко*

Одним из методов решения психофизических задач является построение математических моделей, получаемых на основе логического вывода из экспериментальных свойств (аксиом).

В качестве свойств системы будем использовать только те, которые могут быть проверены при работе сознания человека в режиме нуля-органа.

Пусть N и M — множество соответственно входных и выходных сигналов, F — однозначное отображение N на M . Сформулируем некоторые из возможных свойств отображения F .

1) Существуют $a_i \in N$ ($1 \leq i \leq m \leq n$) такие, что для любого $x \in N$ найдется единственный набор вещественных чисел $\alpha_i \equiv \alpha_i(x)$, для которых имеет место равенство

$$Fx = F\left(\sum_{i=1}^m \alpha_i a_i\right), \quad \left(\alpha_i a_i, \sum_{i=1}^m \alpha_i a_i \in N\right). \quad (1)$$

Если $m = 1$, то условие (1) принимает вид

$$Fx = F(\alpha a), \quad (\alpha a \in N). \quad (1')$$

2) Если

$$Fx_1 = Fy_1 \text{ и } Fx_2 = Fy_2,$$

то

$$F(x_1 + x_2) = F(y_1 + y_2), \quad x_1, y_1, x_2, y_2, x_1 + x_2, y_1 + y_2 \in N. \quad (2)$$

3) Если

$$Fx_n = Fy_n, \quad x_n \rightarrow x, \quad y_n \rightarrow y, \quad (3)$$

то

$$Fx = Fy, \quad (x, y, x_n, y_n \in N).$$

4) Если

$$Fx = Fy,$$

то

$$F(\lambda x) = F(\lambda y), \quad (x, y, \lambda x, \lambda y \in N). \quad (4)$$

где λ — вещественное число.

5) Если $Fx_1 = Fy_1$ и $Fx_2 = Fy_2$, то $F(\alpha x_1 + \beta x_2) = F(\alpha y_1 + \beta y_2)$, где α, β — вещественные числа.

$$(x_1, x_2, y_1, y_2, \alpha x_1 + \beta x_2, \alpha y_1 + \beta y_2 \in N). \quad (5)$$

6) Для всех $x \in N$ существует вещественное число A такое, что

$$|\alpha_i(x)| \leq A \|x\|, \quad (6)$$

где $\alpha_i(x)$ определяются из условия (1).

7) Существует вещественное число c такое, что если

$$Fx_n = F(cx_0) \text{ и } x_n \rightarrow x, \text{ то} \quad (7)$$

$$Fx = F(cx_0), \quad (x_n, x_0, cx_0 \in N).$$

Целью работы является отыскание вида отображения F при различных комбинациях свойств 1) — 7) для случаев, когда множество

входных сигналов принадлежит R^n или I_p ($p > 1$), а множество выходных сигналов биективно связано с R^m ($m < n$, в том числе при $m = 1$).

А. Пусть множество входных сигналов совпадает с пространством R^n либо является его частью, а множество выходных сигналов биективно связано с R^1 .

1. Рассмотрим случай, когда множество N совпадает с R^n . Пусть $L: R^n \rightarrow R^m$, $f: R^m \rightarrow M$.

Докажем, что из условий (1) — (3) следует

$$F = f \circ L, \quad (8)$$

где f — биективно; L — эпиморфизм.

Действительно, предположим, что условия (1) — (3) выполняются. Поставим в соответствие каждому $x \in R^n$ вектор $Lx \in R^1$, положив $Lx = \alpha(x)$. Из условия (1') следует биективная связь между Lx и Fx . Обозначим ее через f .

Для любых $x, y \in R^n$ по условию (1') имеем

$$\begin{aligned} Fx &= F(\alpha(x) \alpha), \\ Fy &= F(\alpha(y) \alpha) \end{aligned} \quad (9)$$

и

$$F(x + y) = F(\alpha(x + y) \alpha). \quad (10)$$

Но, согласно (2) и равенствам (9),

$$F(x + y) = F((\alpha(x) + \alpha(y)) \alpha). \quad (11)$$

Сравнивая (10) и (11), с учетом (1') имеем

$$\alpha(x + y) = \alpha(x) + \alpha(y). \quad (12)$$

Условие (3) означает, что если $\alpha x_n = \alpha y_n$, $x_n \rightarrow x$, $y_n \rightarrow y$, то $\alpha(x) = \alpha(y)$.

Так как

$$\alpha(x_n - y_n) = \alpha(x_n) - \alpha(y_n),$$

то

$$\begin{aligned} \alpha(x_n - y_n) &= 0, \\ \alpha(x - y) &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Обозначим $x_n - y_n = b_n$, $x - y = b$. Очевидно, что $b_n \rightarrow b$, а $\alpha(b_n) \rightarrow \alpha(b)$, т. е. функционал α непрерывен и с учетом условия (12) линейен. Таким образом, L — морфизм. Заметим, что R^1 совпадает с линейной оболочкой $\alpha(x)$, следовательно, L — эпиморфизм [1]. Формула (8) доказана.

Пусть теперь имеет место (8). Покажем, что в этом случае условия (1'), (2), (3) выполняются.

Так как $L \neq 0$, существует $a' \in R^n$, для которого $La' \neq 0$. Элемент $a = \frac{1}{La'} a'$ удовлетворяет условию (1'). Действительно, $La = 1$ и имеет место равенство

$$Lx = L((Lx) a). \quad (14)$$

Принимая $Lx = \alpha x$, с учетом биективности f получим условие (1').

Допустим, что существует другое $S(x)$, удовлетворяющее равенству (8), т. е. с учетом биективности f

$$Lx = L(Sa). \quad (15)$$

Так как $Lx = SLa$ и $La = 1$, то $S = Lx$, т. е. выбор для данного a функционала $\alpha(x)$ является единственным, и условие (1') следует из модели (8).

Выполнение условий (2) и (3) очевидно.

Если моделируемый объект удовлетворяет условиям (1'), (2), (4), то он описывается уравнением (8). Действительно, из условий (1'), (2) и (4) следует, что L — эпиморфизм, а биективность f доказана выше.

Покажем, что свойство (4) следует из модели (8). Пусть $Fx = Fy$. Из биективности f следует, что $Lx = Ly$, т. е. $L(\lambda x) = L(\lambda y)$, где λ — произвольное вещественное число. Воспользовавшись снова биективностью f , получим $F(\lambda x) = F(\lambda y)$. Условие (4) выполняется.

Свойство (5) для случая, когда множество входных сигналов N совпадает с R^n , представляет собой иную запись условий (2) и (4).

Свойства (1'), (2), (6) также достаточны для того, чтобы моделируемый объект описывался уравнением (8). Из линейности Lx для конечномерного пространства следует ограниченность $\alpha(x)$ [1].

Воспользовавшись общим видом линейного функционала, запишем математическую модель (8) в виде

$$F = f(xk), \quad (x, k \in R^n). \quad (16)$$

II. Пусть множество входных сигналов N совпадает с положительным конусом $K \subset R^n$.

Предположим, что на конусе K выполняются свойства (1'), (2). Это значит, что функционал $\alpha(x)$ определен на K , аддитивен, положителен, монотонен, непрерывен. Так как конус K воспроизводящий, то функционал α ограничен и однозначно продолжится до положительного линейного функционала, заданного на всем пространстве R^n равенством [2]:

$$\alpha(x) = \alpha(u) - \alpha(v), \quad (17)$$

где

$$x = u - v, \quad (u, v \in K, x \in R^n).$$

Исходя из общего вида положительного функционала в R^n , имеем (8), где $k \in K$.

Полнота модели была доказана выше.

III. Рассмотрим теперь случай, когда входные сигналы составляют не весь положительный конус, а только его часть, т. е. $N \subset K$.

Без уменьшения общности можно принять, что N ограничено частью шара $D(\Theta, \rho)$, где Θ — центр шара, ρ — его радиус. Из условий (1'), (2) следует, что на множестве N функционал α аддитивен, непрерывен (однороден, ограничен), положителен. Для простоты будем считать $\rho = 1$. Продолжим функционал α на весь положительный конус по однородности, т. е. определим α следующим образом:

$$\alpha(\lambda x) = \lambda \alpha(x), \quad x \in K, \lambda \geq 0. \quad (18)$$

Можно показать, что продолженный функционал аддитивен на конусе K .

Таким образом, в результате продолжения функционала на положительный конус получен линейный функционал, заданный на конусе K , распространение которого на все пространство показано выше. Докажем, что условие (1') следует из модели (8).

Выберем $a' \in N$ таким образом, что

$$\alpha(a') = \sup_{x \in N} \alpha(x) = c. \quad (19)$$

Это возможно вследствие непрерывности $\alpha(x)$ и компактности множества N [1]. Из ограниченности $\alpha(x)$ следует, что $\alpha(a') \leq A$.

Пусть $\alpha(a') > 1$. Выбрав $a = \frac{a'}{c}$, а также учитывая, что

$$\alpha(x) \leq \alpha(a'), \quad (20)$$

получим $\alpha(x)a \leq \alpha(a')a$, т. е. $\alpha(x)a \in N$.

Условия (2) — (6) с очевидностью следуют из модели (8).

Б. Рассмотрим случай, когда пространство входных сигналов принадлежит R^n , а множество выходных сигналов биективно связано с R^m ($m < n$).

В работе [3] показано, что из условий 1) — 3) следует математическая модель (8), в которой $L: R^n \rightarrow R^m$ — эпиморфизм линейных пространств.

Выше указывалось, что из условий 1) и 2) следует математическая модель (8) в случае, если пространство входных сигналов представляет собой положительный конус $K \subset R^n$. Вывод модели для случая $L: R^n \rightarrow R^m$ остается тем же, если принять во внимание, что рассуждения следует вести не для одного α , а для набора вещественных чисел α_i ($1 \leq i \leq m$). Это следует иметь в виду, если пространство входных сигналов составляет ограниченную часть положительного конуса.

В. Пусть множество входных сигналов N принадлежит линейному нормированному пространству l_p ($p > 1$), элементами которого являются числовые последовательности $x = (\xi_1, \xi_2, \dots)$, если сходится ряд $\sum_{i=1}^{\infty} |\xi_i|^p$. Множество выходных сигналов M принадлежит одномерному пространству R^1 .

I. Рассмотрим случай, когда множество N совпадает с l_p ($p > 1$). Аналогично предыдущему можно показать, что математическая модель (8), где L — непрерывное линейное отображение l_p в R^1 , эквивалентна системам условий (1'), (2), (3) и (1'), (2), (6).

Условия (1'), (2), (4) недостаточны для вывода модели (8), так как в бесконечномерных пространствах из линейности какого-либо преобразования еще не следует его непрерывность.

Модель (8) вытекает из условий (1'), (2), (4), (7) или (1'), (5), (7). Действительно, по условию (7) гиперплоскость $\{x | Lx = c\}$ замкнута. В этом случае линейный функционал непрерывен [2]. Полнота математической модели (8) по отношению к этим системам условий очевидна.

Воспользовавшись общим видом линейного непрерывного функционала в пространстве l_p ($p > 1$), получим, что для произвольного $x = (\xi_1, \xi_2, \dots) \in N$

$$Fx = f\left(\sum_{i=1}^{\infty} \xi_i \eta_i\right), \quad (21)$$

где $y = (\eta_1, \eta_2, \dots)$ — произвольный элемент из сопряженного пространства l_q ($q = \frac{p}{1-p}$).

II. Часто входные сигналы удобно интерпретировать как элементы положительного конуса $K \subset l_p$ ($p > 1$).

Пусть множество N совпадает с K . Так как в l_p конус K воспроизводящий [2], то, как и в конечномерном случае, из условий (1') и (2) следует математическая модель (8), где L — положительный линейный непрерывный функционал, заданный на l_p .

Исходя из общего вида положительного линейного непрерывного функционала в l_p ($p > 1$), получим равенство (21), где $y = (\eta_1, \eta_2, \dots)$ — произвольная неотрицательная последовательность из l_q .

III. Допустим, что множество входных сигналов N — ограниченная часть положительного конуса $K: x \in N$, если $\theta \leq x \leq b$ ($b \in K$).

Из условий (1'), (2) следует модель (8), где $Lx = \alpha x$ — положительный, аддитивный и однородный на N функционал, причем $\sup_{x \in N} \alpha(x) \geq 1$.

Полнота модели доказывается, как и в случае конечномерного пространства (п. А. III), если учесть, что образом N является компактное множество — отрезок $[0, \alpha(b)]$, т. е. существует $\sup_{x \in N} \alpha(x) = \alpha(b)$.

Продолжим функционал $\alpha(x)$ на весь положительный конус следующим образом: $\alpha(y) = t\alpha(x)$, если

$$y = tx \ (y \in K, x \in N, t > 0).$$

Функционал $\alpha(y)$ однозначно определен на K и не зависит от выбора представления для $y \in K$. Кроме того, можно показать, что $\alpha(y)$ — аддитивный функционал.

Функционал допускает продолжение до положительного линейного непрерывного функционала, определенного на всем пространстве l_p ($p > 1$). Математическая модель принимает вид (21), где $y = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots\}$ — элемент из положительного конуса $K' \subset l_q$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Е. Шялов. Конечномерные пространства. Изд-во «Наука», 1969.
2. Н. Я. Виленин и др. Функциональный анализ. Изд-во «Наука», 1964.
3. Ю. П. Шабанов-Кушнаренок, Ю. С. Марченко, М. Ф. Бондаренко. Математическое описание функционирования вкусового анализатора человека. Сб. «Проблемы бионики», вып. Б. Изд-во Харьковск. ун-та, 1970.

ОПТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕТЕКТОРА ОРИЕНТИРОВАННЫХ ОТРЕЗКОВ ЗРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА ЖИВОТНЫХ

В. А. Бахтигозин, Ю. П. Бугай, В. Г. Червов

В настоящее время широко распространились исследования в области бионики, рассматривающие воспроизведение в технических устройствах функциональных и структурных особенностей различных нервных систем животных, которые обеспечивают высокую эффективность процессов переработки информации. Данные исследования нервных систем на структурном и функциональном уровнях, в частности, систем зрительного анализатора, позволяют утверждать, что уже в низших отделах нервной системы на первоначальной стадии обработки информации достаточно четко можно различать операции анализа и синтеза сигналов и соответствующие этим операциям первичные структуры. Операции анализа сигналов, заключающиеся в выделении некоторого набора специальных признаков, можно отнести к процессам предварительной, первичной переработки информации.

Физиологические предпосылки моделирования детекторов признаков

Данные, касающиеся структуры и функций зрительного анализатора, свидетельствуют о большой сложности последнего. Детальное описание даже наиболее простых структур сетчатки при условии учета всех наблюдаемых в сетчатке особенностей в настоящее время невозможно или из-за своей громоздкости практически нецелесообразно.

Важным результатом исследований зрительного анализатора было установление факта существования на всех его уровнях специфических групп клеток — рецептивных полей, являющихся, по существу, следующей после отдельного нейрона более крупной единицей структуры нервной системы. С другой стороны, биологические исследования все убедительнее

тельное подтверждают представление о зрительном анализаторе как о сложной системе, состоящей из специфических фильтров, детекторов некоторых существенных признаков. Биологической структурой, реализующей функции этих фильтров-детекторов, и являются различные рецептивные поля [1, 2]. Так, например, рецептивные поля ганглиозных клеток сетчатки глаза животных описываются биологами в виде круговых зон с центральной областью клеток, дающих положительную реакцию на увеличение освещенности (оп-центр) и кольцевой областью клеток, концентрически расположенных по периферии и дающих отрицательную тормозящую реакцию (так называемая off-периферия). Круговые рецептивные поля могут встречаться и с off-центром, и с оп-периферией. Такого типа рецептивные поля обнаружены в сетчатке глаза и наружном коленчатом теле мозга животных. Самостоятельно эти поля реализуют функцию детектора границы освещенности любой ориентации либо детектора контура.

Рецептивные поля элементов зрительной коры головного мозга высокоорганизованных животных имеют удлиненную форму и потому чувствительны к определенной ориентации стимула, т. е. могут реализовать функцию детектора направленных отрезков, ориентированных границ освещенности и т. д.

Предполагается, что в зрительной коре одинаково представлены все направления [3]. По своему принципу действия рецептивные поля представляют биологические устройства, приближенно реализующие функцию пространственного изотропного или анизотропного дифференцирования либо интегрирования.

Оптическая модель детектора ориентированных отрезков

В качестве физических моделей рецептивных полей могут быть использованы телевизионные или оптические системы. На основе последних путем применения апертуры специальной формы можно получать пространственно-временные фильтры с самыми различными весовыми функциями.

Оптические системы, обладающие благодаря своей природе двумя степенями свободы, по сравнению с телевизионными имеют ряд преимуществ: они позволяют выполнять двумерные преобразования без сканирования; кроме того, специальные (так называемые анаморфозные) оптические системы дают возможность осуществить ряд последовательных двумерных преобразований Фурье [4].

Анаморфозными называют такие оптические системы, которые создают трансформированные изображения, т. е. в отличие от оптических систем круговой симметрии позволяют получить изображение с различным масштабом в двух взаимно-перпендикулярных направлениях, например, растяжением в одном направлении и сжатием в другом. К числу таких систем двойкой симметрии относятся, например, цилиндрические и торические.

Свойство цилиндрических линз трансформировать изображение может быть использовано для построения фильтра-детектора ориентированных отрезков. В качестве примера рассмотрим цилиндрическую линзу, одно из сечений которой (меридиональное) — прямолинейное, а второе (сагиттальное) — круговое. Такая линза имеет лишь две плоскости симметрии — вертикальную и горизонтальную и не обладает осью симметрии, как это наблюдается у светового пучка.

Если на цилиндрическую линзу направить параллельный пучок света, отраженный от какого-либо предмета, то при прохождении через

такую систему осевая симметрия преломленного луча нарушится, вследствие чего в любом сечении за цилиндрической линзой получится астигматическое изображение. Размеры изображения вдоль образующей линзы (по оси $Y-Y$) при этом сохраняются, но само изображение размывается вдоль оси, параллельной сагиттальному сечению линзы (рис. 1).

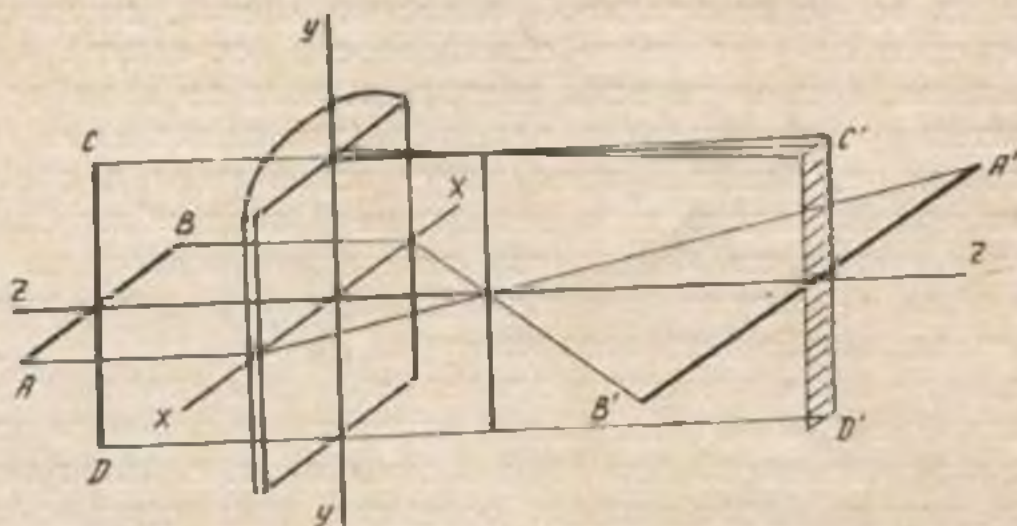


Рис. 1.

Линия AB в плоскости объекта, параллельная оси $X-X$, даст в плоскости изображения набор размытых изображений ее точек, так что освещенность изображения этой линии будет пропорциональна интегралу от яркости всех ее точек. Освещенность изображения полученного от вертикальной линии CD , будет существенно ниже, так как суммарный световой поток, идущий от объекта, в плоскости изображения распределится на площади, большей площади объекта вследствие эффекта размытия.

Такая трансформация изображения объекта приводит к преимущественному выделению (детектированию) отрезков, направление которых параллельно оси $X-X$ цилиндрической линзы. Поворачивая линзу в плоскости XY вокруг оси $Z-Z$, на экране можно последовательно получать четкие изображения отрезков различных направлений. Это говорит о том, что цилиндрическая линза является своеобразным пространственным фильтром ориентированных отрезков, передаточная функция которого зависит от угла поворота линзы.

Математическая модель оптического детектора ориентированных линий

Процессы первичной переработки зрительных сигналов, происходящие в системах, подобных сетчатке глаза, могут быть воспроизведены в наиболее естественной и наглядной форме с помощью непрерывных одномерных и многомерных моделирующих сред со специальными свойствами взаимодействия элементов среды.

Функциональное описание простейших нервных систем в терминах непрерывных сред позволяет использовать математический аппарат теории многомерных линейных фильтров.

При решении многих практических задач, возникающих при анализе и опознании двумерных изображений, достаточно оперировать только контурными изображениями объектов. Однако в каждом конкретном случае физической реализации изображений с помощью оптических или телевизионных систем необходимо учитывать конкретную форму весовых функций последних. Можно интуитивно полагать, что способ физического представления (рисунок, фотография, телевизионное изображе-

ние) не имеет существенной связи с геометрической формой контурного изображения, поэтому часто возникает необходимость оперирования абстрактными геометрическими объектами в виде бесконечно тонких линий некоторой определенной формы.

В частности, преобразования двумерных изображений с помощью любых линейных операторов могут быть описаны в виде соотношения

$$U(x, y) = \iint_1 Q(x - \xi, y - \eta) E(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (1)$$

представляющего собой двумерный аналог интеграла Дюамеля [5], где $E(\xi, \eta)$ — произвольное двумерное возмущение; $Q(x - \xi, y - \eta)$ — двумерная весовая функция; $U(x, y)$ — реакция двумерной системы. Произвольное двумерное возмущение $E(\xi, \eta)$ в соотношении (1) представляет собой функцию, описывающую двумерное изображение с реальным распределением яркости элементов изображения, а весовая функция $Q(x - \xi, y - \eta)$ — закон размытия (расфокусировки) каждого точечного элемента изображения.

Можно допустить, что весовая функция реальной цилиндрической линзы для целей качественного выяснения ее функциональных особенностей достаточно точно аппроксимируется бесконечно тонкой линией-штрихом конечных длины и «яркости», т. е. каждая точка изображения размывается в штрих конечной длины и яркости. Это соответствует расфокусировке на определенную величину точек изображения на некотором фиксированном расстоянии от фокуса цилиндрической линзы.

Весовая функция, соответствующая преобразованию точки в штрих длиной $2a$ с заданной ориентацией, может быть описана выражением

$$Q(x - \xi, y - \eta) = \delta[(x - \xi) \sin \alpha + (y - \eta) \cos \alpha] \times \\ \times \{1[(x - \xi) \cos \alpha - (y - \eta) \sin \alpha + a] - 1[(x - \xi) \cos \alpha - (y - \eta) \sin \alpha - a]\}, \quad (2)$$

где α — угол наклона штрих-фокуса к оси абсцисс.

В качестве возмущения рассматриваем светлую бесконечно тонкую прямую линию на темном фоне, произвольно ориентированную относительно направления штрих-фокуса цилиндрической линзы

$$E(\xi, \eta) = \delta(\xi \sin \beta + \eta \cos \beta), \quad (3)$$

где β — угол наклона возмущающей прямой линии к оси абсцисс.

Подставляя весовую функцию (2) и возмущение (3) в соотношение (1), получим

$$U(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} \delta[(x - \xi) \sin \alpha + (y - \eta) \cos \alpha] \{1[(x - \xi) \cos \alpha - (y - \eta) \sin \alpha + a] - 1[(x - \xi) \cos \alpha - (y - \eta) \sin \alpha - a]\} \delta(\xi \sin \beta + \eta \cos \beta) d\xi d\eta. \quad (4)$$

Используя свойство четности и фильтрующие свойства δ -функции [6], запишем выражение (4) реакции двумерной системы в иной форме:

$$U(x, y) = \operatorname{cosec}(\alpha - \beta) \{1[x \sin \beta + y \cos \beta - a \sin(\alpha - \beta)] - 1[x \sin \beta + y \cos \beta + a \sin(\alpha - \beta)]\} \quad (5)$$

или

$$U(x, y) = A \left\{ 1 \left[x \sin \beta + y \cos \beta - \frac{\Delta}{2} \right] - 1 \left[x \sin \beta + y \cos \beta + \frac{\Delta}{2} \right] \right\}, \quad (6)$$

где $A = \operatorname{cosec}(\alpha - \beta)$ — амплитуда реакции системы, зависящая только от разности углов $(\alpha - \beta)$, т. е. от взаимной ориентации штрих-фокуса и возмущающей прямой линии; Δ — зависящая только от разности углов $(\alpha - \beta)$ ширина полосы, в которой имеет место реакция с амплитудой $A = \operatorname{cosec}(\alpha - \beta)$.

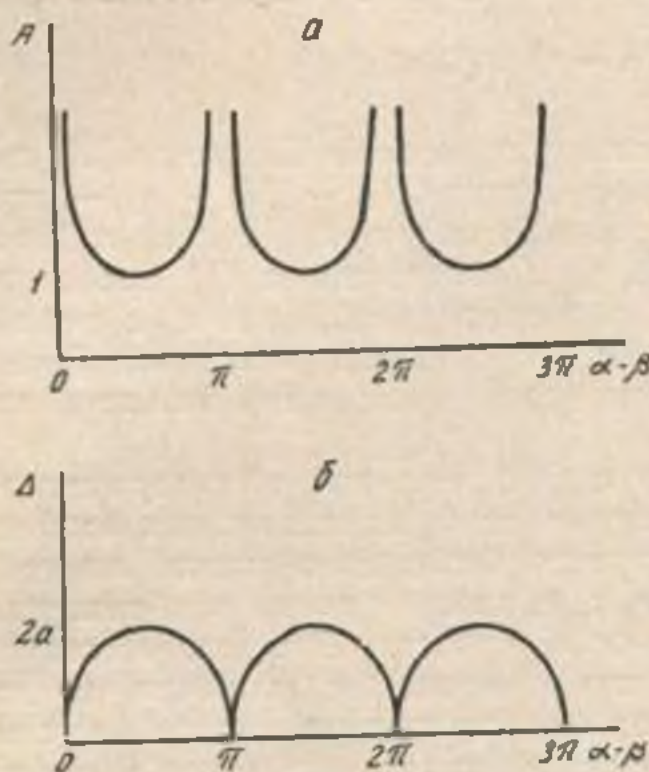


Рис. 2.

На рис. 2, а и б представлены графики изменения амплитуды реакции системы и ширины полосы соответственно в месте приложения возмущения в зависимости от взаимной ориентации возмущающей прямой и штриха расфокусировки цилиндрической линзы. Реакция системы максимальна и сосредоточена вдоль прямой линии только при совпадении ориентации штриха и возмущающей прямой. Для других значений угла $(\alpha - \beta)$ реакция рассредоточена на большей площади и имеет меньшую амплитуду. Очевидно, что криволинейные участки элементов объекта не дадут анизотропного суммирования в одном из преимущественных направлений и на выходе системы в плоскости изображения цилиндрической линзы будут размыты.

Таким образом, оптическая система, включающая цилиндрическую линзу, может быть использована в качестве фильтра ориентации прямолинейных отрезков предъявляемого объекта.

Оптический вариант детектора ориентированных линий, реализованный с помощью цилиндрической линзы, возможно рассматривать в качестве одного из примеров реализации биологических анизотропных фильтров. Применение оптических линз специальной формы открывает широкие возможности для получения целого ряда фильтров-детекторов признаков практически мгновенного действия. Ближайшей задачей в этом направлении станет поиск специальных конфигураций линз, с помощью которых можно было бы осуществить ряд важных преобразований зрительных изображений с целью выделения различных существенных признаков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Бернс. Неопределенность в нервной системе. Изд-во «Мир», 1969.
2. Д. Вулдридж. Механизмы мозга. Изд-во «Мир», 1965.
3. D. H. Hubel, T. N. Wiesel. Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. Journal of physiology, 1 (1962).
4. Б. Н. Бегунова. Трансформация оптических изображений. Изд-во «Искусство», 1965.
5. Н. С. Шестов. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. Изд-во «Сов. радио», 1967.
6. В. С. Владимиров. Уравнение математической физики. Изд-во «Наука», 1967.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРАНСФОРМАЦИИ УГЛОВЫХ ВЕЛИЧИН В ВИДИМЫЕ

Я. Я. Белик

Зрительное восприятие представляет собой многоуровневую деятельность [1]. В настоящее время возможно выделение разных уровней исследования. Изучение на психологическом уровне показывает связь между внешним раздражителем и ощущением. Это дает возможность предсказать ощущение субъекта, вызванное определенным раздражителем. Однако детальные стороны процесса остаются нераскрытыми. С этой целью возможно разбиение психофизического уровня исследования восприятия на оптический, физиологический и психофизиологический подуровни.

На оптическом подуровне рассматривается связь между угловыми величинами ориентира-раздражителя и изображением его на сетчатке, на физиологическом — между топографией раздражения на сетчатке и нейронными сигналами, идущими в мозг, на психофизиологическом подуровне — взаимосвязь между нейронными сигналами, несущими информацию об ориентире-раздражителе и психическим образом ориентира-раздражителя. Исследование последнего подуровня представляет, очевидно, наибольшую сложность.

В данном сообщении используется психофизический подход для изучения восприятия угловых величин (угловых скоростей), рассматривается модель трансформации угловых величин в видимые с учетом пороговых свойств зрительного анализатора на примере восприятия аксиально-симметричного кольцеобразного зрительного поля.

Как известно, зрительный анализатор может дифференцировать лишь угловые величины, являющиеся носителем информации [2]. Если бы не было дополнительных механизмов, дающих информацию, параллельную получаемой от сетчатого образа, однозначное толкование воспринимаемых сигналов оказалось бы невозможным. Такими дополнительными механизмами в случае константного восприятия являются конвергенция, аккомодация, бинокулярный параллакс, а также знание наиболее важных характеристик ориентира (таких, как линейный размер), полученных благодаря работе кожного и двигательного анализаторов.

В случае аконстантного восприятия дополнительными механизмами являются бинокулярный параллакс и знание характеристик ориентира. Эти механизмы формируются у человека прижизненно и в совокупности дают возможность правильно ориентироваться в трехмерном пространстве [3].

Поскольку угловые величины ориентиров важны для ориентации в пространстве, остановимся на них подробнее. Субъективным выражением угловых величин являются видимые величины. Пороговые свойства зрительного анализатора проявляются в том, что две достаточно мало различающиеся угловые величины воспринимаются анализатором как одинаковые. Следовательно, анализатор осуществляет преобразование непрерывного континуума угловых величин в дискретный континуум величин. Пороговые свойства принципиальны и присущи анализатору, как и всякому техническому воспринимающему устройству.

Получить в общем виде модель трансформации угловых величин предъявляемого зрительного поля в видимые величины из-за бесконечного многообразия зрительных полей невозможно. Исходя из этого, будем вести рассмотрение для вполне конкретных распределений угловых величин (угловых скоростей и собственно углов).

Рассмотрим зрительное поле угловых скоростей кольца соответственно с внутренним и внешним радиусами R_i и R_k , обусловленное относительным движением оператора и перпендикулярное плоскости кольца, а также найдем условие, при котором видимая скорость точек кольца будет одной и той же. Можно показать, что для всех точек, лежащих на окружности радиуса R , зрительное поле угловых скоростей относительно оператора определяется соотношением

$$\omega \frac{h}{\sin \gamma} [\vec{e}_1 \times \vec{e}_2] = u \cos \gamma \vec{e}_3, \quad (1)$$

где ω — угловая скорость точек окружности,

h — удаленность от оператора до центра кольца (по перпендикуляру к плоскости кольца);

γ — угол визирования окружности радиуса R (угол между направлением линии визора на точку окружности и плоскостью кольца);

u — величина скорости оператора относительно кольца;

$\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ — единичные векторы в направлении соответственно угловой скорости, линии визора и направлении, перпендикулярном линии визора.

Следовательно, для точек кольца, лежащих на граничных окружностях с радиусами R_i и R_k , величины угловых скоростей составляют

$$\omega_i = \frac{u}{2h} \sin 2\gamma_i, \quad (2)$$

$$\omega_k = \frac{u}{2h} \sin 2\gamma_k.$$

Рассмотрим изменение угловых скоростей, вызванное лишь изменением угла визирования.

Согласно закону Вебера—Фехнера, для одномерно варьирующихся стимулов [4] в среднем диапазоне их значений относительное пороговое изменение должно оставаться постоянным (здесь наблюдается лишь изменение угловой скорости по радиусу). Поэтому, чтобы на ширине кольца $\Delta R_{ik} = R_k - R_i$ получалось лишь одно пороговое изменение угловой скорости точек этого кольца, необходимо выполнение условия

$$\left| \left(\frac{\Delta \omega}{\omega} \right)_{ik}^{\text{пор}} \right| = \left| \frac{\sin 2\gamma_k}{\sin 2\gamma_i} - 1 \right| = \text{const}. \quad (3)$$

Константа в (3) характеризует условия восприятия и может быть определена экспериментально.

В случае, если изменение угла визирования $|\Delta \gamma|_{ik}^{\text{пор}} = |\gamma_k - \gamma_i|^{\text{пор}}$ соответствует пороговому изменению угловой скорости и не слишком большое (например, не больше одной четверти радиана, что для подавляющего большинства реальных систем превышает пороговое $|\Delta \gamma|_{ik}^{\text{пор}}$, уравнение (3) переходит в

$$\text{const} = \left| \left(\frac{\Delta \omega}{\omega} \right)_{ik}^{\text{пор}} \right| = 2 \left| \text{ctg } 2\gamma (\Delta \gamma)_{ik}^{\text{пор}} - (\Delta \gamma)_{ik}^2 \right|. \quad (4)$$

Это соотношение отличается от (3) членами порядка малости более высокого, чем $\Delta \gamma_{ik}^{\text{пор}}$ и $(\Delta \gamma_{ik}^{\text{пор}})^2$.

Для $\gamma = 30^\circ$ и $\Delta \gamma = \frac{1}{4}$ сумма этих членов составляет по отношению к главным членам лишь 14%. Таким образом, все качественные результаты можно получать всегда из уравнения (4).

Из выражения (3) следует, что если ширина кольца ΔR_{ik} видна оператору с расстояния h под углом $|\Delta\gamma_{ik}| = |\gamma_k - \gamma_l|$

$$|\Delta\gamma_{ik}| = \left| \frac{1}{2} \arcsin \sin 2\gamma_l [\cos 2\gamma_l (1 \pm \text{const}) \pm \sqrt{1 - (1 \pm \text{const}) \sin^2 2\gamma_l}] \right|, \quad (5)$$

то видимая скорость всех точек кольца будет одинакова. Верхний знак в этом выражении относится к области определения угла визирования $\gamma_l > 45^\circ$, а нижний — к $\gamma_l < \gamma_0 = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{1}{1 + \text{const}}$.

Нетрудно показать, что величина угла $\Delta\gamma_{ik}$, соответствующая пороговому изменению угловой скорости, изменяется от очень малых значений для малых углов визирования до максимального значения при $\gamma = 45^\circ$ с последующим уменьшением вновь до малых значений при $\gamma = 90^\circ$.

Поскольку угловые скорости в кольце ik , который виден под углом $|\Delta\gamma_{ik}|$, соответствующим пороговому изменению угловой скорости, распределены как

$$\omega = \frac{u}{2h} \sin 2\gamma,$$

где γ — любой угол, принадлежащий области $\gamma_k < \gamma < \gamma_l$, то математическая модель процесса трансформации аксиально-симметричного зрительного поля угловых скоростей точек кольца в зрительное поле одинаковой видимой скорости представится в виде

$$\omega_{ik}^{\text{вид}} = \omega \frac{\gamma_{ik}}{\sin 2\gamma}. \quad (6)$$

В этой модели $\gamma_{ik} = \text{const}$ для данного кольца и определяется углом визирования, причем величина h_{ik} такова, что $\sin 2\gamma_k < h_{ik} < \sin 2\gamma_l$ для $\gamma_l < 45^\circ$ и $\sin 2\gamma_l < h_{ik} < \sin 2\gamma_k$ для

$$\gamma_l > \gamma_0 = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{1}{1 + \text{const}}$$

Видимая скорость в (6) определяется линейной скоростью оператора и относительно плоскости кольца удаленностью h и константой γ_{ik} , зависящей от угла визирования, т. е. при заданных u , $\gamma_l \Delta R_{ik}$ лишь одной высоте соответствует зрительное поле с единой видимой скоростью всех точек кольца.

Рассматриваемая модель представляет практический интерес с точки зрения оценки удаленности оператора от поверхности Земли.

Математическая модель (6) получена из сравнения угловых скоростей двух точек и справедлива для кольца с радиусами R_l и R_k . Любой плоский и линейный ориентир, лежащий по направлению радиуса, можно представить как часть кольца. Поэтому, так как все точки кольца имеют одинаковую видимую скорость лишь при одной единственной высоте, есть основание считать, что точки отличающихся размерами ориентиров имеют одинаковую видимую скорость на разных высотах. Эта взаимно-однозначная связь представляет в распоряжение оператора один из способов оценки удаленности до поверхности Земли.

Итак, рассмотрена математическая модель процесса трансформации угловых скоростей в видимую скорость. При этом описаны пути практического применения этой модели для восприятия удаленности до поверхности Земли. Фактически указан угол визирования, под которым ориентир должен быть виден таким образом, чтобы видимая скорость его точек была одинаковой.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Леонтьев. Насущные задачи психологической науки. «Коммунист», 1968, № 2.
2. В. Я. Дымерский. Метод количественного анализа восприятия пространственных и пространственно-временных отношений. Сб. «Инженерная психология». Изд-во МГУ, 1964.
3. А. Н. Леонтьев. Проблемы развития психики. Изд-во «Мысль», 1965.
4. Ф. Кликс. Проблемы психофизики восприятия пространства. Изд-во «Прогресс», 1965.

АССОЦИАТИВНО-СЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ПАМЯТИ

СООБЩЕНИЕ II*

Э. Т. Головань, А. Н. Лук

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ. НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ МОДЕЛИ

Нейронные ансамбли

Психологическим понятиям «образ» и «представление» соответствуют нейрофизиологические корреляты, однако до сих пор неизвестно, какие именно. Без сомнения, в основе их лежит деятельность нервных клеток. Предстоит выяснить процесс взаимодействия и группировки нейронов с целью образования в мозгу структуры — коррелята психологических феноменов.

Свойства таких нейронных структур должны существенно отличаться от свойств самих нейронов, представляющих лишь элемент этих структур. Необходимо показать, что свойства упомянутых гипотетических структур не только не противоречат экспериментально обнаруженным свойствам нервных клеток, а напротив, являются их следствием.

Дональд Хебб (Hebb, 1949) одним из первых попытался показать, каким образом в процессе функционирования мозга нейроны непременно объединяются в более крупные рабочие блоки [1]. Хебб исходит из того, что мозг состоит из большого числа нервов клеток, связанных между собой. Все связи равнозначны (эквипотенциальны), а совокупность нейронов представляет собой сеть. Нейроны связаны случайно («наугад»), каждый из них имеет вход и выход. Хебб показал, что в процессе функционирования такая сеть непременно дифференцируется, нейроны объединяются в группы, скопления, возбуждающиеся одновременно и совместно. Эти скопления Хебб назвал ансамблями. В то же время происходит и размежевание. Одни ансамбли обособляются от других, вследствие чего возникает некоторая функциональная специфичность ансамблей. Характерно, что дифференциация не привносится извне. Она возникает в результате функционирования самой сети.

Для определения свойств элементов сети, обеспечивающих образование в ней ансамблей, Хебб вводит 4 постулата.

1. *Каждый нейрон может находиться в двух состояниях — возбужденном и неактивном. Переход в возбужденное состояние зависит от числа импульсов, которые приходят к данному нейрону от разных источников. При этом отмечается «критическое время суммации». Если, к примеру, интервал между импульсами составляет 5 мсек, то импуль-*

* Э. Т. Головань, А. Н. Лук. Ассоциативно-сетевая модель памяти. Сообщение I см. в сб.: «Проблемы бионики», вып. 4. Изд-во ХГУ, 1970.

сы суммируются, и их сумма может превысить порог, необходимый для того, чтобы нейрон возбудился. При разнице 6 мсек суммация не происходит, а импульс действует «в одиночку» или суммируется с последующими импульсами, которые придут не позже 5 мсек.

2. Синапсы меняют свою проводимость. Повторное срабатывание происходит легче, чем первое. При частом использовании «сопротивление» синапсов уменьшается.

3. Нейрон в рефрактерном периоде не реагирует на импульсы и не возбуждается.

4. Длительное повторяющееся возбуждение приводит к утомлению. Допустим, группа клеток активируется раздражителем А. Другие группы клеток активируются иными раздражителями (В, С и т. д.). Существуют нейроны, которые входят сразу в несколько групп. Хебб показал, что при этом формируются ансамбли, для которых характерно: а) реципрокное влияние, т. е. возбуждение одного ансамбля одновременно тормозит возбуждение другого; б) фазовая последовательность, сущность которой заключается в том, что при возбуждении одного ансамбля (А) возникает наибольшая вероятность возбуждения следующим ансамблем В, после В — С и т. д. Это и есть основа обучения сети: случайная организация превращается в систему ансамблей.

Восприятие, по Хеббу, происходит следующим образом. Раздражитель (например, зрительный) вызывает в коре возбуждение группы нейронов (так называемая первичная зрительная проекция). Связи этой проекции носят случайный характер, что объясняется изменением порогов возбудимости нейронов во времени в зависимости от давности последнего раздражения постсинаптического нейрона. Но при повторном действии того же раздражителя, особенно если это действие наступит скоро, вновь возбудится та же группа клеток, точнее, вероятность их совместного возбуждения возрастет. Так постепенно формируется ансамбль.

Хебб объясняет своей моделью феномен «последовательности раздражителей»: раздражитель А, если за ним следует раздражитель В, вызывает ответ С. Но ни А, ни В, действующие порознь, не вызывают эффекта С. Существует два объяснения этого феномена. Первое из них — гипотеза активных следов — исходит из предположения, что часть нейронов ансамбля продолжает выдавать импульсы, хотя основная часть ансамбля «молчит», поскольку ансамбль В уже возбужден. Второе — гипотеза латентных следов — исходит из предположения, что после возбуждения ансамбля в его клетках остаются физико-химические следы — снижение порога возбудимости, которое удерживается несколько секунд. Значит, надо учитывать не только раздражители, действующие в настоящий момент, но и следовые процессы. Ансамбль, который получал «подготовку», т. е. импульсы от другого ансамбля, не вызвавшие возбуждения, в следующий момент возбудится с большей вероятностью, чем ансамбль, не получавший «подготовки».

В теории Хебба есть парадокс, заключающийся в том, что клеточные ансамбли могут объединяться, но при этом не теряют своей индивидуальности, хотя и входят в более сложную коалицию. При таком объединении не отдельные клетки устанавливают связи с другими, а клетки с пониженным порогом, «подготовленные» первым ансамблем, входят в состав второго. Принцип обучения — объединение клеток в группу путем повторного одновременного возбуждения — играет двоякую роль. Когда вновь включенные в группу клетки предварительно подготовлены (путем снижения порога) сенсорным входом, наблюдается перцептивное обучение, или обучение путем восприятия. Но если эта

подготовка новых клеток вызвана не сенсорным входом, а импульсацией с другого ансамбля, то имеет место ассоциативное обучение.

Поскольку эффект подготовки длится несколько секунд, то ансамбль может накапливать результаты воздействия ассоциированных с ним ансамблей и при этом постепенно увеличивается вероятность того, что он сам возбудится.

Недостатки системы Хебба следующие:

1) не предусмотрено торможение нейронов, т. е. тормозные импульсы, а нейрон может быть только возбужденным и невозбужденным, но не заторможенным;

2) система слишком быстро обучается, что нереально.

Поэтому П. Милнер [2] усовершенствовал и дополнил теорию Хебба.

Ансамбли Милнера

Главное отличие системы Милнера от системы Хебба состоит в том, что в первой постулирована функция торможения, которая ограничивает число одновременно возбужденных нейронов коры и в то же время обеспечивает возможность того, что возбужденные нейроны не станут группироваться в одном анатомическом очаге; ансамбль может состоять из нейронов, широко распределенных по сети.

К четырем постулатам Хебба Милнер добавил еще два.

1. *Существуют нейроны с длинными аксонами, которые осуществляют кортико-кортикальные связи; по длинным аксонам передается возбуждение.*

2. *Существуют нейроны с короткими аксонами; по коротким аксонам передаются тормозные влияния.*

Кроме того, Милнер вводит в свою модель неспецифическую «облегчающую систему», т. е. аналог ретикулярной формации. Эта система может облегчить передачу по длинным аксонам. В результате один нейрон активирует десять, каждый из которых, в свою очередь, еще по десять и т. д. Процесс лавинообразно мог нарастать и захватил бы вскоре всю сеть. Однако этого не происходит, потому что вступают в действие тормозные связи. Общая схема связей такова, что клетка *A* активирует те из них, которые тормозят не саму клетку *A*, а *B*, *C* и т. д., т. е. другие клетки. Возбуждение клетки *A* служит для нее автоматической защитой от торможения. Поэтому уровень активности нейронных ансамблей отличается устойчивостью.

Вначале ни одна клетка ансамбля не возбуждена, но наблюдается облегчающее действие неспецифической системы, которая делает возможным переход возбуждения с клетки на клетку. Затем одна клетка каким-то путем возбуждается. Возбуждение передается десяти другим клеткам, те в свою очередь активируют 100, потом 1000 и т. д. Однако распространение возбуждения быстро останавливается тормозными клетками. Наступает равновесие: лишь 10% импульсов возбуждаст другие нейроны. Если эта цифра возрастает, то будут включены дополнительные тормозные клетки, в результате чего равновесие восстановится. Если это число упадет ниже 10%, то число тормозных клеток уменьшится, а равновесие опять-таки будет восстановлено.

Необходимо, чтобы равновесие касалось определенной группы клеток и возбуждение в них циркулировало устойчиво, не распространяясь на другие клетки. Здесь как раз и важен постулат Милнера: клетка *A* активирует тормозные нейроны, которые тормозят клетки *B*, *C* и т. д., но не саму клетку *A*.

Наблюдается следующая картина: клетка возбудилась и передала возбуждение другим клеткам, затем от них получила импульс и возбудилась снова, поскольку сама защищена от тормозных влияний. Далее вновь она передает возбуждение другим клеткам, которые тоже защищены от тормозных влияний. Вся группа окажется устойчиво и длительно возбужденной. Даже если первоначальные клетки не имеют обратных связей непосредственно от тех клеток, которым они передали возбуждение, то все равно они получают импульсы от последующих клеток в цепи возбуждения, поэтому картина останется прежней.

Клеточный ансамбль возбуждается под действием раздражителя (это фаза прямого воздействия): данный раздражитель вызывает возбуждение данного нейронного ансамбля. Однако затем, после прекращения действия раздражителя, ансамбль все же остается возбужденным (фаза непрямого воздействия). Допустим, что в это время включился другой раздражитель — В. Если кора сильно возбуждена, то система игнорирует этот раздражитель. Соответствующий ему ансамбль не возбуждается, но снижается его порог. Когда же уровень возбуждения коры снизится, то новый раздражитель вызовет возбуждение «своего» ансамбля.

Возбуждение группы клеток устойчиво, но не вечно. Частота импульсов постепенно падает в результате *утомления*. Одновременно падает и частота тормозных импульсов. Поэтому возбуждение ансамбля угасает не сразу, не так быстро, но снижение частоты тормозных импульсов лишь до известных пределов компенсирует снижение частоты возбуждающих импульсов. Затем начинают «освобождаться» от тормозных влияний клетки, расположенные вне ансамбля. Они возбуждаются и принимают тормозить клетки ранее возбужденного ансамбля. В результате начинается циркуляция в другом ансамбле, а в первом — частично прекращается.

Клетки, однажды возбудившиеся совместно, сохраняют тенденцию к этому и повторно. Постулировано, что если один нейрон несколько раз возбуждал другой нейрон, то он становится затем для этого последнего более сильным возбуждающим агентом. Поэтому нейронный ансамбль возбуждается легче, чем случайная группа нейронов, не объединенных в ансамбль. Возбуждение даже небольшого числа нейронов данного ансамбля ведет к возбуждению всего ансамбля.

Существуют клетки, которые одновременно входят в несколько ансамблей. Поэтому последовательность возбуждения ансамблей зависит не только от последовательности действующих раздражителей, но и от установившихся внутренних связей между ансамблями в сети, т. е. от внутренней логики функционирования сети. На эту зафиксированную в сети последовательность накладываются ныне действующие раздражители, а результат определяется тем, как они взаимодействуют.

При действии одного и того же раздражителя не всегда возбуждаются одни и те же нейроны. Всегда на краю ансамбля имеется некоторая непостоянная, меняющаяся при повторных воздействиях одного и того же раздражителя бахрома. Состав ее обусловлен предшествующими раздражителями, метаболическими факторами и другими условиями, не зависящими от раздражителя. Эта бахрома играет важную роль в ассоциировании ансамблей.

Ассоциативное обучение есть объединение ансамблей в фазовую последовательность. Несущественно, каким образом возбуждается «начальная» группа нейронов ансамбля — от внешнего раздражителя или от другого ансамбля. Если достаточное число клеток ансамбля подготовлено, то сразу же после прекращения возбуждения предыдущего

ансамбля подготовленный ансамбль активируется. Связь между ансамблями устанавливаются следующим образом.

Допустим, последовательно, один за другим, несколько раз предъявлены раздражители *A* и *B*. Тогда ансамбль *A* определит бахрому ансамбля *B*, которая перестанет быть случайной. Клетки, подготовленные раздражителем *A*, будут входить в состав *B* во всех случаях, когда данные раздражители следуют друг за другом. Эти клетки «сильнее» свяжутся с ансамблем *B*, а затем войдут в его состав. Бахрома станет частью ансамбля, и ее возбуждение сможет вызвать возбуждение всего ансамбля. Однако эти клетки обычно так подготовлены раздражителем *A*, что им свойственна большая вероятность возбуждения по прекращении возбуждения ансамбля *A*. Так ассоциируются два ансамбля. Раздражитель *B* будет иметь преимущество перед другими, если он начнет действовать сразу после раздражения *A*.

Легкость и скорость ассоциирования зависят от «количества перцептуальных сведений», которые нужны для возбуждения ансамбля. Если 5% клеток могут возбудить весь ансамбль, то нужны связи с числом клеток меньшим, чем при критическом числе активации всего ансамбля — 20%. Однако требуется многократное повторение, прежде чем ансамбль сможет возбудиться ассоциативно, т. е. без своего специфического сенсорного раздражителя. Вот почему так важен контекст, фон. Возбуждение данной ассоциации требует, чтобы весь фон был таким же, как при обучении, потому что импульсация других ансамблей необходима для подготовки данного ансамбля.

Описанная система воплощает в себе механизм ассоциирования смежных во времени раздражителей. Мотивация влияет на этот процесс разными путями. Милнер рассмотрел два из них: а) увеличение скорости обучения; б) помощь в выработке ответов.

Мотивация связана с неспецифической проекционной системой. Коэффициент возбуждения, условно принятый равным 10 (одна клетка возбуждает десять других), на самом деле зависит от активности неспецифической проекционной системы и потому может изменяться. Если уровень возбуждения неспецифической системы низок, то этот коэффициент может упасть до 5 и еще ниже. При этом часть клеток, связанных с возбужденным нейроном, не возбудится, но будет подготовлена. Это предположение Милнера основано на современных нейрофизиологических данных, полученных Ли и Джаспером. Если неспецифическая система более активна, то это ускоряет и облегчает возбуждение ансамблей сети.

До сих пор речь шла о взаимоотношениях между действующими раздражителями. Но Миллер считает, что значительно важнее объяснить, как формируются ассоциации между раздражителем и ответом на него. Почему раздражитель иной раз вызывает ответ, а иногда не вызывает? В некоторых случаях это происходит потому, что не возбуждается нужная ассоциация. Иногда же человек знает, что именно следует сделать для достижения данной цели, но он недостаточно заинтересован в ней. Это уже вопрос мотивации.

Милнер принимает, что одновременно с возбуждением описанных ансамблей возбуждается множество двигательных нейронов. Мотонейроны «конкурируют» с постуральными рефлексам, поддерживающими позу. Поэтому мотонейроны при возбуждении вызывают двигательную реакцию лишь в том случае, когда частота импульсации превышает некоторый порог. Для этого необходимо действие неспецифической усиливающей системы.

Если мотивация связана с ожиданием наказания или поощрения, то

возбуждение неспецифической усиливающей системы зависит не от ныне действующего раздражителя, а от ансамбля, представлявшего мотивационный раздражитель (награду или наказание) в прошлом опыте. Этот ансамбль ассоциируется с тем ансамблем, который возбужден от ныне действующего раздражителя.

Нейронный ансамбль мотивационного раздражителя возбуждает неспецифическую систему, так как он в прошлом уже не раз возбуждал ее и нейронную сеть одновременно. Значит, внешний раздражитель по ассоциации возбуждает мотивационный ансамбль, а последний — неспецифическую систему. Для ясности Милнер разбирает этот случай на конкретном примере.

Крыса впервые взята для опытов в лабиринте. Новая обстановка — достаточно мощный раздражитель для возбуждения неспецифической системы. Поэтому мотонейроны возбуждаются настолько, что дают внешний выход: животное начинает поиски пути в лабиринте. Но вскоре новизна проходит, крыса перестает исследовать лабиринт и впадает в дремотное состояние. Однако если в конце лабиринта имеется пищевая приманка (раздражитель), а крыса достаточно голодна, то запах пищи вызовет возбуждение неспецифической системы. При этом ансамбль клеток, возбуждаемый в данный момент от пищевого раздражителя, ассоциируется со всеми другими возбужденными в это время ансамблями (общий вид лабиринта, вид посуды, в которой находится пища и т. д.).

В следующий раз пищевой ансамбль может быть возбужден уже без пищи, т. е. ассоциативно — один только вид лабиринта вызовет это возбуждение. От пищевого ансамбля возбудится и неспецифическая система, причем этот процесс длится достаточно долго — несколько минут. В течение данного срока мотонейроны получают импульсы выше пороговой величины и дают внешний выход в виде двигательного поведения. Однако, если крыса не голодна, этого может и не произойти: возбуждение не достигает достаточной силы.

Приведенный пример схематичен и упрощен. Более сложные формы поведения, связанные с избеганием приобретенных реакций и угасанием их, невозможно объяснить без дополнительных постулатов, в частности, без постулирования системы, тормозящей движение.

Смысл системы ансамблей Милнера и цель ее, по словам самого автора, — доказать возможность создания машин, которые сумеют не только «ожидать» заранее predetermined ситуации и «избегать» их, обучаться тому, что им следует делать в разных условиях. Будет ли конструкция таких машин похожа на организацию нервной системы животных — неясно. Ответ на такой вопрос требует проведения дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

1. Свойства ансамблей, или, по нашей терминологии, нейронных моделей, хотя и являются следствием свойств нейронов, но существенно отличаются от них.

2. Из подраздела «Нейронные ансамбли» вытекает, что свойства сетей, состоящих из ансамблеподобных элементов, должны отличаться от свойств сетей, состоящих из нейроподобных элементов.

3. Для моделирования памяти целесообразно воспользоваться сетями из ансамблеподобных элементов. Поскольку за первоначальный элемент построения модели мы принимаем слово, то основным элементом ассоциативной сети должен быть не нейрон, а ансамбль. Каким

образом из нейронов формируется ансамбль — для нас пока не существенно. Важно лишь, что такая возможность в принципе существует, как показали Хебб, Милнер и другие авторы [1—8].

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ. МОДЕЛЬ

Ассоциативная сеть

Элементами сетевой структуры памяти человека служат *узлы* и *связи*.

Узел рассматривается как элемент хранящейся информации, способной выступить в качестве члена ассоциации. Понятие «элемент информации» здесь является неразложимым. На уровне первой сигнальной системы таким элементом может быть образ любой модальности. Во второй сигнальной системе этим элементом является слово. Что касается физиологической интерпретации, то такой *узел*, возможно, представляет нейронный ансамбль, т. е. совокупность клеток, способных при известных условиях одновременно находиться в состоянии активности в течение некоторого промежутка времени. Доказательству существования подобных ансамблей посвящен ряд исследований, рассмотренных в предыдущем разделе.

Связь между узлами сетевой структуры рассматривается как ассоциативная связь между элементами информации. Весьма существенное значение имеют характеристики этой связи. Коэффициент K , характеризующий силу ассоциативной связи, представляет функцию частоты (встречаемости), т. е. объективной вероятности рассматриваемой ассоциативной пары. Но он также зависит и от времени, истекшего с момента последнего воспроизведения, биологической значимости, эмоционального фона и контекста. В ситуации, где элемент информации может ассоциироваться с несколькими другими, выбор второго члена ассоциативной пары обуславливается значениями коэффициентов K . Эти коэффициенты после соответствующей нормировки можно рассматривать как вероятность перехода возбуждения между инцидентными узлами.

Каждый из узлов сетевой структуры может находиться в одном из четырех состояний, обозначаемых как невозбужденное субвозбуждение и поствозбуждение. Число узлов, одновременно возбужденных, ограничено (не превышает десяти).

Возбужденное состояние узла модели соответствует воспроизведению хранящейся информации. Любой из узлов может быть переведен из невозбужденного состояния в возбужденное фактором, лежащим как внутри самой сети, так и вне ее, что соответствует свободному ассоциированию и восприятию. Пользуясь терминологией вычислительной техники, можно сказать, что рассматриваемая модель памяти относится к ассоциативно-адресному типу памяти с распределенной логикой, так как в ассоциациях содержатся определенные логические связи. Сеть считается заданной, если заданы все узлы и значения вероятностей связей между узлами. Элементарному акту парной ассоциации соответствует передача возбуждения от одного узла сети к другому. Возбуждение может быть передано лишь узлу, непосредственно связанному с возбужденным.

Введем некоторые определения. Последовательность связанных узлов, через которые прошло возбуждение, образует *траекторию*. Узлы, имеющие непосредственные связи с узлами, лежащими на траектории, образуют *русло* процесса.

Тактом работы модели называется время, необходимое для передачи возбуждения от одного узла к другому.

Рассмотрим основные преобразования, происходящие в окрестностях возбужденного узла. Последний из возбужденного состояния переходит в состояние поствозбуждения. Это состояние характеризуется тем, что узел не может быть возбужден и не должен возбуждать узлы, с ним связанные, в течение нескольких тактов работы модели.

Изменение в окрестностях возбужденного и поствозбужденного узлов сводятся к перераспределению вероятностей, т. е. коэффициентов K . Наибольшие изменения происходят в связях узлов, лежащих в русле процесса и ассоциированных с возбужденными и поствозбужденными узлами. Это так называемые субвозбужденные узлы. Возбуждение такого узла по связям от поствозбужденных узлов становится невозможным, а величина ранее существовавшей вероятности распределяется между остальными связями данного узла. Таким образом, суммарные изменения оказываются равными нулю.

Если рассматриваемый узел имеет связи с двумя поствозбужденными узлами, то общее приращение вероятности возбуждения по другим связям равно сумме вероятностей выпавших связей. Узлы, не лежащие в русле процесса, также испытывают влияние со стороны возбужденных узлов. Изменения, происходящие в связях этих узлов, могут быть вычислены.

Процесс изменения характеристик связей имеет затухающий характер. Величина затухания представляет функцию расстояния между рассматриваемым узлом и поствозбужденным. Расстояние измеряется минимальным количеством связей между узлами. Связи между узлами, лежащими на траектории в направлении движения, получают приращения согласно принятой зависимости вероятности связи от количества воспроизведений данной последовательности. Окончательно значение новой величины K устанавливается на протяжении нескольких тактов работы модели. В течение этого времени новое (неустановившееся) значение K представлено суммой двух слагаемых $K_t = K_{t-n} + \Delta K$, где K_{t-n} — прежнее значение K n тактов тому назад; ΔK — приращение K за счет перераспределенных значений других коэффициентов. Слагаемое ΔK затухает по экспоненте, характеризуя кривую затухания (кратковременная память).

K через n тактов принимает новое значение. Последовательность установившихся значений K можно назвать кривой обучения (долговременная память) *.

Таким образом, ассоциации носят вероятностный характер: нельзя гарантировать воспроизведение заданной информации, но можно увеличить вероятность воспроизведения. Отсюда следует, что поиск заданной информации возможно рассматривать как управление случайной последовательности. Последняя не является марковской, так как выбор очередного шага обусловлен не только последним исходом, но и более отдаленной предысторией. Такой предысторией является кратковременная память.

Движение ассоциативного процесса

Поскольку человеческая память в большинстве случаев успешно справляется с отысканием нужной информации, можно говорить о наличии в мозге эффективного механизма, управляющего ходом ассо-

* Таким образом, n представляет собой продолжительность сохранения слухов в кратковременной памяти, выраженную в циклах работы модели.

циаций. Этот механизм заключается, возможно, в перераспределении величин K , происходящем уже с момента уяснения задачи поиска. Уяснение рассматривается как установление связей элементов информации, содержащихся в вопросе, с элементами информации в памяти.

Рассмотрим, в какой мере мы располагаем возможностью влиять на ход передачи возбуждения.

1. Пусть в какой-то момент времени возбужден один из узлов. Через несколько тактов работы модели возбуждение будет передано следующему узлу. Выбор очередного узла обусловлен существующим на этот момент времени распределением вероятностей. Передача возбуждения сопровождается уже описанными изменениями. Мы не можем оказать никакого влияния на выбор следующего узла. Это соответствует свободному «парному» ассоциированию.

2. В то время как происходит передача существующего в сети возбуждения, внешняя причина возбуждает новый узел. Если этот узел лежит в непосредственной близости от прежде возбужденного узла, то траектория возбуждения, возможно, изменив направление, сохранит непрерывность. При условии сохранения непрерывности внешняя информация, которая выступает как причина возбуждения, может произвольно менять направление движения, или ход ассоциативного процесса.

3. Если внешняя причина вызывает возбуждение узла, лежащего в ином русле, и при этом общее число возбужденных узлов превышает установленный предел, то возбуждение перемещается в узел, на который воздействовала внешняя причина. Теперь этот узел является исходным пунктом процесса возбуждения. Первоначальный процесс, прерванный внешним фактором, затухает, оказав влияние на ход процесса, возбужденного с нового исходного пункта. Данное влияние, по-видимому, будет тем больше, чем ближе расстояние между узлами. Если же расстояние велико, то прежний процесс затухает, а новый развивается подобно тому, как это имеет место в случае 1.

4. Может случиться и так, что внешняя информация неоднократно нарушает непрерывность процесса возбуждения: образуется как бы пунктирная траектория. Рассмотрим два последовательно возбужденных узла, между которыми лежат «незатронутые» узлы. После возбуждения первого узла начинается процесс, описанный для случая 1. Через несколько десятков тактов влияние возбуждения этого узла распространяется на зону, радиус которой равен числу тактов. Такой процесс со сдвигом на несколько тактов распространяется и от второго узла. В зоне, где эти влияния пересекаются, возрастают вероятности связи узлов и, следовательно, возрастает вероятность перехода возбуждения на узлы этой зоны.

Отметим еще, что внешняя информация во всех случаях должна подаваться своевременно; тогда и только тогда возможно управление ассоциативным процессом.

Исследование модели

Проверка изложенных соображений требует огромного объема вычислительных работ, лишь вычислительная машина помогает с ним справиться. Нами составлена программа, которая моделирует процессы в сети, содержащей около 100 узлов. Полученные результаты носят предварительный характер. Исследование показало следующие закономерности работы сети:

1) процесс возбуждения в сети, которая не испытывает никаких воздействий извне, рано или поздно начинает двигаться по замкнутой траектории;

2) если возбуждение проходит много раз по одной и той же траектории, то последняя приобретает характер обособляющейся последовательности узлов;

3) связи, лежащие на траектории движения, возрастают в направлении его и убывают в обратном направлении;

4) если возбуждение проходит по траектории, огибающей какой-либо участок сети, то вероятность возбуждения узлов, лежащих с вогнутой стороны траектории, больше, чем с выпуклой стороны;

5) величины установившихся значений вероятностей после прохождения возбуждения зависят от формы траектории для одного и того же участка сети и от конфигурации участка при одной и той же траектории.

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ. ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Моделирование мыслительного процесса

Мыслительный процесс отличается от свободного ассоциирования прежде всего тем, что мышление — это *направленное ассоциирование*. Но тогда возникает вопрос, чем оно направляется. Мы полагаем, что фактором, направляющим ассоциирование и превращающим его в мышление, является *цель*. Поэтому нужно определить, что такое цель. В сравнительно простом случае арифметической задачи цель задается вопросом задачи. Например, если сообщено, сколько воды вливается в бассейн через одну трубу, а сколько через другую, и известен также объем бассейна, то целью, направляющей ход ассоциативного процесса, будет выяснение вопроса, за сколько минут наполнится бассейн. Ассоциации типа бассейн — купаться — плавать — нырять и т. д. будут заторможены.

Однако существуют состояния, при которых именно такие «случайные» ассоциации возбуждаются, а вопрос задачи перестает играть направляющую роль в организации ассоциативного процесса. Это бывает при поражении лобных долей мозга. Больные выполняют отдельные логические операции, но последовательность их, приводящая к решению, им недоступна [9]. Эти клинические наблюдения подтверждают взгляд на мыслительный процесс как на гибкую иерархию простейших логических операций.

Направленное ассоциирование, или мыслительный процесс, возникает не только при решении арифметической задачи. Организующим фактором, или целью, может быть и сложная научная проблема, и сравнительно простая ситуация, в которой осуществляется выбор между несколькими возможностями. Так, в шахматах бывают форсированные варианты, когда игроку предоставляется возможность сделать единственный, «вынужденный» ход, ибо все остальные запрещены правилами игры. В других ситуациях можно сделать несколько ходов — тогда шахматист и думает над ними в поисках лучшего. Его размышления направляются главной целью — выиграть партию, а также промежуточными целями выиграть фигуру, захватить открытую линию, создать проходную пешку и т. д. Промежуточные цели, как правило, приближают к достижению главной цели.

Необходимо показать, каким образом цель может быть отображена в предполагаемой ассоциативной сети, какие изменения она внесет в перераспределение «весов» ассоциативных связей, почему в одних случаях она оказывается легко достижимой (легко разрешимая задача), а в других — вовсе недостижимой. Достаточно ли для этого введенных

нами узлов и связей? Не следует ли ввести в сеть еще дополнительные блоки, обеспечивающие длительное возбуждение некоторых узлов, или надо стремиться к тому, чтобы доминантное возбуждение отдельных элементов сети и их определяющее влияние на ход ассоциативного процесса реализовались как свойства самой сети, без привлечения вышестоящих управляющих устройств?

Нами разработана сеть, состояние которой меняется в результате изменения относительной проходимости связей между элементами. Абсолютная проходимость для нашей сети значения не имеет. Между тем можно ввести следующее ограничение: ассоциативная связь, даже если цена ее выше всех остальных связей, не срабатывает, так как абсолютный уровень ее возбуждения ниже некоторой пороговой величины. Кроме того, узлы нашей сети находятся всего в четырех состояниях — невозбужденном, возбужденном, субвозбужденном и поствозбужденном. В то же время вполне возможно ввести больше градаций возбуждения узлов — либо это будут несколько дискретных уровней, либо изменения возбуждения узлов представятся как градуальный процесс. Это даст возможность моделировать на предложенной сети так называемые подсознательные звенья ассоциативной цепочки.

Введение в модель всех перечисленных усложняющих моментов резко увеличит объем необходимой вычислительной работы. Однако использование ЭВМ с большой емкостью памяти позволяет надеяться, что усовершенствование модели будет реализовано уже в ближайшем будущем, после чего можно думать о моделировании элементов такой сложной психической функции, как сознание.

Моделирование сознания

Человек осознает себя как личность, наблюдая других людей и общаясь с ними. Именно в результате понимания своего подобия другим людям у него вырабатывается способность переноса на себя собственных наблюдений над окружающими, своего отношения к ним. Человек способен, к примеру, не только ощущать голод, но и понять, что голоден, и т. д. По этому пути, вероятно, и придется идти при попытках моделирования сознания.

Уровень сознания у разных людей неодинаков, но в общем степень развития его сейчас выше, чем в древности. Все же разница между первобытным и нынешним человеком гораздо меньше, чем между древними людьми и обезьяной. Вот эта первая ступенька наиболее важна. Видимо, «я мыслю, следовательно, я существую» — это уже второй шаг, а первый — скорее «я чувствую, следовательно, я существую» (именно «Я»).

Другой путь — машинный. Вероятно, при достаточной сложности машина сможет осознать себя. Для этого понадобятся как минимум два логических устройства. Одно из них будет мыслить (или чувствовать, смотря по программе), а второе должно анализировать процесс работы первого и осознать его как часть единого устройства. Значит, сначала нужно обеспечить общение двух машин, а потом уже приступать к моделированию самосознания. До некоторой степени это явится повторением естественного пути.

Возможна попытка моделирования сознания на предложенной ассоциативной сети. Существенный момент в этом случае — количество моделей, которые одновременно могут находиться в состоянии возбуждения. При этом безразлично, являются ли эти модели отражением непосредственно воспринимаемых событий или считываются из памяти сети.

Модели могут обладать различной степенью абстракции и, следовательно, содержать в себе различные количества информации. Возможно, в будущем, когда исследователи откроют пути оценки количества семантической информации, можно будет говорить не о числе возбужденных моделей, а о количестве информации в фокусе внимания. Иными словами, тогда станет учитываться не только объем внимания (ширина полосы), но и информационная емкость моделей.

Объем информации, который может одновременно находиться в фокусе внимания, во многом определяет возможности ассоциативной сети. Если этот объем достигает некоторой пороговой величины, то сеть оказывается в состоянии формировать модели очень высокой сложности, обуславливающие качественный скачок в возможностях данной сети. Если сеть сможет сформировать модель самой себя (или модель «Я»), позволительно будет говорить о том, что сеть моделирует функцию сознания.

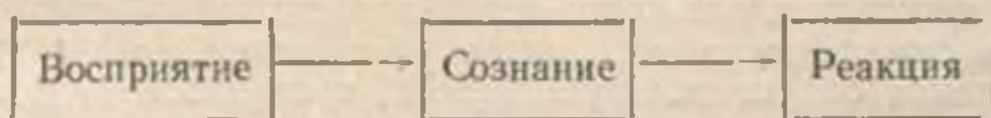
Таким образом, для того, чтобы моделировать сознание, необходимы следующие условия:

- 1) достаточно большая ассоциативная сеть;
- 2) возможность одновременного возбуждения по крайней мере двух (или более) моделей-элементов;
- 3) высокая степень абстракции моделей, которая достигается использованием символов (слов).

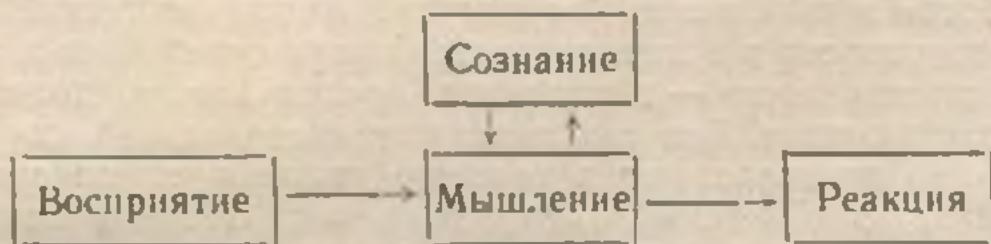
На основе перечисленных трех условий в сети создаются следующие дополнительные возможности:

- 4) формирование модели «Я», которая обладает широкой и разветвленной сетью ассоциативных связей, отличающих ее от всех других моделей;
- 5) способность обращения к памяти путем выбора из нее сведений, относящихся к прошлому, т. е. «возвращения» к любому пройденному этапу жизненного пути. Возможно, эта способность тоже является предпосылкой формирования модели «Я», ибо позволяет установить относительную неизменность «Я» в потоке времени.

Роль сознания в поведении человека иногда выражают схемой



Однако ближе к истине, по-видимому, другая схема:



Некоторые звенья ассоциативно-мыслительного процесса осознаются, субъективно создавая иллюзию произвольности решения. На самом деле сознательное решение детерминировано, как и подсознательные, и чисто рефлекторные акты.

То обстоятельство, что некоторая мысль мыслительного процесса протекает в сознании, играет огромную роль в формировании поведения. Механизмы сознания позволяют длительно удерживать цели деятельности, направляющие поведение, какими бы абстрактными они ни

были; у животных эту роль осуществляют инстинкты, но при этом гибкость поведения неизмеримо меньше.

Укажем еще на одну предположительную функцию сознания. Если на достаточно большой ассоциативной сети имеется несколько подсознательных ассоциативных потоков, то можно представить ситуацию, когда одновременно в сфере сознания окажутся модели-элементы этих разных потоков. Таким путем может происходить ассоциирование очень далеких понятий, являющееся одной из предпосылок творческого мышления.

Нам кажется, что предлагаемая ассоциативная сеть может служить базой для моделирования психических функций, в том числе и высших.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Hebb. Organization of behavior. New York, 1949.
2. P. M. Milner. The Cell Assembly. Mark II. Psychological Review, 64, 4 (1957).
3. S. Ervin-Tripp, D. Slobin. Psycholinguistics. Annual Review of Psychology, 17, 435 (1966).
4. Э. Т. Головань. О «бионическом» моделировании памяти. Материалы конференции, посвященной проблемам памяти, Пушкино, 1966.
5. А. Н. Лук. Память и кибернетика. Изд-во «Наука», 1966.
6. Э. Т. Головань, А. Н. Лук, В. Старинцев. Моделирование некоторых свойств памяти. «Природа», 1965, № 9.
7. И. А. Шеварев. Обобщенные ассоциации в мышлении школьника, М., 1961.
8. А. И. Леонтьев. Развитие памяти. М., 1966.
9. А. П. Лурья. Высшие корковые функции человека. М., 1963.

ИНТЕГРАЦИЯ ОТРАЖЕНИЯ И ОТНОШЕНИЯ В РЕФЛЕКТОРНОМ АКТЕ

В. С. Манешин

Жизнь человека невозможна без непосредственной связи и взаимодействия с окружающим его миром, без отражения и творческого воспроизведения объективной реальности, проникновения в ее глубинные связи отношения с целью их последующего использования в своих интересах.

Подобную возможность человеческое сознание обретает посредством переработки и обобщения бесконечной массы ощущений, их определенной совокупности в более сложные формы отражения и воспроизведения действительности — восприятия, представления, понятия, суждения и умозаключения. Все они тесно взаимосвязаны между собой не только тем, что предполагают в качестве условия своего существования ощущения, но и тем, что каждая из них является необходимой предпосылкой и обязательным условием для возникновения другой, высшей формы.

Так, на основе сложного комплекса ощущений возникают восприятия, дающие человеку образ объекта не только в его деталях, разрозненных свойствах, сторонах, без знания которых нет и не может быть знания целого, но и в его целостности. Порождаясь, как и ощущения, в результате непосредственного воздействия реальной действительности на наши органы чувств или анализаторы, восприятия выступают в виде сочетания ощущений, их вполне определенной совокупности и потому богаче последних по своему содержанию, которое всегда и во всех слу-

чаях определено тем, что взаимодействует с человеком в данный момент, почему и ограничено, не поднимается до отражения общих признаков различных предметов и явлений.

Иное дело представления. Они также дают образ объектов внешнего мира, но не непосредственно данных, а ранее воспринятых. Представления поднимаются выше частных ощущений и восприятий, содержат в себе в той или иной степени обобщение результатов взаимодействия человека с внешним миром, его практической деятельности и отражают общие признаки вещей, событий и обстоятельств в пределах их внешних связей и отношений.

В процессе обобщения взятое в качестве исходного представления единичное, исключительное и неповторимое, обогащается и насыщается за счет хранящихся в памяти или возникших в результате взаимодействия с действительностью представлений о других объектах. Новое представление в этом случае в значительной мере отличается как от первоначального исходного представления, так и всех остальных, участвовавших в его образовании.

Дальнейшее развитие человеческого мышления в конечном счете приводит к тому, что процесс обобщения, совершив качественный скачок, разрывает сравнительно узкие рамки фиксации только внешних признаков объектов и обращается к их внутренним связям и отношениям. В результате обобщения последних с аналогичными признаками других предметов и явлений возникают понятия, т. е. происходит скачок от непосредственных восприятий к мысли. С этого момента и начинается процесс творчества, предполагающий не только глубокое проникновение в реальную действительность, но и воссоздание в различных комбинациях ее моделей.

Однако понятие все еще сохраняет в известной мере наглядный образ предмета и ставит на первый план не его внутренние, а внешние связи и отношения. Только посредством суждений и умозаключений человек получает возможность познавать недоступные его анализаторам процессы окружающей реальной действительности и своего внутреннего мира. Предел, который не могли преодолеть органы восприятия, безгранично расширился благодаря приобретенной мышлением в ходе исторического развития способности активно соотносить между собой как данные практического опыта, так и уже имеющиеся знания. Глаз человека теперь стал видеть, а его ухо слышать больше того, чем они могли при посредстве своих специальных устройств и во взаимодействии с другими анализаторами.

Но выделение различных уровней познания не означает вместе с тем его деления на некие самостоятельные и между собой никак не связанные части, системы. Процесс познания един, и это единство обеспечивается не только единством источника, но и тем, что в нем участвуют на условиях тесного взаимодействия все отделы нервной системы организма, в том числе и высшие, осуществляющие анализ и синтез и одновременно соотносящие полученные ощущения с прошлым опытом и приобретенными через его посредство знаниями. Не менее важен для понимания взаимосвязи различных моментов процесса познания и тот факт, что познавательные акты человека на любом их уровне всегда находят свое выражение в речи как основном условии мышления и практике как критерии истинности и в то же время источника познания.

Одновременно с информацией о внешнем воздействии несущие ее нервным центрам импульсы повышают или понижают их тонус, что сказывается затем на деятельности связанных с ними органов, в том

числе гормональной и сосудистой систем, сердца и мышц. Изменяется кровяное давление и объем сосудов, частота сердечных сокращений и дыхания, уровень кислородного и основного обмена, состав крови, мышечное напряжение, температура кожи, выделение слюны, пота и другие функции организма. Живая система приводится в волнение, которое соответствует заданному тону и вместе с обозначенным им удовольствием или неудовольствием составляет эмоциональный компонент рефлекса или эмоциональный фон ощущений.

Последний охватывает весь организм, формирует целостные, сложные и непосредственно вытекающие из задач сохранения его жизнедеятельности состояния, служащие источником для движений и действий по удержанию полезных и устранению опасных влияний. «Все без исключения инстинктивные движения в животном теле,—писал И. М. Сеченов,—направлены лишь к одной цели — сохранению целости неделимого... Сохранение же этой целости вполне обеспечено, если неделимое избегает вредных внешних влияний и имеет приятные, т. е. полезные. Страх помогает ему в первом, наслаждение заставляет искать второго» [3, 93]. С этой точки зрения эмоциональный фон ощущений следует рассматривать как приспособительный и потому весьма важный фактор жизни, закрепленный и усовершенствованный естественным отбором.

Исторически первые по своему происхождению — эмоциональные компоненты безусловных рефлексов. Их функции и назначение определяются самой биологической природой и физиологической структурой животного организма, необходимостью сохранения и защиты жизни. Физическое удовлетворение и сопутствующее ему удовольствие или, наоборот, боль и неудовольствие, возникающие при взаимодействии низших организмов с предметами, явлениями и процессами, вызывают у них и строго определенное выработанным инстинктом поведение. Эмоциональные компоненты условных рефлексов сложились на следующем, более высоком этапе эволюции под воздействием непрерывно развивающихся центров сознания, участие которых способствовало появлению более сложных и вместе с тем разносторонних состояний организма при аналогичных условиях и ситуациях. У высших животных периферическая нервная система дополняется головным мозгом, тонус которого также нарушается поступающим и сюда нервным импульсом. Высший центр сознания возбуждается и приходит в фиксируемое как эмоция состояние радости или гнева, страха или злости, самодовольства или тоски.

Эмоциональный компонент — неизменный спутник всякого рефлекса, всех без исключения ощущений. Порождаясь ими и их сопровождая, он своими физиологическими проявлениями обеспечивает деятельность организмов по поддержанию и сохранению жизни, служит могучим фактором, связывающим их неразрывными узами с окружающим миром, стимулирует удовлетворение имеющихся потребностей. Однако обозначаемые эмоциональным компонентом рефлекса или эмоциональным тоном ощущений состояния и их внешние проявления возникают инстинктивно, не закрепляются и ограничиваются установившимися в ходе борьбы за существование связями.

Эмоции — тоже спутники ощущений, но они формируются в центрах не периферической, а высшей нервной деятельности, осуществляющих наряду с другими функциями и функции анализа, синтеза, обобщения. Это обстоятельство коренным образом меняет их характеристику и способствует тому, что волнения высших нервных центров превращаются в сравнительно устойчивые внутренние состояния, психические процессы, которые, в свою очередь, усиливают или ослабляют

физиологические механизмы эмоционального компонента, а через их посредство — и интенсивность ответных движений, действий и стремлений. Ненависть, злость часто удесятворяют силы человека, позволяют переносить голод, жажду, боль, совершать поступки, невозможные при отсутствии эмоционального возмущения; страх, тоска, наоборот, часто парализуют организм или вынуждают сознание на команды, не всегда необходимые в сложившейся ситуации (бегство, например).

Эмоциональные компоненты и эмоции возникают в рефлекторном акте наряду с ощущениями и дополняют их: ощущения в конечном счете дают нам знания об объектах и их ценности для нас, эмоциональные компоненты и эмоции указывают на волнения организма в связи с данным ощущением. Такое назначение обеспечивает их живучесть, относительную самостоятельность как специфической составной части рефлекса и исключает возможность перехода в ощущения или образования из ощущений. Они не умирают и не ослабевают, не исчезают и не становятся излишними, хотя и формируются инстинктивно. По мере удаления от исходного рубежа человеческой истории и расширения круга потребностей значение эмоций все более возрастает, а сами они усложняются.

Физиологические механизмы эмоций приводятся в действие временно наступающим вслед за повышением или понижением тонуса передающей внешнее раздражение нервной системы и ее центров специфическим волнением как особым состоянием психики. Оно вызывает, определяет содержание, направленность органических изменений и дополняется, подкрепляется ими. Без физиологического подкрепления, необходимого для предстоящей деятельности и подавляемого при отсутствии надобности в ней благодаря способности сознания к контролю, эмоции невозможны.

Уровни осознания и контроля над эмоциями, особенно над сопровождающими их физиологическими изменениями, сопряжены с уровнями развития живых систем. Слитные вначале с ощущениями, эмоциональные волнения животных по мере развития психики обособляются и захватываются простейшим анализом, ограниченным их неспособностью к сознательной целенаправленной деятельности. Эмоции животного, даже высшего, чаще всего остаются на уровне инстинкта, обозначаемого неконтролируемыми внутренними состояниями голода, жажды и другими волнениями, связанными с сохранением жизни.

Человеческие эмоции складываются на протяжении длительного развития, эволюции, озаренной светом разума и общественно-исторической практики, личного и коллективного опыта. Разум, отличающий человека от животного, наиболее полно и всесторонне анализирует все наличные эмоциональные проявления, оценивает их, соотносит с имеющимися потребностями и нормами и держит под контролем в пределах, установленных биологической природой и социальной организацией. Психические процессы и физиологические изменения, внутренние волнения и их внешние показатели соответственно укрощаются или удерживаются, ослабевают или усиливаются в зависимости от установки сознания. Разум превращает эмоции во все более сложные состояния с бесчисленным количеством оттенков, различной направленностью, остротой и тонкостью даже в наблюдаемых проявлениях — мимике и жестах, интонациях голоса и выражениях глаз.

Эмоции на их высшем человеческом уровне не есть нечто данное от рождения, они формируются на основе элементарных, недостаточно еще осознанных эмоциональных состояний одновременно с общим умственным и духовным развитием, непрерывно обогащающимся жизненным

опытом и изменяющимися интересами, потребностями. Своеобразный «сплав» эмоционального опыта и различных характеристик формирующейся личности, которые этот опыт обогащают и разнообразят, сказывается затем на эмоциональных проявлениях: они бывают разными не только от человека к человеку, но и у одного и того же человека на разных этапах его индивидуального развития.

Как и ощущения, эмоции тесно связаны с потребностями. Предметы потребностей, процесс их удовлетворения, наконец, сами потребности дают начало различным ощущениям и сопровождающим эти ощущения эмоциям. Но «в отличие от познавательных процессов эмоции и чувства — это не отражение самих предметов и явлений действительности, а того отношения, в каком они находятся к потребностям и мотивам деятельности человека [4, 3, 36]. Потребности определяют интенсивность и направленность, субъективность эмоций, составляющую во всех случаях отличительное свойство каждого организма и характеризующую его темперамент, внутреннюю активность.

По мере возникновения в ходе длительного исторического развития человека новых материальных и духовных потребностей и способов их удовлетворения усложняются, совершенствуются, дифференцируются и человеческие эмоции. Если эмоциональный фон ощущений находил и находит свое выражение во внутренних реакциях организма, его состояниях удовольствия или неудовольствия, возбуждения или успокоения, напряжения или разрешения и соответствующих, главным образом, инстинктивных внешних проявлениях, то уже элементарные человеческие эмоции порождают радость и печаль, гнев и восторг, тоску, другие психические процессы и непосредственно вытекающие из них эмоционально окрашенные стремления и деятельность по удовлетворению потребностей. Одновременно формируются и новые виды эмоций: их становится тем больше, чем шире круг потребностей человека и способов их удовлетворения, чем разнообразнее человеческая деятельность, неизменными спутниками и активным компонентом которой они являются.

Как внутренние состояния самого субъекта эмоции детерминируются не самим объективным миром, его предметами и явлениями, а взаимодействующим с ними организмом и характеризуются вполне определенными состояниями субъекта и следующими за ними вполне определенными поступками и действиями.

Эмоции не содержат информации о предмете самом по себе, они только обозначают состояния имеющего потребность организма в связи с воздействиями на него. Различия в потребностях приводят к тому, что одни и те же объекты, вызывая однотипные ощущения, часто сопровождаются непохожими эмоциональными волнениями, которые не компенсируют недостаток необходимых для организации приспособительного поведения сведений и не восполняют дефицит требуемой для достижения цели информации в случае нарушения динамического стереотипа или, иначе, устойчивой системы ответных реакций организма на определенную комбинацию внешних сигналов. Утверждать подобное — значит допускать возможность возникновения ощущений без одновременно сопровождающего их эмоционального фона, возможность отсутствия у животного с выработанным динамическим стереотипом каких-либо эмоций и непосредственно вытекающих из них защитных и побудительных мотивов деятельности.

Возникая на основе ощущений первоначально в виде простейших состояний, эмоции, в свою очередь, оказывают обратное воздействие на ощущения, дополняют их в разных связях и отношениях. Сами по себе ощущения не могут обеспечить жизнедеятельности в целом, они

лишь доставляют необходимую для этого процесса информацию в виде знаний об окружающей среде. Эмоции восполняют этот недостаток тем, что порождают определенные стимулы для движений и действий организма по отношению к внешнему миру, составляют такую часть нашего психического содержания, которая повышает интенсивность процесса реализации способностей, обеспечивает субъективную активность.

В совокупном психическом акте эмоции играют преимущественную роль в формировании побудительных мотивов всякой человеческой деятельности, в том числе стремлений, желаний и убеждений. «Когда нужно воздействовать на людей,— писал по этому поводу Ш. Летуэрно,— то легко убедиться, насколько эмоция обладает большей силой, чем холодное рассуждение. Возьмем прочное убеждение, по-видимому, нескрушимое, даже больше того, возьмем эгонстическую страсть, каковы они все. Вы нападаете на убеждение во всеоружии всех военных хитростей логики. Полная неудача. Крепость не сдается. Но будьте настолько счастливы или умелы, вызовите эмоцию, и вы тотчас же овладеете сердцем цитадели» [5. 89].

Органическая связь эмоций с деятельностью человеческого разума создает необходимые предпосылки как для самовоспитания, так и управления им, саморегулирования, организации со стороны человека, что было бы невозможно в условиях их иррациональной природы, на чем настаивают некоторые представители современной буржуазной философии и психологии, или в том случае, если бы они ослаблялись или «убивались» логическим анализом, как считает П. Симонов [6. 29]. Наоборот, прогресс логического анализа еще более усложняет и разнообразит, обогащает и насыщает эмоции, превращает радость и огорчение, оптимизм и сомнение, восторг и страдание в постоянных и неизменных спутников всей деятельности человека, в канву его разумной жизни. «Ничто: ни слова, ни мысли, ни даже поступки наши,— писал К. Д. Ушинский,— не выражают так верно нас самих и наши отношения к миру, как наши чувствования: в них слышен характер не отдельной мысли, не отдельного решения, а всего содержания души нашей и ее строя» [7. 117—118].

Эмоции человека никогда совершенно не изолируются от элементарных форм, а сохраняют их, хотя и в несколько «урезанном» виде, в качестве первоначальной ступени и основы своего формирования, последующего функционирования, развития и дополняются еще различными, малыми и большими, сложными и тончайшими внутренними движениями в зависимости от богатства самой его личности, высоты его культуры и внутренней активности. Именно поэтому о человеческих эмоциях следует говорить только как о высших, коренным образом отличающихся от низших, животных, и соответственно делить их по степени осознанности и уровню выражения человеческой сущности на более или менее элементарные и сложные. Одновременно человеческие эмоции нужно определять как биосоциальное по своей природе явление. Они возникли на биологической основе, но получили развитие лишь благодаря социальным факторам, поднявшим сознание человека на высшую ступень и тем самым создавшим условия для образования сложных, диффузных и переплетенных между собой во всех их звеньях и на всех уровнях проявлений.

Тесная связь эмоций с думами и размышлениями человека, его взглядами и общественными отношениями обеспечила их социальную направленность, зависимость от классовой и национальной принадлежности субъекта, его мировоззрения и других индивидуальных особенно-

стей. Понимание смысла и значения происходящего, осознание его последствий и общественной значимости, определяемой потребностями социальных групп и классов, породило нормативность, ограниченность эмоций установленными нормами и правилами. Возникли и условия для перерастания эмоций в более устойчивые состояния, чувства, объединяющие эмоциональные процессы и различные проявления человеческого интеллекта. Таковы чувства симпатии, неприязни, любви, отвращения, доверия, подозрительности, тревоги.

Чувства окрашивают поведение человека, сказываются на его способностях в промежутки времени, отмечаемые многообразием событий и ситуаций, и проявляются через генетически более ранние формы эмоций, через своеобразные для каждого индивида эмоциональные процессы. Так, чувство любви может быть выражено эмоциями радости и печали, восторга, желания; через те же эмоциональные состояния реализуются и чувства симпатии, неприязни, доверия и т. д. Элементарные эмоциональные состояния, своеобразные комплексы присущих всякому человеку эмоций порождают в каждом конкретном случае нечто новое, отличное от того, что представляет собой любая простая эмоция в отдельности. Иных форм для выражения чувств нет и не существует, а их деление на обособленные группы, классы, на «чисто» нравственные или эстетические во всех случаях ничем не оправдано.

Чем богаче личность, тем сложнее внутренняя психологическая структура характеризующих ее чувств и их проявлений. Чувства аккумулируют, вбирают в себя и наиболее широко в сравнении с эмоциями выражают жизненный опыт и духовный багаж личности, уровень ее интеллекта и психики. Их биологическая основа сочетается с социальной направленностью, но не растворяется в нем: чувства, проявляющиеся через бесконечно разнообразные комплексы элементарных эмоций, отличаются от чувств социальных как системы мировоззренческих понятий, установок и взглядов: чувств патриотизма, долга, совести, достоинства и других характеристик живущего в обществе человека.

Чувства не выражают каких-либо устойчивых или неустойчивых отношений личности к окружающему в обычном смысле этого слова и, подобно эмоциям, не детерминируются самим объективным миром, который якобы формирует и чувства как отношения личности. Не отделяются они резкой гранью и от своих ранних и простых форм, сохраняют зависимость от психики, остаются ее своеобразными образованиями и не теряют присущей эмоциям субъективности. Ощущения, представления складываются в итоге отражения объектов как их образы, эмоции при сопровождающих отражение волнениях организма — как его состояния в связи с данными в этих различных формах человеческого восприятия мира воздействиями.

Через посредство нервных возбуждений организма, соответствующих воздействиям отражаемых предметов и явлений и в своей простейшей форме обозначаемых понятием ощущение, центры сознания получают необходимую информацию о действительности, ее объектах независимо от их позитивной или негативной ценности. Чем выше развита нервная система, тем сложнее отражение внешнего мира. У человека оно достигает такой степени развития, которая позволяет ему осознать себя в качестве субъекта познания и деятельности, отделить отражение от отношения к отраженному и превратить его в процесс непрерывного, внутренне закономерного и последовательного развития знаний от явления к сущности, от сущности первого порядка к сущности второго порядка и так без конца. Ощущения — первая и вместе с тем весьма важная форма отражения живым организмом внешнего мира,

окружающей его действительности, отдельных сторон, свойств ее конкретных предметов и явлений. Только через ощущения оказывается возможной непосредственная связь сознающего себя субъекта с внешним миром, диалектический переход от материи к сознанию.

Второй, не менее важной функцией сознания является оценка отраженного, которая основывается на свидетельстве анализаторов организма, в том числе центров высшей нервной деятельности, на основе ощущений и только через ощущения воссоздающих внутреннюю структуру предметов и явлений, обеспечивающих познание вещей самих по себе, чтобы затем определить свое отношение к ним. Рефлекторный акт начинается с внешнего воздействия, трансформируемого рецептором в нервное возбуждение и в таком виде по центростремительным нервным путям поступающего в центр сознания. Здесь оно перерабатывается, синтезируется в ощущение как определенный нервный процесс и соотносится, сопоставляется с потребностями, оценивается по степени соответствия им. В зависимости от оценки мозг формирует команды на ответные действия и передает их в виде нервных импульсов по идущим от центра к периферии центробежным нервам, исполнительным органам — мышцам, железам внутренней секреции и т. д., в свою очередь посылающим информацию с реализации данных команд.

Центр сознания непрерывно получает необходимые данные как о мгновенных, однородных по своему характеру, так и разнородных, изменяющихся под воздействием внешних условий или реагирующего организма действиях раздражителя и вносит соответствующие коррективы в оценки и команды. Рефлекторный акт получает вид замкнутого кольца и обеспечивает одновременно с восприятием внешней среды ее оценку, невозможную без знания объективного содержания оцениваемых предметов, явлений, процессов и с этой точки зрения представляющую необходимую для ориентировки организма в постоянно изменяющихся условиях его существования избирательную активность.

Субъективная активность наделенного сознанием организма находит свое выражение в эмоциях. «У человека, — писал И. Сеченов, — не может быть собственно никакого предметного ощущения, к которому не примешивалось бы системное чувство в той или иной форме. В этой смеси или ассоциации для половины, данной деятельностью высших органов чувств, существует как эквивалент предмет внешнего мира, а для другой — никакого внешнего эквивалента нет. Первая половина чувствования имеет, как говорится, объективный характер, а вторая — чисто субъективный. Первой соответствуют предметы внешнего мира, второй — чувственные состояния собственного тела — самоощущения» [3, 502]. Последующие эксперименты физиологов и психологов подтвердили правильность этого вывода, а затем были обобщены В. И. Лениным в его известной формуле: «Иных чувств, как человеческих, т. е. «субъективных», — ибо мы рассуждаем с точки зрения человека, а не лешего, — не бывает» (1.113).

Ощущения становятся фактом сознания в результате трансформации энергии внешнего раздражения. Бесконечная масса объективных по содержанию и субъективных по форме ощущений доставляет информацию о предметах, явлениях и процессах, используемую мышлением для познания и осознания значения познанного, информации о его ценности, соответствии потребностям. Эмоции такой информации об объектах не содержат, они представляют активную сторону мысли, ее внутреннюю субъективную устремленность к обозначенной потребностями цели. «Без «человеческих эмоций», — писал В. И. Ленин, — никогда не бывало, нет и быть не может человеческого искания истины» (2,

112). В психическом акте эмоции служат механизмом, который наряду с активностью мышления обеспечивает и активность действий.

Ночь и вокруг лес. Вдруг человек, осторожно пробирающийся по еле различимой тропинке, услышал треск сухого валежника и шорох раздвигаемых веток... У него еще нет и не может быть точного представления об опасности, ее источнике и размерах, но в одно мгновение все силы его организма мобилизуются для возможных и целесообразных в возникшей обстановке действий. Как сформировалась такая ответная реакция, какие психические процессы обеспечили состояние готовности?

Обычно объясняют, что из-за отсутствия времени и возможности для анализа воспринятых сигналов сознание посредством эмоций оценивает их предполагаемые результаты и выводит организм из состояния покоя. Эмоции вырываются из действительно существующей взаимосвязи процессов, происходящих в нервной системе в условиях ее взаимодействия с внешним миром и рассматриваются в несвойственной им роли средств познания и оценки, наделяются, подобно ощущениям, способностью доставлять «субъективный образ объективного мира» или информацию о непосредственной ценности объектов в форме их «доинтеллектуальной» оценки. Игнорируется закрепленное естественным отбором назначение отдельных частей рефлекса, не учитывается тот факт, что «развитие психического процесса подобно действию весьма сложной машины, элементы которой никогда не бывают даны в опыте порознь, а всегда вместе, и обнаружить которые можно только путем особых приемов анализа» [8, 425].

Дающее начало рефлекторному акту нервное возбуждение на своем пути к центру сознания повышает или понижает тонус вегетативной нервной системы, а при достижении головного мозга такое же воздействие оказывает и на него. Нервная система приводится в состояние, которое сказывается на организме в целом и на процессе превращения энергии внешнего раздражения в факт сознания, точности и тонкости восприятия и в не меньшей мере — на анализе и синтезе воспринятого. Дальнейшее развитие рефлекторного акта связано с образованием ощущения как образа воздействующей действительности, необходимой для ориентации организма оценкой и с эмоциями как следствиями органических изменений. Отражение предшествует оценке, оценка — эмоции, и каждый из этих последовательно возникающих элементов рефлекса выполняет строго определенные и свойственные только ему функции. Отражение дает знания о внешней среде, оценка на основе добытых знаний обеспечивает ориентацию организма, его избирательную активность, эмоции в соответствии с оценками приводят организм в состояние субъективной активности и обеспечивают ее соответствующей мобилизацией организма.

В приведенном выше примере человек с помощью сложных механизмов сознания в течение весьма короткого, исчисляемого долями секунды времени, воспринял, сопоставил с прошлым опытом и оценил всю ситуацию в целом, что вызвало нарушения в деятельности сердца, мышц и других органов, привело организм в соответствующее предстоящей деятельности состояние готовности. Последующий анализ центра мышления неизбежно завершат принятием решения и определяют поведение человека. Он или пойдет навстречу опасности, или уклонится от нее в зависимости от данной команды, определяемой способ-

ностью сознания преодолеть страх и усилить противоположное ему состояние гнева.

Следовательно, эмоциональному состоянию предшествовало отражение внешнего воздействия и его оценка центрами сознания. Эмоции возникли на основе оценки ситуации, значит, и на сравнительно поздней стадии процесса отражения первоначально как внутриорганические изменения, как эмоциональный компонент рефлекса или эмоциональный фон ощущений. «Субъективное состояние эмоции должно возникать на какую-то долю секунды позднее, чем первичный комплекс нервной интеграции» [9, 80].

Познание и оценка имеют общую основу в виде ощущений. В оценке констатируется ценность объекта для человека, и эта констатация во всех случаях опирается на ощущения, логически обрабатываемые в процессе мышления в восприятии, представлении, понятии, суждении и умозаключениях. Непосредственный контакт с оцениваемыми предметами и явлениями при этом не обязателен, при посредстве мышления человек может находить и обходные пути оценки, на основе познания связей и отношений объектов между собой выразить свое к ним отношение, оценить их значение для имеющихся у него потребностей.

Ощущения, восприятия, представления — начальные формы ориентации человека в окружающей его среде, отражение непосредственных контактов с ней, в которых сложная и противоречивая природа, сущность вещей в подавляющем большинстве случаев остается непознанной. Поверхностны, несовершенны и оценки, опирающиеся на такой уровень знаний. Переход от живого созерцания к абстрактному мышлению связан с переходом от познания внешних сторон к познанию внутренней структуры объектов и отношений между ними. Соответственно возрастает и уровень оценок — они полнее охватывают и состояние потребностей, и характеристики вещей в их соотношении с потребностями, обеспечивая тем самым более полную ориентацию организма, его наиболее целесообразное поведение в окружающих условиях существования, возможных ситуациях.

Прошлый опыт часто сопоставляется с теперешним многообразием жизненных событий, пройденное используется в оценке настоящего, по все же остается достоянием памяти. Для организма важнее будущее и особая способность предвидения событий ради постоянной самоорганизации. Мозг поэтому непрерывно нацеливается вперед, устремляется в неизведанное, чтобы познать и оценить его по возможности с большей степенью вероятности, так как малейший недосмотр чреват осложнениями, нарушающими сохранность и развитие животного или человека. Никакие другие механизмы не в состоянии заменить этой деятельности высшего нервного центра и обеспечить хотя бы приблизительные ориентиры поведения без анализа складывающихся обстоятельств. Эмоции не формируют и не могут формировать оценок, ибо лежащие в их основе внутриорганические изменения возникают не в результате непосредственного отражения действительности, взаимодействия организма и среды, а как следствие этих актов, как их продукт, который затем закрепляется и в известной мере обобщается и регулируется сознанием. Поэтому эмоциональные оценки и невозможны, они не существуют во все; всякой эмоции предшествует оценка.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 18.
2. В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 25.
3. И. М. Сеченов. Избранные философские и психологические произведения. Госполитиздат, М., 1947.

4. А. Н. Леонтьев. Эмоции и чувства, М., 1956.
5. Ш. Летурно. Физиология страстей. Спб., 1896.
6. П. В. Симонов. Что такое эмоция? Изд-во «Наука», 1966.
7. К. Д. Ушинский. Собр. соч., т. 9. Изд-во АПН РСФСР, 1950.
8. Н. Грот. Психология чувствований в ее истории и главных основах. Спб. 1879/1880.
9. П. К. Анохин. Узловые вопросы в изучении высшей нервной деятельности. Сб. «Труды отдела физиологии нервной системы. Проблемы высшей нервной деятельности». Изд-во АМН СССР, 1949.

ОБ ОДНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ МНОЖЕСТВА ИМЕН СУЩЕСТВИТЕЛЬНЫХ РУССКОГО ЯЗЫКА

Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, Л. И. Якименко

Некоторые вопросы, относящиеся к проблеме морфологической классификации имен существительных русского языка, рассматривались в работе [1] в связи с построением алгоритмов автоматического анализа и синтеза форм русских слов. Значительный интерес к этим вопросам определяется необходимостью решения ряда важных научно-технических задач (создание читающих устройств, машинный перевод, автоматическое реферирование научно-технической литературы, машинное обучение и др.). Целью настоящей работы является моделирование на электронно-вычислительных машинах морфологической классификации множества имен существительных по типам склонения.

Пусть имеется конечное множество $S = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, где каждый элемент x_i есть имя существительное в именительном падеже единственного числа. Требуется произвести разбиение множества S на классы по отношению подобия системы падежных окончаний $R \subset S \times S$. Так как разбиение множества S будет осуществляться на основе морфологической структуры слова, эту операцию естественно называть морфологической классификацией. Рассматривая элементы исходного множества S , легко убедиться, что

а) $(x_i, x_i) \in R$ (рефлексивность R);

б) $(x_i, x_j) \in R \Rightarrow (x_j, x_i) \in R$ (симметричность R);

в) $(x_i, x_j) \in R$ и $(x_j, x_k) \in R \Rightarrow (x_i, x_k) \in R$ (транзитивность R).

Отсюда следует, что R есть отношение эквивалентности, т. е. задача поставлена корректно.

Переходя к решению этой задачи, отметим, что человек свободно различает совпадение или несовпадение падежных окончаний существительных, проводя тем самым естественную классификацию по типам склонения. Из психологических экспериментальных исследований по развитию детской речи [2, 3] известно, что ориентировка на формальные признаки слова, проявляющаяся в процессе усвоения падежных окончаний уже на начальной стадии, становится основной на высшей степени развития речевой деятельности. Человек без ошибок склоняет отдельное (в том числе незнакомое) слово, заданное в именительном падеже (при этом наблюдения показывают, что овладение структурой слова в исходном падеже имеет решающее значение для правильного формообразования). На основании результатов психологических экспериментов такого рода приходим к следующей аксиоме.

Аксиома (достаточности формальных признаков). *Элементы множества S обладают достаточным набором формальных признаков для отнесения их к определенному классу по отношению R .*

В справедливости этой аксиомы для почти всех $x_i \in S$, кроме, может быть, небольшого их числа, можно убедиться, обратившись к заданному множеству S . В качестве примера рассмотрим подмножество множества S , образованное неодушевленными именами существительными с окончанием *-а* в именительном падеже единственного числа (признак одушевленности необходимо задавать в связи с тем, что одушевленные и неодушевленные существительные склоняются по-разному). В результате непосредственного склонения слов, относящихся к этому подмножеству, установим десять типов склонения. Эти типы склонения совместно с определяющими их формальными признаками показаны в таблице. Слова, которые обладают набором формальных признаков, соответствующим некоторому типу склонения, но имеют особенности в системе падежных окончаний, а также несклоняемые имена существительные следует отнести к разряду исключений (исключение составляет незначительное число слов).

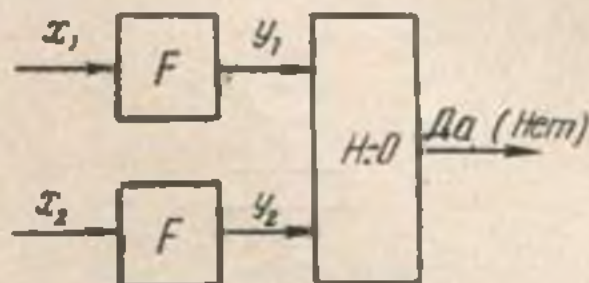


Рис. 1. Схема модели морфологической классификации слов.

Конкретное устройство канонического алгоритма склонения, основанного на формальных признаках (оператора преобразования F по терминологии, принятой в кибернетическом методе «черного ящика») считается, разумеется, неизвестным. Однако сформулированная выше аксиома позволяет построить и реализовать на электронно-вычислительной машине программную модель оператора F , которая является одной из основных частей искомой модели морфологической классификации. Принципиальная схема модели морфологической классификации слов показана на рис. 1.

Тип склонения	Формальные признаки слова
1-й	Основа на <i>-г, -к, -х</i> с предшествующим гласным
2-й	Основа на <i>-к</i> с предшествующим <i>-д-</i>
3-й	Основа на <i>-к</i> с предшествующим <i>-б-</i>
4-й	Основа на <i>-к</i> с предшествующими <i>-ж, -ч, -ш-</i>
5-й	Основа на <i>-к</i> с предшествующим согласным, кроме шипящих и <i>-д</i>
6-й	Основа на <i>-ж, -ч, -ш, -щ</i> с ударением на основе
7-й	Основа на <i>-ж, -ч, -ш, -щ</i> с ударением на окончании
8-й	Основа на <i>-ц</i> с ударением на основе
9-й	Основа на <i>-ц</i> с ударением на окончании
10-й	Основа на согласные, кроме шипящих и <i>-ц</i>

На вход кибернетической системы подаются входные сигналы x_1 и x_2 — два имени существительных в именительном падеже единственного числа. Оператор преобразования F вырабатывает сигналы y_1 и y_2 , определяющие тип склонения. Затем эти сигналы поступают на «нуль-орган». В результате сравнения образуется окончательный выходной сигнал «да» или «нет», характеризующий соответственно совпадение или несовпадение типов склонения, или сигнал «не знаю» в том случае, если оба предложенных слова относятся к разряду исключений. Таким образом, принцип действия рассматриваемой модели основан на идее так называемого нуль-метода.

Перейдем теперь к описанию структуры предлагаемой модели. Программная модель морфологической классификации имен существительных

тельных включает следующие процедуры (блоки): дифференциации слова, узнавания, сравнения и печати. Центральное место здесь занимает процедура узнавания, предназначенная для определения типа склонения слова, поступившего на вход модели. Типичная блок-схема этой процедуры показана на рис. 2 на примере имен существительных, имеющих окончание -а в именительном падеже единственного числа.

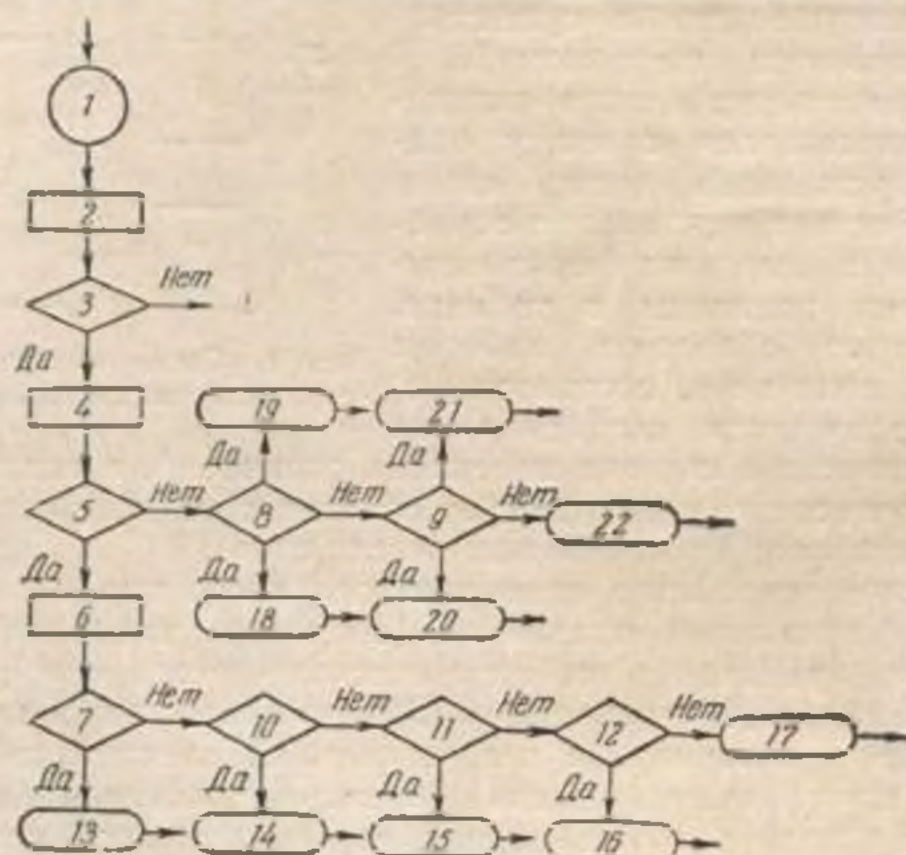


Рис. 2. Блок-схема процедуры узнавания:

1 — «а» — три конечные буквы входного слова; 2, 4, 6 — выделение г, б, в; 8 — сравнение г с а; 5 — сравнение б с а, к, х; 7 — сравнение в с гласными; 8 — сравнение б с ж, ч, ш, щ; 9 — сравнение б с ц; 10 — сравнение в с д; 11 — сравнение в с в; 12 — сравнение в с ж, ч, ш, щ; 13 — 22 — выходные сигналы, определяющие 1 — 10 типы склонения; — — — посылка выходных сигналов на «нуль-орган»; 18, 20 да* — сигнал да при наличии ударного окончания.

Как видно из приведенной блок-схемы, процедура узнавания реализуется путем сравнения не более чем трех конечных букв заданного слова с запасенными константами. Поэтому такая процедура невозможна без предварительного решения задачи выделения трех конечных букв исходного имени существительного. Основным назначением процедуры дифференциации слова является решение этой задачи. В процедуре дифференциации, кроме того, определяется полное количество букв в слове, необходимое для нормальной работы блока печати.

При формировании процедуры дифференциации слова надо иметь в виду, что длина элементов множества S колеблется в широких пределах (от 2-х до 15 и более знаков). Отсюда следует важность такого построения блока дифференциации, которое не зависело бы от длины слова. Успешное решение этой задачи связано прежде всего с выбором подходящего способа ввода информации в электронно-вычислительную машину. В настоящей работе входные слова кодировались побуквенно (одной букве соответствовал код из двух восьмеричных цифр) и записывались в длинных ячейках по шесть букв в каждой. Количество ячеек, необходимое для записи слова, определялось его длиной. В последней ячейке свободные от букв разряды оставались нулевыми. Такой способ кодирования позволяет сравнительно легко найти конец слова произвольной длины, а следовательно, произвести подсчет полного числа букв

в слове и выделить из его состава три конечные буквы. Тем самым осуществляется построение процедуры дифференциации, не зависящей от длины слова, поступающего на вход, что в конечном счете позволяет получить вполне общую модель морфологической классификации (входящие в эту модель процедуры сравнения и печати являются стандартными и здесь не описываются).

Исходное множество S равно объединению рассмотренного подмножества, образованного именами существительными, имеющими окончание *-а* в именительном падеже единственного числа, и ряда других подмножеств, элементами которых являются имена существительные с окончаниями *-я*, *-е*, *-о*, *-ь*, *-и*, а также с чистой основой (чистой основой принято называть слово без окончания типа *круг*, *песок* и др.). Отсюда следует, что общее решение задачи морфологической классификации достигается построением процедур узнавания для каждого из перечисленных выше подмножеств, возможность которого вытекает из аксиомы достаточности формальных признаков. Каждая из таких процедур представляет собой отдельный подблок общей процедуры узнавания, а их совокупность определяет структуру оператора преобразования F полной модели морфологической классификации множества имен существительных. Ясно, что эта простая в принципе структура реально имеет довольно громоздкий вид, легко объясняющийся строгостью и полнотой постановки задачи (ср. в связи с этим неизбежную громоздкость формальных грамматик в математической лингвистике [4]).

Описанная модель практически реализована на электронно-вычислительной машине «Урал-4». Исходная информация вводится в машину как с перфокарт, так и непосредственно с пульта. Морфологическая классификация поступающей информации осуществляется в результате вывода на печать сигналов «да», «нет» или «не знаю» при подаче на вход каждой пары слов.

Отметим в заключение, что построенная модель морфологической классификации существительных может быть использована также для решения ряда смежных задач. Сюда относится, в частности, задача построения математической модели склонения имен существительных. Действительно, в основу работы такой модели можно положить определение типа склонения заданного слова, т. е. одну из главных промежуточных операций, выполняющихся в процессе функционирования модели морфологической классификации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Г. Белоногов. Распределение частот появления флексивных классов русских слов. Сб. «Проблемы кибернетики», вып. 11. Изд-во «Наука», 1964.
2. А. В. Захарова. Усвоение дошкольниками падежных форм. Докл. Акад. пед. наук РСФСР, 1958, № 3.
3. М. И. Попова. Грамматические элементы языка в речи детей дошкольного возраста. «Вопросы психологии», 1958, № 3.
4. А. В. Гладкий, И. А. Мельчук. Элементы математической лингвистики. Изд-во «Наука», 1969.

ИДЕИ И ИДЕАЛЫ

В. С. Манешин

Еще древнегреческие философы считали идеи особой формой разумной деятельности. Аристотель отождествлял их с понятиями и категориями, служащими для познания всеобщего и необходимого в форме как активном начале вещей. И. Кант отмечал, что в отличие от суждения, присущего рассудку, умозаключения в качестве функции ра-

зума предполагают высшие формы синтеза эмпирических актов рассудка путем формирования идей или понятий разума, выходящих за пределы возможного опыта. «Под идеей я разумею,— писал он,— такое необходимое понятие разума, для которого в чувствах не может быть дан никакой адекватный предмет... Эти понятия трансцендентны и выходят за пределы всякого опыта, в котором, следовательно, никогда не бывает предмета, адекватного трансцендентальной идее» [3, 358—359].

Несмотря на идеалистическую основу, это кантовское определение означало вместе с тем значительный шаг вперед в понимании природы и сущности идеи как высшей формы теоретического познания. Кант правильно отмечал, что всякое человеческое познание начинается с созерцания, переходит от него к понятиям и заканчивается идеями, не выходящими, как и предшествующие элементы, за сферу возможного опыта и составляющими вместе с ними высшую познавательную способность, истинное назначение которой «состоит в пользовании всеми методами и их основоположениями только для того, чтобы проникнуть в самую глубь природы сообразно всем возможным принципам единства, из которых главное составляет единство целей, но никогда не переходит грани природы, за которыми для нас нет ничего, кроме пустоты» [3, 591].

Идея, которую каждый создает в себе самом и судит по ней обо всем, что может быть объектом вкуса или служить примером суждения последнего, и даже о вкусе остальных людей, есть, утверждал Кант, идеал: «Идея означает, собственно говоря, некое понятие разума, а идеал — представление о единичной сущности, адекватной какой-либо идее» [4, 236]. Он изолировал идею от объективного содержания, отрывал ее от реального мира и на этом основании приходил к выводу о неспособности разума проникнуть в сущность вещей в себе. Гегель, наоборот, наделял идею объективной истинностью, рассматривал ее как объективно значимую. «Идея есть,— писал он,— адекватное понятие, объективная истина или истина как таковая. Если что-либо истинно, оно истинно через свою идею или, иначе говоря, нечто истинно лишь постольку, поскольку оно есть идея» [5, 214]. Как индивидуальное оформление действительности, соразмерной своему понятию, идея предстает в виде идеала. «В идеале особенная индивидуальность и субстанциональные должны,— утверждал Гегель,— как раз оставаться между собой в неразрывном созвучии и, поскольку идеалу присуща свобода и самостоятельность субъективности, постольку окружающий мир состояний и условий не должен обладать такой существенной объективностью, которая существовала бы сама по себе, независимо от субъективного и индивидуального» [6, 184—185]. Идеал для него реален, он вторгается в повседневную действительность, «в пошлую прозу жизни» и реализуется человеком как его средоточием путем сообщения «души всему этому внешнему» [6, 251]. Именно поэтому идеал причислялся к категории духа и рассматривался как проявление некой «абсолютной идеи». Положение Гегеля об идеале как «живой индивидуальности» восприняли многие авторы как прошлых, так и современных философских концепций. Широко стал обсуждаться и вопрос о природе идеала, соотношении в нем объективного и субъективного начал. Выводы, явившиеся результатом этой дискуссии, однако, нуждаются в дополнениях и уточнениях.

В различных формах мышления (от ощущений до умозаключений) в любой данный момент объективная действительность осознается как законченная система знаний, выход за пределы которой возможен лишь

на основе высшего синтеза и теоретических предположений относительно других, еще не познанных ее сторон, свойств и закономерностей. Первую функцию разум осуществляет посредством умозаключений, вторую — с помощью идей.

Как высшая форма мышления идея, синтезируя добытые об объекте знания и опираясь на них, стремится постичь не известные еще возможности последнего и определить тенденции его развития. Она, следовательно, не описывает предмет таким, каким он представляется в уже имеющихся знаниях, а стремится проникнуть в суть того, каким он «может быть». Отсюда способность идеи направлять практическую деятельность, создавать идеальную форму будущей вещи или процесса и тем самым совершать переход от абстрактного к конкретному.

Идеи порождаются творческим мышлением, переходящим в действие, стремление человека к познанию и претворению добытых знаний. Как и всякое знание, идеи отражают объективную реальность, закономерности ее развития и вместе с тем указывают желательное для субъекта направление его практической деятельности, цель последней.

Идеи развиваются лишь посредством преодоления противоречий: достигнув определенного рубежа, познание продолжает совершенствоваться, приближаясь к абсолютной истине благодаря возникновению новых идей и отрицанию старых путем их реализации или в результате «снятия» последующим развитием знания. Новые идеи, более соответствующие достигнутому уровню знаний и возможности их претворения в действительность, приходят на смену старым, как только наука накопит определенный фактический материал, откроет не известное ранее и если прежние идеи уже не могут отразить сложного многообразия непрерывно развивающейся действительности и должным образом его синтезировать.

В непрерывном движении знания идеи не только заменяются, но и изменяются — конкретизируются, совершенствуются, дополняются. В случае реализации идея превращается в объективную реальность и перестает быть таковой.

Взаимосвязь и возможность перехода различных форм мышления от низших к высшим обеспечивают такое развитие процесса в целом, которое в конечном счете завершается идеей. С этой точки зрения всякую мысль следует рассматривать в перспективе ее развития как идею: чтобы стать ею, мысль должна совершить переход от конкретного к абстрактному, затем в своем новом качестве проделать обратный путь и воплотиться в теорию, а через посредство практической деятельности — в реальные вещи или процессы. В первом случае при восхождении от конкретного к абстрактному идея на своем завершающем этапе выражается посредством умозаключений, во втором (т. е. при движении от абстрактного к конкретному) — всеми другими формами мышления, среди которых суждениям принадлежит ведущая роль: они объединяют понятия в определенную систему, синтезируют многочисленные абстракции, намечают контуры целостного образа изучаемого предмета или процесса, обеспечивая тем самым конкретное, многостороннее знание о нем.

Своим происхождением идеи обязаны в конечном счете опыту, общественно-исторической практике, которая порождает их и благодаря которой они претворяются в действительность. Опыт, практическая деятельность людей сохраняют связь идей с внешним миром и обеспечивают их превращение в объективную реальность. Благодаря теоретическому познанию человек видит объект в его возможностях, всесторонних связях и отношениях, в перспективе противоречивого разви-

тия. Опыт же, практика претворяют эту возможность в действительность. «Идея... есть совпадение (согласие) понятия и объективности («общее»). Это — во-1-х. Во-2-х, идея есть отношение для себя сущей (-якобы самостоятельной) субъективности (-человека) к отличной (от этой идеи) объективности... Познание есть процесс погружения (ума) в неорганическую природу ради подчинения ее власти субъекта и обобщения (познания общего в ее явлениях)...» [1, 176].

В процессе познания субъект стремится получить объективные, конкретные и исчерпывающие знания относительно природы и сущности окружающих его предметов и явлений, постичь абсолютную истину. «Совпадение мысли с объектом, — писал В. И. Ленин, — есть процесс: мысль (-человек) не должна представлять себе истину в виде мертвого покоя, в виде простой картины (образа), бледного (тусклого), без стремления, без движения» [1, 176—177]. Одна из важнейших сторон истины состоит в ее объективности, соответствии добытых знаний объективной действительности. Вторую, не менее важную сторону истины как процесса составляет проблема полноты полученных знаний, соотношения относительной и абсолютной истины. Первая отражает действительность верно, но не полно, вторая дает исчерпывающее и абсолютно достоверное знание, представленное суммой бесконечного ряда относительных истин.

Абсолютные и относительные истины объективны, хотя и выражаются в субъективных формах — ощущениях, восприятиях, представлениях, понятиях, суждениях, умозаклчениях. Идеи в отличие от истины, наряду с совпадением знания с его объектом, одновременно содержат в себе, благодаря активности человеческого сознания, и субъективный фактор. Они выступают как высшая форма познания возможностей, тенденций, перспектив, общих закономерностей развития объектов и поэтому по содержанию и форме своего существования стремятся стать объективной истиной, а также включают в свое содержание постановку цели и определение направления практической деятельности, образование идеальной формы будущей вещи или процесса в соответствии с имеющимися потребностями.

В движении идеи ее объективный и субъективный факторы не только противостоят друг другу как противоположности, от исхода борьбы между которыми зависит совпадение знания с его предметом, но и выступают в определенном единстве: объективный фактор предопределяет конкретность знания, субъективный — желательность воплощения последнего в тех или иных предметах и процессах, соответствующих потребностям субъекта. Приобретая в границах идеи относительно самостоятельное значение, субъективный фактор становится идеалом и силой, бесконечно движущей процесс познания к абсолютной истине.

Идеалы — важнейшие орудия поиска, средство, с помощью которого люди оказываются в состоянии выбирать из возможных вариантов будущей модели наиболее желательный и превращать его в реальность.

Как образец, норма познания и практической деятельности идеал обозначает не само действительное движение, развитие, отрицающее нынешнее состояние окружающего мира и знание о нем, а тот рубеж, то желаемое совершенство его, идеальный образ, материальное воплощение которого представляет собой цель человеческой деятельности. Это должное и совершенное, возможное в будущем, ближайшем или отдаленном в результате разрешения противоречий прошлого и установления нового, выраженное в понятиях и категориях, их связях в виде суждений и умозаклчений, возникающих из синтеза знаний и идей. Такое оформление вполне логично и вытекает из способности челове-

ского сознания проникать в сущность вещей, познавать управляющие многообразной и противоречивой действительностью законы. Посредством мышления при переходе от конкретного к абстрактному человек намечает соответствующую закономерному развитию действительности цель и указывает на свое отношение к ней в формах, наиболее полно выражающих сущность и специфику самого идеала, его тенденцию сочетать желаемое с истинным. «Мышление, — писал В. И. Ленин, — восходя от конкретного к абстрактному, не отходит — если оно *правильное*... от истины, а подходит к ней... абстракции отражают природу глубже, вернее, *полнее*» [1, 152]. Конкретизация идеала, его осуществление и воплощение в действительность связаны с обратным движением познания, переходом от абстрактного к конкретному.

Иной подход к решению вопроса, взгляд на идеал как на должное и совершенное в конкретно-чувственной, а не абстрактной форме противоречат самой природе идеала, неизбежно ограничивают его содержание наличным состоянием — тем, что уже есть, вместо того, что должно быть и что может выражаться лишь в форме понятий, категорий. В качестве будущего, но еще нереального объекта, в виде цели человеческой деятельности идеал всегда, независимо от его отдаленности от наличного состояния, формируется путем отвлечения мышления от конкретного многообразия действительности и выражается бесконечной суммой общих понятий, дающих конкретное в его полноте. Только при этом условии идеал сохранит свое значение конечной, исторической перспективы развития познания и практики, цели человеческой деятельности по преобразованию окружающего мира, будет неизменно сопровождать идеи в их движении к истине и наполняться новым содержанием, как только сам он воплотится в предметы, явления или процессы.

Идеалы, как и вся совокупность знаний человека об окружающем его мире, постоянно изменяются и по мере проникновения человека в тайны природы и бытия развиваются не только в своих общих положениях, но и, если для этого имеются достаточные данные, в подробностях и деталях.

Общие положения обозначаются понятиями, категориями, подробностями — образами, доступными непосредственному восприятию. Цель познания и практической деятельности как ближайшего, так и отдаленного будущего всегда намечается в общих чертах, в форме общих положений, подробности учитываются только в случае приближения к ней, при условии реализации составляющих идеал общих положений. Иначе, идеал перестает быть таковым и уступает место тому, что уже есть в наличном знании. Это, однако, не значит, что идеал вообще невозможен в конкретно-чувственной форме: последняя необходима на первоначальной стадии, в момент, когда идеал, опираясь на эмпирический опыт, готовится подняться над ним ради его преодоления и в период воплощения в материальную действительность, полной или частичной конкретизации различных идеальных устремлений.

Идеал возникает на основе анализа действительности во всей ее сложности, противоречивости, а также с учетом исторически назревших задач и тенденций развития. Содержание его указывает на возможную и вместе с тем желательную перспективу движения к цели. В отрыве от жизни и потребностей человечества любой идеал, как бы он ни был заманчив, остается лишь беспочвенным пожеланием, становится ложным, а всякая деятельность, направленная к его осуществлению, оказывается в подобных случаях бесплодной и безрезультатной. Если же идеал совпадает с объективно назревшими потребностями и целя-

ми, учитывает тенденции развития нового и в строгом соответствии с ними формирует различные требования к той или иной области окружающего мира, он в состоянии вызвать соответствующий отклик у своих носителей и вдохновить их на определенные действия с целью его осуществления, стать материальной силой.

По мере приближения к намеченным идеалом условиям и к этапу развития он наполняется новым содержанием, не известными ранее понятиями и суждениями относительно перспектив удовлетворения в более или менее отдаленном будущем непрерывно развивающихся и усложняющихся потребностей субъекта. Содержание идеала всегда обусловлено исторически реальным бытием, общественно-исторической практикой, характером взаимодействия между человеком и природой, личностью и обществом. В. И. Ленин писал в работе «Экономическое содержание народничества и критика его в книге г. Струве», что в классовом обществе марксист сличает идеал «не с современной наукой и современными нравственными идеями», а с *существующими классовыми противоречиями*, и формулирует его поэтому не как требование «науки», а как требование такого-то класса, порождаемое такими-то общественными отношениями (которые подлежат объективному исследованию) и достижимое лишь так-то вследствие таких-то свойств этих отношений. Если не свести *таким образом* идеалы к фактам, то эти идеалы останутся невинными пожеланиями, без всяких шансов на принятие их массой и, следовательно, на их осуществление» [2, 436].

Идеал не отражает действительности непосредственно, хотя и возникает из нее: его содержание и назначение определяются субъективными устремлениями, порождаемыми, в свою очередь, человеческими потребностями. Он взаимосвязан с последними, зависит от них, ими определяется, обозначает не истину и не действительность, а такой рубеж в их развитии, достижение которого ассоциируется с наиболее полным удовлетворением потребностей человека.

Различают индивидуальные и общественные идеалы, соответственно выражающие цели и задачи, понятия и суждения отдельного человека или социальной группы, класса, нации, общества о будущем желаемом совершенстве окружающего мира в целом или его отдельных сторон. Подобное деление не исключает вместе с тем как взаимодействия, так и взаимообусловленности индивидуальных и общественных идеалов, их диалектического единства, существования общественных норм, определяющих их содержание.

Идеалы различаются также в зависимости от того, какую сторону жизни и деятельности личности или общества они выражают своим содержанием, в пределах какой сферы общественного бытия либо формы общественного сознания они возникают и развиваются. В последнем случае идеалы определяются как научные, политические и правовые, нравственные, философские и религиозные, художественные и эстетические. Их разнообразие обусловлено многогранностью самого общественного сознания, наличием в нем различных по содержанию и направлению идей, теорий, взглядов, возникающих на основе общественного бытия, обратным воздействием на него, запросами и потребностями, ролью в общественной жизни.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 29.
2. В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 1.
3. И. Кант. Соч., т. 3. Изд-во «Мысль», М., 1964.
4. И. Кант. Соч., т. 5. Изд-во «Мысль», М., 1964.
5. Гегель. Соч., т. 6.
6. Гегель. Соч., т. 12.

УДК 62.506.2

Об основаниях информационной теории зрения. Каган В. К. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6, 1971, стр. 3—16.

Исследуются возможности описания работы зрения с помощью существующих математических моделей и оценки количества информации, перерабатываемой зрительным анализатором при восприятии сложных зрительных картин.

Таблиц 3. Библиографических ссылок 11.

УДК 62.506.2

К вопросу о моделях зрительного восприятия. Белик Я. Я. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6, 1971, стр. 16—20.

Предлагаются математические модели восприятия удаленности предметов от поверхности Земли на основе механизмов конвергенции, аккомодации и монокулярного параллакса. Теоретические расчеты, выполненные на основе моделей, подтверждаются опытными данными.

Библиографических ссылок 2.

УДК 62.506.2

Математическое описание некоторых явлений инерции зрения. Качко Е. Г., Бондаренко М. Ф. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6, 1971, стр. 21—24.

Исследуются реакции зрительной системы на периодические мелькания яркости. Таблиц 1. Рисунков 2. Библиографических ссылок 1.

УДК 2-10-2

Построение функции распределения волокон нерва по диаметрам на основе электрофизиологических измерений. Парамонов Ю. В. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6, 1971, стр. 24—31.

Рассматривается построение некоторой функции распределения аксонов нерва по диаметрам. Знание качественного характера поведения этой функции позволит судить о функциональной нагрузке того или иного нерва.

Рисунков 7. Библиографических ссылок 4.

УДК 62.506.2

Вопросы теории краевого контраста зрения человека. Пуятин Е. И., Сердюченко В. Я. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6, 1971, стр. 32—39.

Рассматривается аксиоматический метод построения математической модели краевого контраста зрения человека.

Рисунков 3. Библиографических ссылок 7.

УДК 62.506.2

К анализу изображений нейроподобными структурами. Марченко С. Ф., Червов В. Г. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6, 1971, стр. 39—43.

Рассматривается возможность применения нейроподобных элементов и биологических принципов переработки сигналов для анализа изображений.

Таблиц 1. Рисунков 1. Библиографических ссылок 5.

УДК 62.506.2

Некоторые вопросы моделирования громкостных преобразований в слухе. Еремин Г. С., Дюбко Г. Ф. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6, 1971, стр. 43—49.

Рассматривается влияние фазовых спектров на громкость сложных звуковых сигналов. Исследована часть консонирующих тонов интервалов и созвучий из пяти равногромких синусоидальных тонов. Для некоторого класса сигналов предлагается математическая модель независимости громкости от фазовых соотношений.

Таблиц 2. Рисунков 4. Библиографических ссылок 7.

УДК 62.506.2

Психофизические исследования механизмов нормализации человеком зрительных картин. Путятин Е. П., Шульгин И. В., Лопатченко Б. К., Юрченко В. П. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6, 1971, стр. 50—56.

Описывается экспериментальное исследование зрительного анализатора по нормализации зрительных образов. Определены пороги классификации человеком зрительных картин, подвергнутых некоторым аффинным преобразованиям — изменению масштаба, сдвигу и повороту.

Таблиц 3. Рисунков 3. Библиографических ссылок 8.

УДК 62.506.2

Модель запоминающего устройства на нейроподобных элементах, реализующего голографические принципы записи и считывания информации. Соломатин В. Ф. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6, 1971, стр. 56—60.

Описывается модель запоминающего устройства, обладающего свойством распределения хранимой информации, устойчивого к повреждениям запоминающих элементов, с параллельной записью и считыванием.

На основании анализа модели высказываются предположения относительно возможных способов функционирования памяти мозга.

Рисунков 3. Библиографических ссылок 10.

УДК 62.506.2

О структуре процесса запоминания и ее моделировании. Клевцов В. П., Ляудис В. Я. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6, 1971, стр. 60—62.

На основе экспериментальных психологических исследований рассматривается структура процесса долговременного запоминания человеком. Приводятся результаты математического и физического моделирования обработки и запоминания информации на нижних уровнях зрительного восприятия. Использование свойств нейронов дает возможность получить описание изображения с любой требуемой точностью.

Таблиц 1. Рисунков 1. Библиографических ссылок 5.

УДК 2-10-2

Эксперименты по распознаванию образов с помощью растущих сетей. Гладун В. П., Мазеева С. П., Сава И. Г. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6, 1971, стр. 63—69.

Приводится описание алгоритма обучения растущих сетей распознаванию образов. Рассматриваются метод реализации этого алгоритма в виде программы вычислительной машины и эксперименты на ЦВМ, иллюстрирующие его работу.

Рисунков 3. Библиографических ссылок 5.

УДК 62.506.2

К вопросу об аксиоматическом построении математических моделей. Шабанов-Кушнаренко Ю. П., Еремин Г. С., Качко Е. Г., Марченко Ю. С., Пчелинов В. П., Тищенко В. В. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6, 1971, стр. 70—74.

Предлагаются математические методы для описания объектов, имеющих определенные входные и выходные сигналы.

Библиографических ссылок 3.

УДК 62.506.2

Оптическая модель детектора ориентированных отрезков зрительного анализатора животных. Бахтингозин В. А., Бугай Ю. П., Червов В. Г. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6, 1971, стр. 74—78.

Предлагается оптическая модель детектора ориентированных отрезков на основе цилиндрических и торических линз. Рассматриваются вопросы возможного применения модели в качестве фильтра ориентации прямолинейных отрезков предъявляемого объекта.

Рисунков 2. Библиографических ссылок 6.

УДК 62.506.2

Моделирование процесса трансформации угловых величин в видимые. Белик Я. Я. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6, 1971, стр. 79—82.

Рассматривается модель трансформации угловых величин в видимые с учетом пороговых свойств зрительного анализатора. Указано практическое применение этой модели для восприятия удаленности от поверхности Земли.

Библиографических ссылок 4.

УДК 62.506.2

Ассоциативно-сетевая модель памяти. Сообщение II. Головань Э. Т., Лук А. Н. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6, 1971, стр. 82—94.

Рассматриваются нейрофизиологические предпосылки ассоциативно-сетевой модели памяти, затем предлагается модель. Сформулированы условия, необходимые для моделирования сознания

Библиографических ссылок 9.

УДК 62.506.2

Интеграция отражения и отношения в рефлекторном акте. Манешин В. С. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6, 1971, стр. 94—104.

Анализируется структура рефлекторного акта, рассматриваются составляющие его части, взаимодействие между ними и их роль в общей системе регулирования отношений организма с окружающей его средой. Решен вопрос о соотношении объективного и субъективного, отражения и отношения к отраженному в каждом совокупном психическом обороте.

Рефлекторный акт представляет собой единство ощущений, оценок и эмоций, обеспечивающих получение организмом необходимой информации об окружающей среде, его избирательную активность и соответствующие потребности состояния всей живой системы в целом.

Библиографических ссылок 9.

УДК 62.506.2

Об одной математической модели морфологической классификации множества имен существительных русского языка. Шабанов-Кушнаренко Ю. П., Якименко Л. И. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6, 1971, стр. 104—107.

Построена и реализована программная модель морфологической классификации множества имен существительных по типам склонения. Принцип действия модели основан на идее нуля-метода — модификации кибернетического метода «черного ящика». Модель включает процедуры (блоки) дифференциации слова, узнавания, сравнения и печати. Центральное место занимает процедура узнавания, предназначенная для определения (на основании формальных признаков) типа склонения заданного слова. Морфологическая классификация исходной информации осуществляется путем сравнения типов склонения каждой поступившей на вход пары слов.

Таблиц 1. Рисунков 2. Библиографических ссылок 4.

УДК 62.506.2

Идеи и идеалы. Манешин В. С. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6, 1971, стр. 107—112.

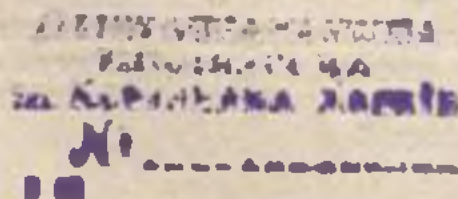
При посредстве идей как формы мышления разум выходит за пределы существующей системы знаний и одновременно намечает желательное для субъекта направление развития действительности. Возникает диалектическое единство объективного и субъективного, представленное идеями и идеалами. Посредством идей, синтезирующих добытые об объекте знания, разум стремится постичь неизвестные еще возможности его и тенденции развития. Поэтому идеи отражают объективную реальность, закономерности ее развития и указывают субъекту желательное направление его практической деятельности.

Субъективный фактор, приобретая относительно самостоятельное значение, становится силой, бесконечно движущей процесс познания к абсолютной истине. Субъективную сторону составляют идеалы как совокупность суждений о желательном с точки зрения субъекта направлении и о результатах развития.

Библиографических ссылок 6.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
В. К. Каган. Об основаниях информационной теории зрения	3
Я. Я. Белик. К вопросу о моделях зрительного восприятия	16
Е. Г. Качко, М. Ф. Бондаренко. Математическое описание некоторых явлений инерции зрения	21
Ю. В. Парамонов. Построение функции распределения волокон нерва по диаметрам на основе электрофизиологических измерений	24
Е. П. Путятин, В. Я. Сердюченко. Вопросы теории краевого контраста зрения человека	32
С. Ф. Марченко, В. Г. Червов. К анализу изображений нейропо- добными структурами	39
Г. С. Еремин, Г. Ф. Дюбко. Некоторые вопросы моделирования гром- костных преобразований в слухе	43
Е. П. Путятин, И. В. Шульгин, Б. К. Лопатченко, В. П. Юр- ченко. Психофизические исследования механизмов нормализации человеком зри- тельных картин	50
В. Ф. Соломатин. Модель запоминающего устройства на нейроподобных элементах, реализующего голографические принципы записи и считывания инфор- мации	56
В. П. Клевцов, В. Я. Ляудис. О структуре процесса запоминания и ее моделировании	60
В. П. Глазун, С. П. Мазеева, И. Г. Сава. Эксперименты по рас- познаванию образов с помощью растущих сетей	63
Ю. П. Шабанов-Кушнаренок, Г. С. Еремин, Е. Г. Качко, Ю. С. Марченко, В. П. Пчеллинов, В. В. Тищенко. К вопросу об аксиоматическом построении математических моделей	70
В. А. Бахтигозин, Ю. П. Бугай, В. Г. Червов. Оптическая мо- дель детектора ориентированных отрезков зрительного анализатора животных . .	74
Я. Я. Белик. Моделирование процесса трансформации угловых величин в видимые	79
Э. Т. Головань, А. Н. Лук. Ассоциативно-сетевая модель памяти. <i>Сообщение II</i>	82
В. С. Манешин. Интеграция отражения и отношения в рефлекторном акте	94
Ю. П. Шабанов-Кушнаренок, Л. И. Якименко. Об одной мате- матической модели морфологической классификации множества имен существитель- ных русского языка	104
В. С. Манешин. Иден и идеалы	107
Рефераты	113



Редактор Э. В. Ганичева
 Техредактор Л. Е. Мокроусова
 Корректор Л. П. Пипенко

П 373712

Сдано в набор 21/1 1971 г. Подписано к печати 18/VI 1971 г. БЦ 50257. Формат
 70×108^{1/16}. Объем: 7,25 физ. печ. л., 10,1 усл. печ. л., 10 уч.-изд. л. Зак. 1-215.
 Тираж 1000. Цена 1 руб. Св. ТП 1971 г. поз. 370

Типоофсетная фабрика «Коммунист» Комитета по печати при Совете Министров УССР.
 Харьков, ул. Энгельса, 11.