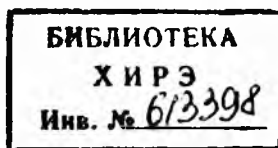


ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

Республиканский
межведомственный
тематический
научно-технический
сборник

ВЫПУСК
12

83



2011

ИЗДАТЕЛЬСКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «ВИЩА ШКОЛА»
ИЗДАТЕЛЬСТВО ПРИ ХАРЬКОВСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
Харьков — 1974

Сборник посвящен математическому и физическому моделированию процессов переработки информации на различных уровнях нервной системы. Рассмотрена надежность вычислений при наличии шумов в нейронных сетях зрительного анализатора, активная перцептивная деятельность анализаторов нервной системы и их отношения с объектами внешней среды. Сформулированы теоретические предпосылки преобразования нормализации изображений. Представлены математические модели процесса обработки цветовой информации на различных уровнях зрительной системы и информации о контурных и сводимых к ним изображениях, математические модели электрических процессов в нервной ткани, оптико-электронные и телевизионные модели нейронов и рецептивных полей. Описаны технические устройства для экспериментального исследования нервной системы и ее элементов.

Сборник предназначен для научных работников и инженеров — специалистов в области кибернетики, вычислительной техники и биологии.

Редакционная коллегия:

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

Адрес редакционной коллегии:

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

ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

**Республиканский межведомственный тематический
научно-технический сборник**

Выпуск 12

Редактор Э. В. Ганичева. Обложка художника И. Ф. Криво-ручко. Технический редактор Г. П. Александрова. Корректор Н. С. Калинина

Сдано в набор 17/IX 1973 г. Подписано в печать 20/III 1974 г. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская №3. Усл.-печ. л. 10. Уч.-изд. л. 10,8. Тираж 1000. Заказ 3-2018. БЦ 50079. Цена 1 руб. 08 коп.

Издательство издательского объединения «Вища школа» при Харьковском государственном университете, 310003, Харьков, 3, Университетская, 16.

Харьковская книжная фабрика «Коммунист» республиканского производственного объединения «Полиграфкнига» Госкомиздата УССР. Харьков, ул. Энгельса, 11.

П— $\frac{30501-157}{M226(04)}-74$ 316—74

© Харьковский институт радиоэлектроники, 1974.

НАДЕЖНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ШУМОВ В ЗРИТЕЛЬНОМ АНАЛИЗАТОРЕ

Зрительный анализатор функционирует в постоянно изменяющихся условиях окружающей и внутренней среды организма. Несмотря на это, выполняемые им вычислительные операции отличаются высокой надежностью, что позволяет животному эффективно приспосабливаться к среде обитания.

Для обеспечения надежной работы нейронной сети зрительного анализатора при малых поражениях (шумах) важное значение имеет избыточное кодирование зрительных сигналов. При анализе надежно работающих нейронных сетей необходимо исходить из принципа функционального кодирования [1]. Сущность его заключается в том, что каждый слой нейронной сети одновременно выполняет операции декодирования сигналов, проходящих из других слоев, операцию вычисления некоторой функции от декодированных сигналов, а также операцию кодирования сигналов, передаваемых в другие слои. При использовании этого принципа между нейронными слоями передаются только избыточно закодированные сигналы и надежность вычислений в сети определяется надежностью ее входных и выходных слоев, в которых сигналы не закодированы. Необходимым условием осуществления данного принципа является однотипность операций кодирования, декодирования и вычисления. С. Виноград и Дж. Коуэн [1] ограничили осуществимость принципа функционального кодирования классом логических операций и корректирующих (n, k) кодов. Однако поскольку нейроны обладают не только логическими, но и интегральными свойствами, необходимо исследовать возможность осуществления этого принципа в классе интегральных операций.

Если такая возможность существует, то интегральное преобразование [2]

$$P_l(\vec{x}, t) = \varphi \sum_k \iiint_{R^i} \int_{-\infty}^t G_{lk}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') P_k(\vec{x}', t') dt' d\vec{x}', \quad (1)$$

которое совершает l -й слой нейронов зрительного анализатора

над входным сигналом k -го слоя $P_k(\vec{x}, t)$, может быть представлено в виде последовательности трех интегральных преобразований с функциями влияния $G_k^{ДК}$, $G_{lk}^{ВМЧ}$, $G_l^{КД}$ (рис. 1). В дальнейшем будем рассматривать только пространственные интегральные операции кодирования и декодирования, так как использование временных кодов значительно задержало бы передаваемые сигналы [3], что недопустимо в работе зрительного анализатора

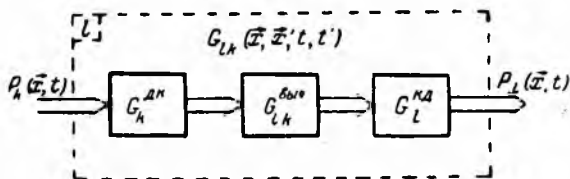


Рис. 1.

животного. Между ядрами отдельных интегральных преобразований $G_k^{ДК}$, $G_{lk}^{ВМЧ}$ и $G_l^{КД}$ существует связь

$$G_{lk}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') = \iiint_{R^3} \iiint_{R^3} G_l^{КД}(\vec{x}, \vec{x}'', t) G_{lk}^{ВМЧ}(\vec{x}'', \vec{x}'', t, t') G_k^{ДК}(\vec{x}'', \vec{x}', t) d\vec{x}'' d\vec{x}'', \quad (2)$$

где $G_k^{ДК}(\vec{x}'', \vec{x}', t)$ — ядро интегрального преобразования, соответствующего операции декодирования сигналов k -го слоя на входе l -го слоя; $G_{lk}^{ВМЧ}(\vec{x}'', \vec{x}'', t, t')$ — ядро операции вычисления, выполняемой в l -м слое над сигналом k -го слоя; $G_l^{КД}(\vec{x}, \vec{x}'', t)$ — ядро операции кодирования l -го слоя нейронной сети.

Связь между операциями кодирования k -го и декодирования l -го слоя подобна связи между прямым и обратным преобразованиями. Поэтому

$$\iiint_{R^3} G_l^{КД}(\vec{x}', \vec{x}'', t) G_k^{ДК}(\vec{x}, \vec{x}', t) d\vec{x}' = \delta(\vec{x}' - \vec{x}). \quad (3)$$

Полную реакцию l -го слоя нейронной сети зрительного анализатора можно представить в виде

$$P_l(\vec{x}, t) = \iiint_{R^3} G_l^{КД}(\vec{x}, \vec{x}'', t) \varphi \sum_k \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t G_{lk}^{ВМЧ}(\vec{x}'', \vec{x}'', t, t') \times \\ \times \iiint_{R^3} G_k^{ДК}(\vec{x}'', \vec{x}', t) P_k(\vec{x}', t') dt' d\vec{x}' d\vec{x}'' d\vec{x}''. \quad (4)$$

Из этого соотношения следует, что в каждом l -м слое нейронной сети с помощью одной интегральной операции одновре-

менно производится декодирование сигналов, поступающих из других слоев, вычисление некоторого интегрального преобразования от каждого из декодированных сигналов, сложение полученных сигналов и кодирование этой суммы одним общим кодом. Коды следует изучать в первую очередь, так как без знания кодов, используемых в зрительном анализаторе, нельзя исследовать вычислительные функции, выполняемые отдельными слоями нейронной сети.

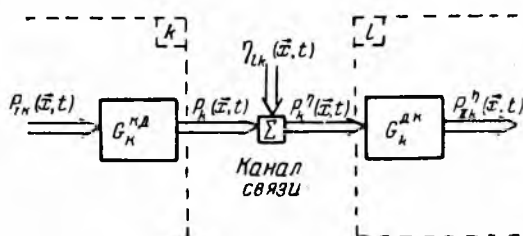


Рис. 2.

Прежде всего необходимо отыскать класс помехоустойчивых интегральных кодов, которые ослабляют шумы $\eta_{lk}(\vec{x}, t)$, действующие в канале связи k -го слоя нейронной сети с l -м слоем (рис. 2). В первом приближении шумы, связанные со спонтанным выбросом медиатора в синапсах, с изменением температуры и состава вне- и внутриклеточного пространства нервной ткани, с локальными нарушениями кровеносной системы и с другими явлениями [4,5], могут рассматриваться как аддитивные по отношению к сигналам, передаваемым в канале связи:

$$P_k^l(\vec{x}, t) = P_k(\vec{x}, t) + \eta_{lk}(\vec{x}, t). \quad (5)$$

Для упрощения математических выкладок в дальнейшем $\eta_{lk}(\vec{x}, t)$ понимается как случайная функция с нулевым математическим ожиданием $m_{\eta_{lk}}(\vec{x}, t) = 0$ и соответствующей пространственной корреляционной функцией $\text{cov}_{\eta_{lk}}(\vec{x}, \vec{x}', t)$.

Незакодированный выходной сигнал k -го слоя P_{1k} связан с декодированным входным сигналом l -го слоя P_{1lk}^l соотношением (рис. 2)

$$P_{1lk}^l(\vec{x}, t) = P_{1k}(\vec{x}, t) + \iint_{R^3} G_k^{l,k}(\vec{x}, \vec{x}', t) \eta_{lk}(\vec{x}', t) d\vec{x}'. \quad (6)$$

В частном случае, когда $G_k^{l,k}(\vec{x}, \vec{x}', t) = \delta(\vec{x} - \vec{x}')$, кодирование отсутствует и

$$P_{1lk}^l(\vec{x}, t) = P_{1k}(\vec{x}, t) + \eta_{lk}(\vec{x}, t). \quad (7)$$

Сравнение (6) и (7) показывает, что декодирование с ядром $G_k^{ДК}(x, x', t)$ преобразует только шум $\eta_{lk}(x, t)$, не влияя на передаваемый сигнал. Кодирование является эффективным, если мощность закодированного шума при всех x . Эффективность кодирования $q^2(x, t)$ описывается отношением

$$q^2(x, t) = \frac{M[\eta_{lk}^2(x, t)]}{M\left[\left\{\iiint_{R^3} G_k^{ДК}(x, x', t) \eta_{lk}(x', t) dx'\right\}^2\right]} = \frac{\text{сог } \eta_{lk}(x, x, t)}{\iiint_{R^3} \iiint_{R^3} G_k^{ДК}(x, x', t) \bar{G}_k^{ДК}(x, x'', t) \text{ сог } \eta_{lk}(x', x'', t) dx' dx''}, \quad (8)$$

где M — знак математического ожидания случайной функции; $\bar{G}_k^{ДК}$ — комплексно сопряженная функция по отношению к $G_k^{ДК}$.

Возможности использования интегральных кодов при функциональном кодировании можно определить на примере так называемых голографических кодов [6, 7], для которых в общем случае справедливы соотношения

$$G_k^{КД}(x', x'', t) = G_k^{КД}(x', t) e^{i\varphi_k^{КД}(x', x'', t)}; \quad (9)$$

$$G_k^{ДК}(x, x', t) = G_k^{ДК}(x', t) e^{-i\varphi_k^{ДК}(x, x', t)}; \quad (10)$$

$$G_k^{КД}(x', t) = [G_k^{ДК}(x', t)]^{-1}; \quad (11)$$

$$\varphi_k^{КД}(x', x'', t) = 2\pi \sum_{m=1}^3 [x'_m x''_m + v_m^k(x''_m, t)] + \mu_k(x', t); \quad (12)$$

$$\varphi_k^{ДК}(x, x', t) = 2\pi \sum_{m=1}^3 [x_m x'_m + v_m^k(x_m, t)] + \mu_k(x', t), \quad (13)$$

где $G_k^{КД}(x', t)$, $v_m^k(x''_m, t)$, $\mu_k(x', t)$ — произвольные однозначные ограниченные функции. Путем подстановки в (13) нетрудно проверить, что эти ядра соответствуют прямому и обратному преобразованиям. В частных случаях из (9) — (12) можно получить ядра преобразований Фурье и Френеля, широко используемые в когерентной оптике [5, 8].

Предпринимались попытки доказать наличие интегральных голографических кодов в мозге [6, 9, 10] в связи с проблемой памяти и «интеллектуальных функций» [11]. Однако до сих пор теоретически не обоснована эффективность этих кодов в борьбе

с шумами, хотя экспериментально подтверждена высокая устойчивость голограмм по отношению к одному из типов шумов — разрушению отдельных фрагментов голограмм [6, 7]. Такой шум можно представить как неоднородную случайную функцию, состоящую из N независимых очагов с центрами $\gamma^i = (\gamma_1^i, \gamma_2^i, \gamma_3^i) \in R^3$ и характеризующуюся корреляционной функцией

$$\text{сog}_{\eta}^N(\vec{x}', \vec{x}'', t) = \sum_{i=1}^N A_i(\vec{x}' - \vec{x}'', t) e^{-\alpha_i^2(t) \sum_{m=1}^3 [x'_m + x''_m - 2\gamma_m^i(t)]^2}, \quad (14)$$

где $A_i(\vec{x}' - \vec{x}'', t)$ — однородная составляющая корреляционной функции i -го очага шума;

$\alpha_i^{-1}(t)$ — функция, характеризующая эффективный размер i -го очага.

Аналогичный неоднородный шум отмечается в канале связи между k -м и l -м слоями нейронной сети. Он появляется при разрушении отдельных связей между нейронами и в процессе гибели групп нервных клеток в связи с заболеваниями кровеносной системы зрительных трактов. В частном случае, когда $G_k^{\text{дк}}(\vec{x}', t) e^{i\mu_k(\vec{x}', t)} = 1$, эффективность голографического кода при

$\text{сog}_{\eta_{lk}}(\vec{x}', \vec{x}'', t) = \text{сog}_{\eta}^N(\vec{x}', \vec{x}'', t)$ определяется по формуле

$$q^3(\vec{x}, t) = \frac{\sum_{i=1}^N A_i(0, t) e^{-4\alpha_i^2(t) \sum_{m=1}^3 [x_m - \gamma_m^i(t)]^2}}{\frac{\sqrt{\pi^3}}{8} \sum_{i=1}^N \alpha_i^{-3}(t) a_i(\vec{x}, t)}, \quad (15)$$

в которой $a_i(\vec{x}, t)$ — пространственный спектр однородной составляющей корреляционной функции $A_i(\vec{x}, t)$:

$$a_i(\vec{x}, t) = \iiint_{R^3} e^{-2\pi i \sum_{m=1}^3 x_m x'_m} A_i(\vec{x}', t) d\vec{x}'. \quad (16)$$

Из (15) следует, что эффективность интегрального голографического кода тем выше, чем меньше количество очагов шума N , больше расстояние между ними, меньше размеры очагов $\alpha_i^{-1}(t)$, ограниченнее полоса пространственных частот спектра $a_i(\vec{x}, t)$ и сильнее различие между отдельными спектрами очагов шума. Эти выводы подтверждаются экспериментальными данными, полученными при исследовании интегральных кодов в голографии [6, 7] и в коре мозга животных [11].

На функцию $G_k^{dk}(\vec{x}', t) e^{i\mu_k(\vec{x}', t)}$ существенные ограничения не накладываются. Поэтому при наблюдении реакции отдельных слоев нейронной сети может возникнуть представление о случайности связей между отдельными элементами сети, в связи с чем разрабатываются «вероятностные» модели нейронных сетей [12—14]. Свойства таких моделей аналогичны свойствам интегральных преобразователей, использующих шумоподобные коды [7, 15, 16].

В общем случае корреляционная функция декодированного шума l -го нейронного слоя

$$\gamma_{lk}^{dk}(\vec{x}, t) = \iiint_{R^3} G_k^{dk}(\vec{x}, \vec{x}', t) \gamma_{lk}(\vec{x}', t) d\vec{x}' \quad (17)$$

приводится к виду

$$\begin{aligned} \text{cor}_{\gamma_{lk}^{dk}}(\vec{x}, \vec{x}'', t) &= \iiint_{R^3} \iiint_{R^3} e^{-2\pi i \sum_{m=1}^3 x_m x_m} e^{2\pi i \sum_{m=1}^3 x_m'' x_m} \times \\ &\times G_k^{dk}(\vec{x}', t) e^{i\mu_k(\vec{x}', t)} G_k^{dk}(\vec{x}'', t) e^{-i\mu_k(\vec{x}'', t)} \times \\ &\times \text{cor}_{\gamma_{lk}}(\vec{x}', \vec{x}'', t) d\vec{x}' d\vec{x}'' = F_x F_{x''} \left[G_k^{dk}(\vec{x}', t) e^{i\mu_k(\vec{x}', t)} \times \right. \\ &\times G_k^{dk}(\vec{x}'', t) e^{-i\mu_k(\vec{x}'', t)} \text{cor}_{\gamma_{lk}}(\vec{x}', \vec{x}'', t) \left. \right] = \\ &= \left\{ F_x \left[G_k^{dk}(\vec{x}', t) e^{i\mu_k(\vec{x}', t)} \right] F_{x''} \left[G_k^{dk}(-\vec{x}'', t) \times \right. \right. \\ &\times \left. \left. e^{-i\mu_k(-\vec{x}'', t)} \right] \right\} * F_x F_{x''} \left[\text{cor}_{\gamma_{lk}}(\vec{x}', -\vec{x}'', t) \right], \quad (18) \end{aligned}$$

где F_x — оператор преобразования Фурье по координате \vec{x} , спектр зависит от координаты \vec{x} ;

$F_{x''}$ — оператор преобразования Фурье по координате \vec{x}'' , спектр зависит от координаты \vec{x}'' ;

* — знак операции свертки по \vec{x} и \vec{x}'' .

Из (18) следует, что чем шире полоса пространственных частот спектров функций $G_k^{dk}(\vec{x}', t) e^{i\mu_k(\vec{x}', t)}$, $G_k^{dk}(-\vec{x}'', t) e^{-i\mu_k(-\vec{x}'', t)}$, тем однороднее декодированный шум. В частном случае эти функции могут являться выборками белого шума, обладающего широкой полосой частот. Чем уже двойной спектр корреляционной

функции шума $\vec{\eta}_{lk}(\vec{x}, t)$, тем выше эффективность $q^2(\vec{x}, t)$ шумоподобных кодов.

Таким образом, шумоподобные коды позволяют превратить неоднородные шумы (например, в виде нескольких независимых очагов (13)) в однородные, которые могут подавляться специальными пространственными фильтрами. Одновременно

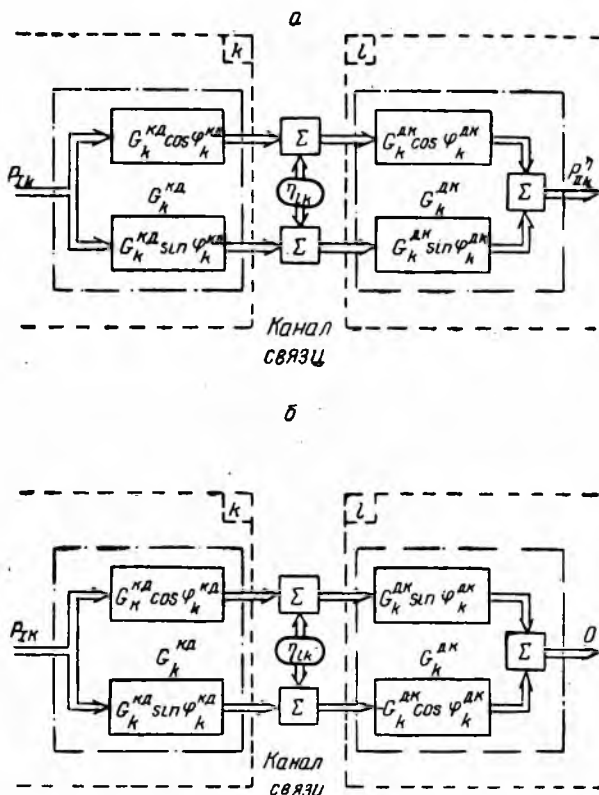


Рис. 3.

сигнал, передаваемый по каналу связи, принимает шумоподобный вид, что способствует его максимальному согласованию с каналом связи [16].

Важное следствие использования комплексных голографических кодов — многоканальность реализующей их системы. Так, вместо (3) с учетом (9) — (11) можно записать уравнения для мнимых и действительных частей ядер кодов:

$$\iiint_{R^3} \cos \left[\varphi_k^{\text{кд}}(\vec{x}', \vec{x}'', t) \right] \cos \left[\varphi_k^{\text{дк}}(\vec{x}, \vec{x}', t) \right] d\vec{x}' +$$

$$+ \iiint_{R^3} \sin \left[\varphi_k^{KD}(\vec{x}', \vec{x}'', t) \right] \sin \left[\varphi_k^{DK}(\vec{x}, \vec{x}', t) \right] d\vec{x}' = \delta(\vec{x}'' - \vec{x}); \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \iiint_{R^3} \cos \left[\varphi_k^{KD}(\vec{x}', \vec{x}'', t) \right] \sin \left[\varphi_k^{DK}(\vec{x}, \vec{x}', t) \right] d\vec{x}' - \\ & - \iiint_{R^3} \sin \left[\varphi_k^{KD}(\vec{x}', \vec{x}'', t) \right] \cos \left[\varphi_k^{DK}(\vec{x}, \vec{x}', t) \right] d\vec{x}' = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Эти соотношения требуют, чтобы существовали четыре различных типа каналов передачи сигналов в помехоустойчивой нейронной сети: 1) косинусный, 2) синусный, 3) косинус-синусный, 4) синус-косинусный (рис. 3). Косинусный и синусный каналы отличаются друг от друга смещением преобразований по отношению к полю зрения. Косинус-синусный и синус-косинусный каналы сочетают в себе относительное смещение преобразований кодирования и декодирования в пространстве R^3 с комбинированием различных последовательностей включения смещенных и несмещенных интегральных преобразований. Сложение результатов преобразований в косинусном и синусном каналах связи позволяет точно передать входной сигнал по каналу связи, произвести помехоустойчивые вычисления при наличии шумов (рис. 3, а). Вычитание сигналов, получаемых с выходов косинус-синусного и синус-косинусного каналов связи, можно использовать для проверки точности настройки кодирующих преобразователей (рис. 3, б).

Свойствами интегральных голографических кодов объясняются такие эффекты, как образная память, увеличение и уменьшение размеров зрительных образов после наблюдения за вращающейся спиралью и неприятное ощущение при осмотре полосатых узоров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноград С., Коуэн Дж. Надежные вычисления при наличии шумов. М., «Наука», 1968. 112 с.
2. Зозуля Ю. И., Червов В. Г. Модель нейронной сети зрительного анализатора. — В сб. Проблемы бионики. Вып. 9. Харьков, 1972, с. 28—36.
3. Цыбаков Б. С. Линейное кодирование сообщений. — «Радиотехника и электроника», 1962, т. 7, № 1, с. 25—38.
4. Арбиб М. Мозг, машина и математика. М., «Наука», 1968. 224 с.
5. Петров А. А. К вопросу о статистическом характере передачи сигналов в нервной системе. — «Биофизика», 1969, т. 14, № 1, с. 143—150.
6. Габор Д. Ассоциативная голографическая память. — «Зарубежная радиоэлектроника», 1970, № 4, с. 61—67.
7. Сороко Л. М. Основы голографии и когерентной оптики. М., «Наука», 1971. 616 с.
8. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. М., «Мир», 1971. 495 с.
9. Суайгерт К. Дж., Фогельхут П. О. Пространственная фильтрация в модели нейронной сети. — В кн.: Модели нейронных структур. М., «Наука», 1970, с. 244—265.

10. Baron R. J. A Model for Cortical Memory. — «J. Psychology», 1970, vol. 7, № 1, p. 37—59.
11. Лешли К. С. Мозг и интеллект. М., Соцэкгиз, 1933. 222 с.
12. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики. Перцептроны и теория механизмов мозга. М., «Мир», 1965. 480 с.
13. Appinos P. A. e. a. Dynamics of Neural structures. — «J. Theoret. Biol.», 1970, vol. 26, № 1, p. 121—148.
14. Harth E. M. e. a. Brain Functions and Neural Dynamics. — «J. Theoret. Biol.», 1970, vol. 26, № 1, p. 93—120.
15. Вакман Д. Е. Сложные сигналы и принцип неопределенности в радиолокации. М., «Сов. радио», 1965. 304 с.
16. Вакман Д. Е. Регулярный метод синтеза фазоманипулированных сигналов. М., «Сов. радио», 1967. 97 с.

УДК 62.506.2

В. П. КЛЕВЦОВ, канд. техн. наук

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ФОРМ ПЕРЦЕПТИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ. СООБЩЕНИЕ I

В настоящее время все больший интерес исследователей вызывает та сторона зрительного восприятия, которая связана с регулятивными функциями в зрительной системе (ЗС). Неудовлетворительными представляются модели, которые, претендуя на универсальность, общность и адекватность зрению, основаны исключительно на стратегии последовательной (послойной) обработки одностороннего, афферентного потока стимульной информации с периферии анализатора в центр. Наряду с афферентными связями сетчатка — мозг, существует большое число эфферентных связей, проводящих информацию в обратном направлении [1, 2].

Глобальные (мозг — сетчатка) и локальные (например, на уровне сетчатки) обратные связи обеспечивают управление зрительным аппаратом в процессе восприятия. С их помощью ЗС адаптируется к условиям внешней среды, а сенсорные механизмы приспособляются к решению текущих задач. Например, обратные, нисходящие, связи позволяют перестраивать чувствительность сетчатки, управлять порогами различения [2, 3] и т. д.

Однако эфферентные процессы ЗС все же изучены значительно меньше, чем афферентные. Так, глубоко исследовались функции сетчатки, связанные с фоторецепцией [1, 4]. Описаны сенсорные функции более старших звеньев зрительной системы — рецептивных полей сетчатки и коры, реализующие измерительные и селективные функции зрения [1, 4, 5]. Разработаны также формальные модели соответствующих механизмов, произвольно [6] или произвольно [7] воплощающие отдельные сенсорные функции зрения.

Однако до сих пор не установлено, каким образом осуществляется управление таким мощным рецепторным слоем в сетчатке высокоразвитых биосистем, какой вид должна иметь схема взаимодействий основных, также еще неопределенных параметров, которая могла бы реализовать обмен чувствительности на разрешающую способность и обратно при изменении условий наблюдения и решаемых задач восприятия. Кроме того, неизвестно, как осуществляется селекция локальных признаков (элементов формы) богатейшим арсеналом фильтров — рецептивных полей коры (РПК), существующим в зрительной коре мозга, какова формальная основа манипулятивных действий ЗС с набором РПК в процессе селекции и преднастройки при оперативном обучении и симультанном (моментальном) узнавании. Постановку такого рода вопросов можно продолжить. Искать ответы на них можно и целесообразно только в рамках построения общей модели (теории) сенсорных и перцептивных функций зрения.

В основе этой модели должны лежать какие-то наиболее общие, существенные, глобальные стратегии, а сама она должна строиться на базе общесистемных представлений. Создание такой модели имеет не только научно-познавательное значение. Техника обработки изображений в процессе совершенствования ее методов и средств по мере усложнения задач, решаемых автоматами, эволюционирует почти в том же направлении, что и зрительный аппарат живого организма. В настоящее время характеристики и задачи технических систем обработки изображений начинают приближаться к характеристикам и задачам зрения, в связи с чем важно учитывать принципы последнего.

Основными принципами построения и функционирования модели ЗС являются активность и адаптивность. Первый определяет зависимость сенсорных функций от решаемых задач и требований к сенсорным системам. Второй предполагает изменимость свойств сенсорных механизмов в зависимости от условий среды [6]. На основании этого положения строится модель активного адаптивного восприятия.

Согласно второму принципу, сенсорный элемент (СЭ) любого звена каждого уровня ЗС должен обладать схемой связей, показанной на рис. 1, а. На один из входов (1) поступает входной модальный сигнал, на второй по цепям обратных связей (локальных — 2' и центральных 2'') — управляющее воздействие. Указанные связи можно считать командными, прямыми. В таком случае афферентные цепи 1 выступают в роли обратных связей. Выработку и реализацию управляющего воздействия назовем перцептивным действием.

В целом выходной параметр СЭ определяется как функция двух входных величин (1 и 2). Воздействие, поступающее по цепям обратных связей, может быть возбуждающим и тормозящим. При этом происходит положительная или отрицательная

актуализация входных звеньев. Первая способствует срабатыванию СЭ, пересылке модального сигнала на старшие уровни, т. е. открытию входа для ввода информации в механизмы старшего уровня. Такое действие аналогично опросу датчика. Тормозное воздействие препятствует пересылке сигнала на старшие уровни, что аналогично запирающему входу сенсорного элемента.

Перцептивной деятельностью ЗС (управлением сенсорными элементами) является выработка и распределение в пространстве и времени управляющих воздействий на все СЭ или часть их в пределах времени акта наблюдения (или в пределах какого-то интервала этого времени).

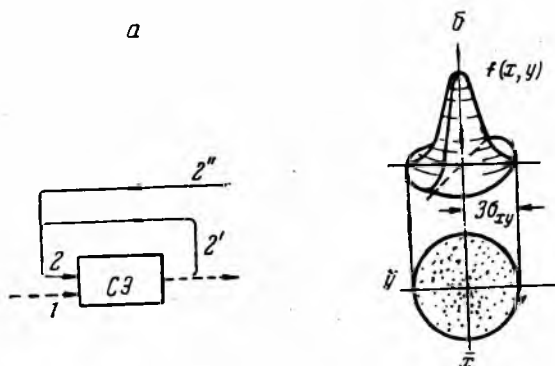


Рис. 1. Связи СЭ (а) и результат деятельности оператора D_1 (б).

Процесс функционирования и даже формирования, образования сенсорных элементов, а также процесс управления последними — статистические. Наиболее ярко эта черта выражена на низших функциональных уровнях зрения, которым присущ целый ряд статистических свойств: массовость явления (очень большое число СЭ), случайный характер изменения входной информации и параметров СЭ, такой же характер связей между сенсорными элементами в пределах одного и между разными уровнями и пр.

Детерминированное центральное управление работой, например, каждого рецептора также недопустимо в силу ограниченной пропускной способности каналов обратной (эфферентной) связи. Модель периферических звеньев и их функций должна быть статистической [8].

Статистические формы перцептивной деятельности хорошо интерпретируются методом статистического моделирования, которое является принципиальной основой статистического управления. Оно сводится к тому, что по заданному закону распределения и его параметрам, т. е. с помощью сравнительно малого количества управляющей информации, получают конкретные параметры управляющих воздействий для весьма большого

числа СЭ. Таким образом, центральное и локальное управление рецепторным слоем и рецептивными полями — это генерирование по статистическому принципу пространственно-временных множеств перцептивных действий (ПД), центральным и локальным образом определяющих вероятности сенсорных актов для упорядоченных, смежных в пространстве и во времени множеств СЭ.

Основным процессом статистического управления является однократная реализация распределения f , $(p_1, p_2, \dots, p_n, t)$ опросов (запретов) на множестве сенсорных элементов, обладающих метрическими параметрами — адресными p_1, p_2, \dots, p_n и временным t . При этом подключается n сенсорных элементов, каждый из которых может быть опрошен во время актуализации n_t раз.

Модификация управляющих воздействий выражается в изменении параметров распределения, вызывающих перераспределение возбуждения и торможения на множестве СЭ. Под управляющим воздействием, которое назовем уставкой u , понимается вся совокупность параметров, определяющих каждое ПД.

В принципе множества отдельных ПД и их комбинации могут формироваться на основе безусловно-вероятностных и условно-вероятностных зависимостей. В первом случае используется функция распределения 1-го порядка $f_1(p_1, p_2, \dots, t)$ — плотности вероятности несвязанных ПД в области, задаваемой пространственными и временными параметрами p_1, p_2, \dots, t , во втором — функции распределений 2, 3 и выше порядков, описывающие плотности вероятности для пар, троек и выше ПД в задаваемой области. Например, функция распределения 2-го порядка имеет вид $f_2(p_1, p_2, \dots, t'; p_1, p_2, \dots, t'')$. Модификация параметров уставки u , т. е. параметров распределения, приводит к изменению области актуализации. Манипуляция множеством уставок создает множество областей актуализации.

Распределение интенсивности актуализации в заданной области континуума сенсорных элементов определяет вероятность срабатывания каждого СЭ при наличии на нем входного сигнала. Детали этого процесса — изменение порогов СЭ и их весовых коэффициентов, алгебраическое сложение уровней входного сигнала и сигнала обратной связи — пока несущественны. Важен конечный эффект: градуальное управляющее воздействие, распределенное в пространстве и времени, обуславливает плотность и частоту срабатываний дискретного множества СЭ. При этом каждый сенсорный акт рассматривается и как следствие отдельного ПД.

Рассмотрим статистические аспекты деятельности трех иерархических уровней сенсорных элементов: рецепторов и их множеств — рецептивных полей сетчатки (РПС); РПС и их множеств, соответствующих фрагментам сетчатки (ФС) и рецептивным полям коры (РПК); РПК (ФС) и их множеств,

соответствующих оперативному полю наблюдения на сетчатке и в зрительной коре. В сообщениях I, II данной работы описываются статистические формы перцептивной деятельности, реализующие безусловно-вероятностные законы.

Уровень I (множества рецепторов — рецептивные поля сетчатки). Основанием для управления на этом уровне является формирование статистических множеств элементарных ПД, распределенных в пространстве и времени. Это множество назовем групповым ПД. Статистический механизм, формирующий одно групповое ПД, станем именовать оператором D_1 , где индекс «1» обозначает номер уровня. Оператор D_1 , по-видимому, реализует нормальный закон распределения $f(x, y, t)$, где x, y, t — пространственные и временные координаты отдельных сенсорных актов (элементарных ПД).

В соответствии с этим законом по заданной старшим уровнем уставке $u_1 = \langle \bar{x}, \bar{y}, \bar{p}, \bar{t}, \bar{p}_t, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_t \rangle$ актуализируется область со следующими параметрами: \bar{x}, \bar{y} — координатами центра группирования; \bar{p} — средней плотностью элементарных ПД; \bar{t} — средним значением временной координаты; \bar{p}_t — средней частотой этих ПД, соответствующей частоте импульсаций (опроса) рецепторов; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_t$ — среднеквадратичными величинами рассеивания ПД по координатам x, y, t .

Если рассматривать процесс при $t = \text{const}$, то физическая картина представится следующим образом. В точку \bar{x}, \bar{y} континуума рецепторов по обратной связи приходит управляющее воздействие. Влияние воздействия распространяется по закону

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_{x,y}^2} \exp \left[-\frac{(x-\bar{x})^2 + (y-\bar{y})^2}{2\sigma_{x,y}^2} \right] \quad (1)$$

на все рецепторы, удаленные от центра образуемой рецепторной группы (РГ) не более чем на $3\sigma_x$ вдоль оси x и на $3\sigma_y$ вдоль оси y (в выражении (1) $\sigma_{x,y} = \sigma_x = \sigma_y$).

Уменьшение степени актуализации рецепторов определяется расстоянием последних от центра и характеризуется кривой распределения $f(x, y)$. На рис. 1, б показан вид распределения $f(x, y)$ и соответствующая ему реализация в виде РГ. Очевидно, что при независимых x, y статистический генератор формирует круглые РГ. Первый уровень ЗС, где формируются рецепторные группы, обеспечивается работой множества операторов D_1 . Вообще работа операторов D_1 протекает во времени, поэтому в модели должно рассматриваться трехмерное распределение $f(x, y, t)$. Распределение $f(t)$ элементарных ПД во времени тоже, по-видимому, нормальное. Это предположение наиболее естественно.

Рассмотрим форму пространственно-временной области актуализации. Анализ принципа образования этой области позволяет предполагать, что форма тела, образованного распределением $f(x, y, t)$, будет волчкообразной, с осью t (рис. 2). Такая форма

соответствует изменению $\sigma_{x,y}$ в зависимости от t по закону $f(t)$. Можно допустить, что подобный пространственно-временной сгусток сенсорных актов образуется в результате нарастания и спада некоторого импульса актуализации, длительность которого соответствует интервалу $\Delta T = 6\tau_t$.

Опишем характеристики оператора D_1 и управление множеством таких операторов.

Из перечисленных выше параметров уставки u_1 одиночного оператора D_1 не все кодированы значениями каких-то величин. Некоторые реализуются конструктивно. Например, в живой сетчатке, пользующейся

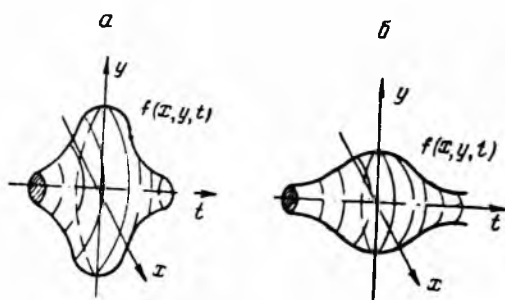


Рис. 2. Форма пространственно-временной области актуализации рецепторов.

не одним оператором \bar{D}_1 , а их множеством, адресные параметры x, y не поступают на входы соответствующих разветвителей и не декодируются. Управляющее воздействие направляется и попадает на определенное множество точек $\{ \langle x, y \rangle \}$. То же можно сказать о временной координате t . Физический смысл конструктивной реали-

параметров σ, ρ в общем зависит от эволюции СЭ.

Параметры $\sigma_{x,y}, \sigma_t$ в определенных пределах зависят от интенсивности актуализации. Кроме того, $\sigma_{x,y}$ определяется степенью распространения возбуждения от точки приложения, а σ_t — инерционностью рецепторов. Параметры $\bar{\rho}, \bar{\rho}_t$ в нашем представлении связываются со средней чувствительностью множества рецепторов к актуализирующему воздействию.

Локальное и центральное управление множеством (слоем) операторов D_1 выражается в изменении значений их входных параметров. Рассмотрим формальную сущность и логический смысл этих изменений.

1. Параметры \bar{x}, \bar{y} при изменении дают множество рецепторных групп. Множество $\{ \langle \bar{x}, \bar{y} \rangle \}$ порождается согласно тем же законам, что и множество $\{ \langle x, y \rangle \}$. Смысл «размножения» РГ заключается в обеспечении захвата информации с большой площади.

2. Изменение значений параметров $\sigma_{x,y}, \bar{\rho}$ (при $\bar{x}, \bar{y} = \text{const}$) имеет большое практическое значение — с его помощью происходит смена режимов работы РПС. На рис. 3, б показано одновременное увеличение σ и $\bar{\rho}$. Известна взаимозависимость интенсивности и площади стимула при заданном уровне ответа [4]:

$I S^k = \text{const}$, где I — освещенность, S — площадь светового стимула, k — коэффициент суммации внутри S . Рассматривая все возможные сочетания одновременного изменения ΔS площади $S = 9\pi\sigma_{x,y}^2$ РПС, соответствующей площади стимула и плотности \bar{p} ; ($\bar{p} = \bar{p}_0 + \Delta\bar{p}$), в результате которых получается приращение

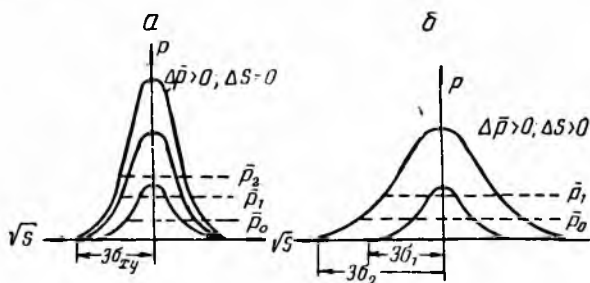


Рис. 3. Изменение плотности и площади рецепторной группы.

$\Delta n = \bar{p}_0 \Delta S + \Delta\bar{p} S$ числа рецепторов в РПС, можно добиться четкой интерпретации всех известных в физиологии режимов работы РПС (см. таблицу).

Режим	Параметр			
	$\Delta\bar{p}$	Δn	$\Delta n / \Delta S$	k
Экзальтация	$\Delta\bar{p} > 0$	$\Delta n > 0$	$0 < \frac{\Delta n}{\Delta S} > \bar{p}_0$	$0 < k > 1$
Полная суммация	$\Delta\bar{p} = 0$	$\Delta n > 0$	$0 < \frac{\Delta n}{\Delta S} = \bar{p}_0$	$0 < k = 0$
Неполная суммация	$\Delta\bar{p} < 0$	$\Delta n > 0$	$0 < \frac{\Delta n}{\Delta S} < \bar{p}_0$	$0 < k < 1$
Отсутствие суммации	$\Delta\bar{p} < 0$	$\Delta n = 0$	$0 = \frac{\Delta n}{\Delta S}$	$0 = k$
Торможение	$\Delta\bar{p} < 0$	$\Delta n < 0$	$0 > \frac{\Delta n}{\Delta S}$	$0 = k$

Как следует из данных таблицы, характер изменения плотности $\frac{\Delta n}{\Delta S}$ относительно значений \bar{p}_0 и 0 соответствует характеру изменения k относительно значений 1 и 0. Это не случайность, а закономерность. Наиболее важными представляются два режима изменения $\sigma_{x,y}$ и \bar{p} : 1) $n = \text{const}$; $\bar{p} = \text{var}$; 2) $\bar{p} = \text{const}$; $n = \text{var}$. Здесь n обозначает число рецепторов в РПС. Первый режим используется в ЗС и ее моделях для изменения шкалы квантования метрического пространства при неизменной точности и рецепции, второй — в процессе перестройки чувствительности и разрешающей способности системы в условиях изменяющихся требований к надежности рецепции и при переменном отношении сигнал/шум.

БИБЛИОТЕКА

Х И Р Э

613398

В работе [6] приведены формальные соотношения, имеющие место при перестройке РПС с обменом чувствительности μ_s на разрешающую способность μ_p . Они свидетельствуют о том, что $\mu_s \mu_p = \text{const}$, при изменении n , если при этом остаются постоянными яркостный сигнал B и допустимая вероятность $\rho_{\text{ош}}$ ошибок измерения этого сигнала. В случае возрастания B при $\rho_{\text{ош}} = \text{const}$ увеличивается μ_p , и наоборот. Изменение $\rho_{\text{ош}}$ при $B = \text{const}$ соответствует изменению μ_s . В дополнение к существующим [4, 10] представлениям о функциональной перестройке РПС предлагаемая нами модель позволяет получить конкретные математическую и конструктивную формы организации действий сенсорной системы и управления ею.

3. Параметры t , σ_t , \bar{p}_t аналогичны параметрам x , y , $\sigma_{x,y}$ и \bar{p} . Поэтому математическую сущность и прагматический смысл их изменений можно понять из изложенного.

Размножение t во времени необходимо для выяснения временных изменений яркостных параметров. Вид распределения моментов t по оси времени зависит главным образом от интенсивности стимула и уровня актуализирующего воздействия. В общем случае частота \bar{p}_t изменяется.

Разрешающая способность μ_t во времени зависит от σ_t , \bar{p}_t и требований к сетчатке. Цепь причинно-следственных отношений между различными факторами при изменении параметров σ_t и \bar{p}_t аналогична цепи отношений между соответствующими пространственными параметрами. По индукции можно предполагать возможность работы сенсорного звена во всех пяти режимах также при временном накоплении. Как и для пространственных параметров, соотношение $\mu_t \mu_s = \text{const}$ справедливо при $\rho_{\text{ош}} = \text{const}$ и $B = \text{const}$.

В целом функции оператора D_1 сводятся к управлению не деятельностью рецепции и к поддержанию оптимальности измерений. Общим законом обмена между сенсорной и перцептивной (в пространстве и времени) чувствительностью является $\mu_s \mu_p \mu_t = \text{const}$ при $B = \text{const}$ и $\rho_{\text{ош}} = \text{const}$. Это означает, что в рамках одинаковых требований к рецепции и при неизменном уровне сигнала объем пространственно-временного множества ПД, образующих одно групповое, постоянный.

Объем волчка (рис. 2) остается постоянным при любой его деформации, а изменяется только при перемене соотношения сигнал/шум или $\rho_{\text{ош}}$. Эти факторы являются определяющими в совокупности взаимодействий в работающей рецепторной системе. Возрастание B при $\rho_{\text{ош}} = \text{const}$ сопровождается уменьшением объема волчка. Резерв разрешения $\mu_p \mu_t$ при этом увеличивается. Изменение допуска $\rho_{\text{ош}}$ при $B = \text{const}$ вызывает соответственное изменение объема области актуализации (накопления). Так, при

увеличении $p_{\text{ош}}$ объем волчка уменьшается, что соответствует повышению точности измерения метрических параметров вследствие ухудшения точности измерения яркостных параметров.

Предлагаемая в данной работе модель представляет интерес для перспективных систем машинного восприятия сложных реальных картин с большим информационным содержанием. В этой области техники внедряются микроэлементные фоточувствительные структуры мозаичного типа, которые намного совершеннее разработанных в прошлом десятилетии фотосетчаток с несколькими десятками довольно крупных фотодетекторов [11]. Выращиваемые или напыляемые на кремниевой основе мозаичные матрицы, а также элементная база, использующая свойства переходов между различными молекулярными слоями, уже в настоящее время обладают следующими характеристиками: размер рецептора 100×125 мк, плотность рецепторов — $4 \cdot 10^4$ 1/дюйм².

По-видимому, скоро будет применяться статистический способ изготовления сетчатки и ее коммутация. Уже сейчас практически решаются задачи об адресном опросе сетчатки с выделением нескольких фотодетекторов для интегрирования их показаний, об управлении чувствительностью сенсорного звена и расширении его динамического диапазона [11]. Бионический способ решения этих задач описан в данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гранит Р. Электрофизиологическое исследование рецепции. М., ИЛ, 1957. 339 с.
2. Демирчоглян Г. Г. К вопросу о роли обратных связей в деятельности анализаторов. — «Биофизика», 1961, т. 6, № 4, с. 499 — 502.
3. Островский М. Л. К вопросу о нисходящих влияниях на сетчатку глаза лягушки. — «Биофизика», 1962, т. 7, № 1, с. 55 — 63.
4. Глезер В. Д. Механизмы опознания зрительных образов. М., «Наука», 1966. 204 с.
5. Hubel D. H., Wiesel T. N. Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. — «J. Physiol.», 1962, vol. 160, p. 106.
6. Клевцов В. П. Принципы активного измерения в сенсорных звеньях зрительного анализатора и технических систем анализа изображений. — В сб.: Вопросы военно-инженерной психологии [ХВКИУ]. Вып. III. Харьков, 1970, с. 55 — 66.
7. Мучник И. Б. Алгоритмы формирования локальных признаков для опознания зрительных образов. — «Автоматика и телемеханика», 1966, № 10, с. 88 — 99.
8. Мак-Кей Д. Моделирование нервной деятельности. — В кн.: Моделирование в биологии. М., ИЛ, 1963, с. 261 — 273.
9. Глезер В. Д., Цуккерман И. И. Разрешающая способность глаза с точки зрения теории информации. — «Биофизика», 1959, т. 4, № 1, с. 55 — 63.
10. Anders R. A. Developmental solid-state imaging system. — «IEEE Trans.», 1968, vol. ED-15, N 4, p. 191 — 196.
11. Dyck R. H., Weckler G. P. Integrated arrays of silicon photodetector for image sensing. — «IEEE Trans.», 1968, vol. ED-15, N 4, p. 196 — 202.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ФОРМ ПЕРЦЕПТИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ. СООБЩЕНИЕ II

В работе [1] изложены статистические принципы формирования множеств элементарных перцептивных действий (ПД). Показано, что формой выражения и результатом статистической перцепции являются образование и актуализация перцептивных полей сетчатки как множеств отдельных рецепторов, каждое из которых образует некоторую единую пространственно-временную область. В пределах этой области интегрируется значение модального (яркостного) параметра. Основная задача, решаемая на этом уровне зрительной системы (ЗС), — накопление измерений в целях повышения их надежности (точности).

Накопление осуществляется посредством памяти, которая на этом уровне проявляется в форме инерционности сенсорных элементов (СЭ) и в наличии задержек. Память первого уровня, которую можно назвать первой буферной (иконической), конструктивно не обособлена и совмещена с основными элементами восприятия, а поэтому обладает теми же статистическими свойствами. Она характеризуется объемом и длительностью фиксации, которые, вообще, изменяются в зависимости от условий среды и решаемой задачи. Вышележащие уровни ЗС получают информацию только через память первого уровня.

Важно определить законы и механизмы, управляющие снятием информации с первого уровня — выходов РПС, морфологическим эквивалентом которых являются ганглионы. Функция формирования считывающих ПД решается на втором уровне, который работает с множествами РПС подобно тому, как первый уровень манипулирует с множествами рецепторов. При этом актуализация множества РПС эквивалентна актуализации множества множеств рецепторов, образующих компактный фрагмент сетчатки (ФС).

Основная цель функционирования второго уровня — селекция локальных признаков (элементов формы) входной пространственно-временной картины. Эта функция реализуется набором рецептивных полей коры (РПК), соответствующих актуализируемым фрагментам сетчатки и определенным участкам буферной (иконической) памяти. Вообще РПК формируются и коммутруются из нескольких ФС. В данной работе анализируется пока только формирование единичного ФС. Рассмотрим особенности управления восприятием на втором уровне.

Уровень II (множества рецептивных полей сетчатки — рецептивные поля коры). Для сбора сенсорного сигнала на некотором участке рецепторной плоскости групповые ПД распределяются в указанной области и в определенном интервале времени.

Функции этого распределения выполняет перцептивный механизм D_2 . Принципы работы операторов D_1 и D_2 аналогичны.

На рис. 1 схематически показан принцип формирования ФС как множества рецепторных групп (РГ), образованного одним оператором D_2 по статистическому методу. Множеству операторов D_2 соответствует совокупность механизмов, актуализирующих

корковые рецептивные поля, т. е. управляющих последними. Как известно, корковые РП выделяют элементы формы. Для этого создаются и при необходимости включаются в работу определенные перцептивные конструкции из множеств РПС, причем форма таких конструкций должна совпадать с формой выделяемых элементов — пятен, закруглений, краев и т. п. Наряду с круглыми ФС, для выделения указанных элементов используются и эллипсоидные ФС. Это необходимо для выделения элементов, обладающих протяженностью (полоски, удлиненные пятна и т. п.).

Чтобы реализовать указанные функции, оператор D_2 должен генерировать зависимые переменные \bar{x} и \bar{y} . Для этого следует отдельно управлять параметрами $\sigma_{\bar{x}}$, $\sigma_{\bar{y}}$, определяющими среднеквадратичное рассеивание рецепторных групп по осям координат. Однако при этом необходимо, чтобы $\sigma_{\bar{y}} = k\sigma_{\bar{x}}$, где $k \neq 1$ — коэффициент сжатости горизонтального или вертикального эллипса. Кроме того, оператор должен «разворачивать» свои координатные оси на произвольно заданный угол φ .

В целях выполнения этих требований с помощью единственного универсального оператора D_2 на его вход следует подавать следующие параметры уставки: \bar{x} , \bar{y} — координаты центра ФС; k , φ — сжатие и ориентация эллипсоидного ФС; $\sigma_{\bar{x}}$, $\sigma_{\bar{y}}$ — среднеквадратичное рассеивание рецепторных групп (величина ФС); \bar{p} — средняя плотность РГ в ФС; $\langle \bar{t}, \sigma_t, \bar{p}_t \rangle$ — временные параметры актуализации ФС.

При наличии множества операторов D_2 , различающихся по каким-то параметрам, например по \bar{x} , \bar{y} , значения последних используются только в качестве адресных и предназначены для включения заданных механизмов. В этом случае на входы операторов D_2 эти параметры не подаются.

Определим последствия изменений величины отдельных входных параметров оператора D_2 .

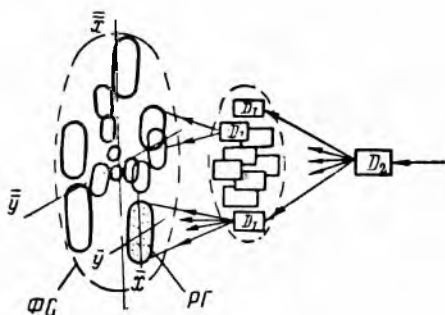


Рис. 1. Статистический принцип актуализации сенсорных элементов на уровнях I, II:

ФС — фрагмент сетчатки; РГ — рецепторная группа; D_1 , D_2 — операторы.

1. Параметры \bar{x} , \bar{y} определяют положение выбранной для анализа области пространства наблюдения независимо от того, где зафиксирована наблюдаемая картина — на сетчатке или в иконической памяти. В результате изменения \bar{x} , \bar{y} к входу оперативных отделов ЗС подключаются новые фрагменты картины. Вероятно, существуют два способа изменения \bar{x} , \bar{y} — двигательный и коммутационный. Задача первого — управлять движениями глаз. При этом \bar{x} , \bar{y} подаются на глазодвигательные механизмы. Второй способ основан на подключении отдельных участков иконической памяти. Здесь анализатор работает уже не со средой, а с ее отражением в буферной памяти. Двигательный способ связан с следовательным режимом восприятия и большим расходом времени, коммутационному свойственна большая скорость, но, видимо, меньшая точность.

Характерно, что изменение \bar{x} , \bar{y} , или генерирование множества $\{ \langle \bar{x}, \bar{y} \rangle \}$ может происходить по статистическим принципам и детерминированно. В первом случае, вероятно, работает статистический оператор D_3 , аналогичный D_2 , во втором — оперативные механизмы восприятия.

2. Параметры $\sigma_{\bar{x}}$, $\sigma_{\bar{y}}$, \bar{p} определяют размер и плотность актуализируемого ФС. Изменение их соответствует изменению степени концентрации внимания на втором уровне регуляции.

Значение изменений $\sigma_{\bar{x}}$, $\sigma_{\bar{y}}$ очевидно. Параметр \bar{p} изменяется одновременно с размерами $\sigma_{\bar{x}, \bar{y}}$ актуализируемых РПС. При этом с возрастанием \bar{p} размеры последних уменьшаются таким образом, что коэффициент их взаимного перекрытия остается постоянным хотя число подключаемых РПС увеличивается.

Изменение $\sigma_{\bar{x}, \bar{y}}$ могут вызывать либо внешний фактор — уровень освещенности, либо внутренний — активность индивидуума, соответствующая известному понятию «напрягать зрение в темноте». В головном мозгу обезьян открыты центры, управляющие параметрами $\sigma_{\bar{x}, \bar{y}}$ и даже k и φ [2]. Изменение по приказу старших уровней обусловлено требованиями решаемой задачи. Так, при слежении глазами за объектом, движущимся с большой угловой скоростью, требуется расширение поля зрения, т. е. ретинальной «зоны захвата» [3]. Это выражается в увеличении $\sigma_{\bar{x}, \bar{y}}$ и $\sigma_{x, y}$, что соответствует снижению остроты зрения. Здесь тоже действует закон сохранения чувствительности.

3. Параметры k и φ одиночного ФС изменяются в процессе управления сжатием и ориентацией последнего. Подобно $\sigma_{\bar{x}, \bar{y}}$, параметры k и φ генерируются по случайному и детерминированному законам. Главным образом это относится к параметру φ . Статистический закон образования множества $\{\varphi\}$ используется

при полном отсутствии данных об ориентации локальных элементов, т. е. при необходимости выделения элементов с любой ориентацией и равновероятности любой ориентации. В этом случае значения φ должны быть равномерно распределены по интервалу $[0 \div \pi]$. При наличии данных об ориентации появляется возможность селективного включения тех корковых рецептивных полей, ориентация которых указывается.

По значению параметра φ выбирается одна (из множества готовых) определенная перцептивная конструкция, предназначенная для выделения элемента с соответствующей ориентацией. При подаче параметров k , σ_x на один из операторов D_2 с ориентацией $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_i$ или φ_n актуализируются соответствующие множества операторов D_1 . При этом «изнутри» подвозбуждаются определенные участки иконической памяти или рецепторной плоскости. Манипулятивные способности зрения применительно к параметрам k , φ служат для самонастройки системы в процессе селекции.

4. Параметры \bar{t} , σ_t управляют временными характеристиками считывания информации с вырезаемого и представляемого в буферной памяти ФС. Параметр \bar{t} указывает положение на временной оси центра группирования распределений f^0, t^1, \dots, f^i , каждое из которых характеризует срабатывание (актуализацию) рецепторов соответствующей РГ во времени. Значения σ_t и \bar{p}_t показывают рассеивание и среднюю частоту групповых ПД на временном интервале.

Анализ возможных следствий изменения \bar{t} и σ_t необходим в том случае, если временные характеристики наблюдения за быстроменяющейся обстановкой имеют большое значение. Можно утверждать, что расстановка смежных моментов $\bar{t}_{i-1}, \bar{t}_i, \bar{t}_{i+1}$ на интервалах $\Delta \bar{t}$, меньших $6\sigma_t$, нецелесообразна, поскольку все групповые ПД не будут реализованы. Интервал, превышающий $6\sigma_t$, не является благоприятным при необходимости точного измерения временных характеристик событий. В общем случае интервал $\Delta \bar{t}$ локальным образом определяется частотой «мелькания» стимула (адаптация) и центральным образом — требованиями решаемой задачи.

Колебания уровня актуализации соответствующих сенсорных звеньев зрения наблюдались в процессе исследований саккадического подавления активности зрения при скачках глаз [4]. Примерная схема чередования фаз актуализации (возбуждения и подавления) представлена на рис. 2.

От параметра σ_t зависит точность определения времени каких-либо изменений внешней среды. Особый интерес представляет возможность активного, сознательного управления параметром σ_t . Существуют данные о том, что самоорганизация внимания,

самовнушение «повышенной скорости восприятия» существенно уменьшают время восприятия, и наоборот [5].

Таковы в общих чертах механизмы перцептивной деятельности ЗС на ее втором функциональном уровне.

Однако использование даже простейших форм статистического управления (безусловно-вероятностных) этим не ограничивается. Кроме измерительных и локально-селективных функций, реализуемых на первом и втором уровнях, ЗС должна иметь глобально-селективные функции, т. е. обладать способностью

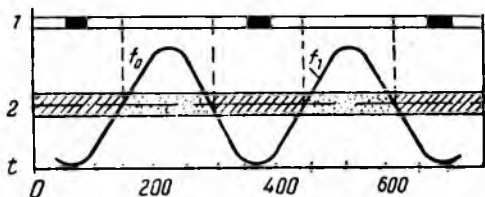


Рис. 2. Характер изменения уровня актуализации сенсорных звеньев зрения во времени:

1 — скачки глаз; 2 — фазы актуализации.

концентрировать внимание на определенной части всего пространственно-временного массива входных данных. Информация с огромного поля зрения и всего имеющегося арсенала сенсорных элементов (рецепторов, РПС, РПК) в подавляющем большинстве сенсорных актов не снимается параллельно. Как правило, характер входных картин и познавательная задача не требует переработки большого количества избыточной информации.

ЗС ограничивает в целом поток входной информации, подключая к входу соответствующих механизмов лишь наиболее информативную часть пространственно-временного поля наблюдения, отключая неинформативную часть. Среда и познавательные задачи изменяются во времени, а в соответствии с этим меняются пространственные и временные характеристики подключаемого поля наблюдения, которое в силу указанных причин назовем оперативным полем наблюдения (ОПН). Изменяются также геометрические — положение, размер, форма, ориентация — и временные характеристики ОПН — текущее значение времени наблюдения и общий интервал наблюдения. Эти процессы реализуются над всем потоком сенсорной информации в целом. Поэтому указанные функции определим как глобально-селективные, в отличие от локально-селективных, реализующихся в масштабе мелких, локальных элементов входных картин и соответствующих им сенсорных элементов (ФС, РПК).

Процесс актуализации (и формирования) ОПН, по крайней мере на начальном этапе очередной познавательной задачи или при изменении среды, осуществляется по статистическим принципам, подобно тому как актуализируются рецепторные группы или ФС. Механизмом реализации этого принципа должен быть оператор D_3 , генерирующий множество уставок, которые, поступая на входы сенсорных и перцептивных элементов, вызывают ограничение поля наблюдения.

Нет оснований ограничивать до единственного уровень и слой памяти, являющийся объектом управления со стороны оператора D_3 . Можно предложить две схемы взаимодействий: $\{D_2\} \leftarrow D_3$ и $\{D_1\} \leftarrow \{D_2\} \leftarrow D_3$. В первом случае снимается информация с буфера Π , а во втором глобальная селекция осуществляется не только на втором слое, но и на уровне буфера (иконической памяти).

Уровень III (множества РПК или ФС — оперативные поля наблюдения). Задача оператора D_3 — актуализация множества РПК, несущих новую или нужную информацию и отличающихся друг от друга параметрами \bar{x} , \bar{y} , $\bar{\varphi}$. По выработанным параметрам \bar{x} , \bar{y} , $\bar{\varphi}$ уставок можно сформировать также соответствующее множество ФС и снять информацию с определенной области сетчатки.

По-видимому, должно существовать два самостоятельных механизма, один из которых — $D_3(x, y)$ — формирует множество $\{\{\bar{x}, \bar{y}\}\}$, а другой — $D_3(\varphi)$ — множество $\{\varphi\}$. Первый дает в результате компактное в пространстве $\langle x, y \rangle$ множество элементов памяти второго буфера или иконической памяти. Второй подключает множество РПК, компактное лишь в измерении φ , и может подключать удаленные друг от друга ФС с близким значением φ . Оба оператора должны иметь «переменную степень случайности», т. е. обеспечивать переход от группового, статистического управления к детерминированному режиму работы.

Важная способность человека формировать ОПН с помощью оператора D_3 еще мало изучена. Например, такая способность проявляется при обучении быстрочтению, в результате которого человек произвольно формирует эллипсоидное ОПН с большим k и горизонтальной ориентацией ($\bar{\varphi} = D$). Такой тип концентрации внимания позволяет переходить от горизонтального (точнее, телевизионного) типа чтения к вертикальному, без пробегания строк глазами.

Очень динамичными являются функции «генератора ориентаций» — блока $D_3(\varphi)$. Он работает в режимах ненаправленного поиска и селекции элементов с определенным (в каких-то пределах) значением $\bar{\varphi}$. При ненаправленном поиске элементов с равновероятной ориентацией распределение $f(\varphi)$ должно быть практически равномерным во всем интервале $[0 \div \pi]$. Однако некоторые данные [6] указывают на то, что в действительности у человека отсутствует идеально равномерное распределение, показанное на рис. 3, а, в, пунктиром (прямая 1). Плотность распределения детекторов ориентаций (рис. 3, а, б) и чувствительность к ориентации имеют максимумы в районе $\bar{\varphi} = 0$, $\bar{\varphi} = \frac{\pi}{2}$ (кривая 2 на рис. 3, а). Если в результате анализа среды удастся определить действительное распределение ориентаций на картине, то в

последующем можно переходить к селекции в найденном интервале. Распределение может сжиматься (кривые 2, 3 на рис. 3, в) вплоть до линейчатого.

При совместном, одновременном управлении обоими операторами $D_3(x, y)$ и $D_3(\varphi)$ возможны следующие режимы: 1) оба оператора работают по статистическим законам, генерируя случайное множество значений соответствующих параметров; 2) один из операторов работает в статистическом режиме, а второй — в детерминированном; 3) оба блока используются для выдачи одиночных детерминированных входных величин и при этом актуализируется единственный ФС.

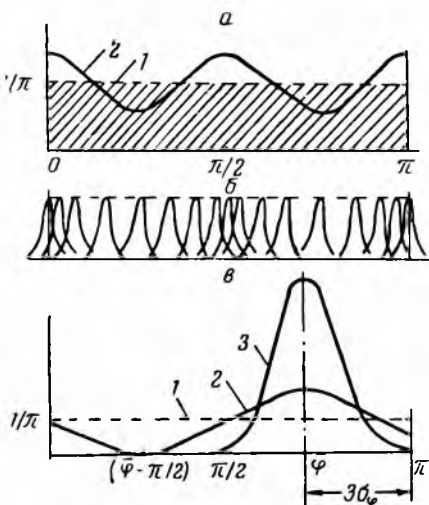


Рис. 3. Распределение детекторов ориентации:

а — кривая плотности распределения детекторов; б — соответствующее ей распределение; в — возможный вид кривых $f(\varphi)$.

обуславливается уподоблением. Кроме проверки адекватности образа, такой режим может выполнять воспроизведение ранее воспринятого образа, т. е. он важен как процесс визуализации.

В целом операторы D_1, D_2, D_3 образуют иерархическую систему, в которой младшие уровни подчинены старшим. Эти операторы представляют собой совокупность стандартных, адаптивных подпрограмм, управляемых уставками u_1, u_2, u_3 соответственно. Уставки подаются непосредственно от оператора решающего задачу, или со старшего уровня. Перцептивные уставки передаются по цепям обратной связи. Анализ логики функционирования сенсорных звеньев позволяет предполагать наличие двух видов обратных связей: местных (локальных), обратных связей от сенсорных звеньев своего уровня и центральных — со старших уровней, в том числе смысловых, ведущих к решению задач.

Схема управления сенсорными звеньями представляет собой три иерархических многослойных функциональных уровня. Количество слоев определяется необходимым временем запоминания и соответствует количеству временных задержек проходящей информации. На первый уровень, где путем формирования пространственно-временных рецепторных групп сетчатки интегрируются данные с отдельных рецепторов, управляющая информация поступает со второго уровня и из центра. По центральным обратным связям идут нормативные требования, определяющие надежность измерения. Второй уровень состоит из операторов D_2 , которые реализуются в виде механизмов управления корковыми рецептивными полями. Последние являются также фрагментами иконической памяти. Выходы операторов D_2 воздействуют на входы операторов D_1 . На входы поступает управляющая информация от D_3 и высшего (центрального) уровня. На этих уровнях память распределена, т. е. функции ее воплощаются в каждом элементе структуры, реализующем и другие функции. Важно, что память уже первого уровня служит местом реализации сложной перцептивной деятельности (фильтрации, селекции, адаптивности).

В управлении множеством сенсорных звеньев, в частности сетчаткой, можно выделить три режима: циркулярный, избирательный и циркулярно-избирательный. В первом все звенья получают одну и ту же уставку. Во втором каждое звено получает свою индивидуальную уставку. Третий режим — промежуточный. Динамика использования отдельных режимов на различных этапах решения познавательных задач требует тщательно изучения.

Изложенные принципы статистической деятельности ЗС не только объясняют функциональную структуру восприятия в высокоразвитых живых анализаторов, но и создают основу для физического моделирования и построения биоподобных анализаторов, универсальных по характеру входных картин и классу решаемых познавательных задач.

Условно-вероятностные формы статистической перцептивной деятельности зрения — предмет дальнейшего рассмотрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клевцов В. П. Моделирование статистических форм перцептивной деятельности зрительной системы. Сообщение I (см. ст. в настоящем сборнике).
2. Pribram K. The Neurophysiology of Remembering.—*Scient. Amer.*, 1969, January, p. 73—88.
3. Methling D., Wernicke J. Sehscharfe des Auges bei horizontalen Folgebewegungen.—*Vision Res.*, 1968, vol. 8, N 5, p. 493.
4. Назаров А. И. и др. Эфферентные регуляции в зрительном восприятии.—*Тр. ВНИИТЭ. Эргономика*, 1972, вып. 3, с. 110—130.
5. Ромен А. С. Самовнушение и его влияние на организм человека. Алма-Ата, «Казахстан», 1970. 199 с.
6. Rouma H., Andriessen J. Perceived orientation of isolated line segments. — *Vision Res.*, 1968, vol. 8, N 5, p. 493.

СВОЙСТВА ОТОБРАЖЕНИЯ И БИОНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ. СООБЩЕНИЕ I

При бионическом исследовании систем отображения внешнего мира, существующих в живой природе, необходимо не только уметь выделять бесспорные достоинства этих систем, но и относиться к ним критически при разработке рекомендаций для построения технических средств отображения. Даже то, что несомненно полезно для сохранения организма, может быть источником искажения отображения свойств и взаимосвязей объектов среды в технических системах.

Проиллюстрировать тенденции к неадекватному отражению отношений объектов среды можно на примере ассоциативных особенностей механизмов памяти мозга. Посредством этих механизмов в отраженном объединяются в целый образ и такие элементы внешней среды, которые объективно не находятся в каких-либо существенных отношениях. Слишком яркие и богатые ассоциации могут серьезно мешать мыслительной деятельности, являясь в то же время основой феноменальной памяти. «Не может быть в представлении непосредственного взаимодействия двух элементов, если в действительности имеется лишь опосредствованное взаимодействие. В этом случае представление считается ложным и нуждается в исправлении» [3, с. 463].

Выявить такие тенденции мозга, определяющие специфику субъективного, важно не только для бионических исследований, но и в большей мере для всей теории познания, так как истинность научных теорий в значительной степени зависит от исключения из них субъективного, неадекватного.

Основные понятия теории отражения

Диалектический материализм отрицает существование непреходимой границы между неорганической и органической материей, между материальным и идеальным, между отображенным и отображаемым. «...Логично предположить,— пишет В. И. Ленин,— что вся материя обладает свойством по существу родственным с ощущением, свойством отражения» [2, т. 14, с. 81]. Возникновение идеального было бы невозможным и бессмысленным шагом эволюции, если бы не существовало перехода от материального к идеальному и обратно посредством реальных процессов. *Процесс отражения* определим как воздействие материальных объектов друг на друга, сопровождающееся изменением их состояний и появлением некоторых общих сходных признаков [4, с. 27]. Под *отраженным* будем понимать результат процесса отражения. В зависимости от сложности структуры и уровня

организации отображающие объекты могут обладать различными свойствами отражения: элементарного и неэлементарного отражения, биологического отражения в форме раздражимости, психики, сознания [4, с. 26].

Для понимания сущности элементарных и высших форм отражения важен вторичный характер отраженного и независимость отражаемого от отраженного. Эту независимость В. И. Ленин подчеркивает в сформулированном им основном законе отражения: «Отображение не может существовать без отображаемого, но отображаемое существует независимо от отображающего» [2, с. 57].

В ленинском определении основного закона отражения выделено принципиальное условие возникновения отображения, по своему содержанию адекватного отображаемому. В общем случае отображающее может влиять на отраженное тем, что определяет его форму. Но в определенных условиях отображающее оказывает влияние и на содержание отражаемого, делая его неадекватным по содержанию. Кроме того, как отмечал Ф. Энгельс, само «взаимодействие исключает всякое абсолютно первичное и абсолютно вторичное» [1, с. 129], так как оно есть двусторонний процесс. Если же отображаемое зависит от отображающего, то в отображении будут присутствовать особенности того и другого, а вернее всего — результат их взаимодействия, и процесс адекватного отображения первой вещи во второй исключается [5, с. 65].

В процессе отражения (для высших форм отражения) объективная реальность становится субъективной реальностью (отраженным). Обратный процесс перехода субъективного (отраженного) в объективное осуществляется посредством психомоторных процессов. *Психомоторика*, или психомоторные процессы, — это объективизация всех форм психического отражения определяемыми ими движениями. Процессы перехода объективного в субъективное и обратно и составляют основу психики [6, с. 72]. Аналогичные переходы можно наблюдать в зачаточной форме на низших уровнях психического отражения у животных.

При исследовании нервной системы чрезвычайно важно установить общие и отличительные особенности высших и низших форм отражения. Прежде всего необходимо проанализировать особенности простейшей формы отражения — элементарного отражения, лежащего в основе более сложных форм отражения.

В связи с дальнейшим изложением рассмотрим некоторые результаты многоуровневых исследований реальных объектов. Введем понятия «система объектов» и «процесс», имея в виду материальные системы и процессы. Под системой будем понимать совокупность материальных объектов любой природы, находящихся в таком отношении, благодаря которому эта совокупность существует как нечто целое [7, с. 5]. Если понятие

«система» характеризует относительную устойчивость, неизменность множества объектов, то во многих случаях систему следует рассматривать как относительно изменяющийся объект, т. е. как процесс. Последний можно назвать динамической системой [8, с. 38]. При этом будем отличать процессы, происходящие в системе объектов, от просто процессов (явлений), которые отражают динамику группы взаимосвязанных объектов, не представляющих собой систему как целое.

При анализе элементарного отображения будут рассмотрены материальные объекты, не представляющие собой систему в указанном выше смысле. Поэтому необходимо ввести более общее, чем «система», понятие «материальное пространство — время», под которым будем понимать множество материальных объектов и явлений, связанных любыми материальными отношениями.

Важнейшим методологическим приемом современного научного исследования реальных объектов является многоуровневый подход. Согласно ему, по мере накопления знаний об исследуемом объекте строится сразу несколько моделей объекта, т. е. их иерархия. При этом исследуемый объект считается системой, входящей, с одной стороны, в качестве элемента в более крупную — макросистему, или надсистему, с другой, — состоящей из элементов, рассматриваемых, в свою очередь, как подсистемы, или микросистемы. Иерархия систем предполагает иерархию свойств и отношений объектов, без которой невозможно глубоко проникнуть в сущность свойств и отношений, понять их взаимозависимость и взаимные переходы.

Аналогичный многоуровневый подход может быть использован также для любых объектов материального пространства, не представляющих собой системы в указанном смысле. Но допускающих объективное расчленение на элементы, микроэлементы и т. д. Наконец, необходимо иметь в виду, что существуют такие реальные объекты, как процессы и явления, которые на выбранном уровне рассмотрения часто не удается разложить по объективным признакам на элементы и подсистемы. Следовательно, многоуровневый подход в указанной форме не всегда возможен.

Необходимым элементом отражения является *отношение* (воздействие, взаимодействие, связь и т. д.), без которого вообще отсутствует отражение.

Общие особенности отношений

Любые процессы отображения объективной реальности происходят лишь посредством материальных отношений. Отношения — единственный способ сосуществования и материальных, и идеальных объектов. Особенности отношений объектов определяют также характер их сосуществования. Можно выделить несколько видов отношений, которым соответствует столько же форм сосуществования.

Предварительная классификация отношений, свойств и форм существования имеет следующие особенности. Первое качественное деление отношений на виды внешне напоминает дихотомическое. Однако выделяемые в качестве оснований деления парные особенности отношений являются противоположными, а не противоречивыми. Это позволит по мере необходимости при более детальной классификации включать в систему отношений любые промежуточные виды реальных отношений.

Рассматриваемые особенности отношений, связанные с ними формы сосуществования объектов и соответствующие особенности свойств объектов вводятся аксиоматически. Предлагаемая классификация отношений — только первая попытка создания основы для будущей более полной и глубокой классификации. Бесконечное разнообразие материальных и идеальных отношений все равно нельзя формально представить в виде, доступном для восприятия, или поместить в какую-то конечную формальную систему. Но для познания объекта (в данном случае идеальный объект — отношение) всегда следует представлять его в форме обозримой модели, с той или иной степенью адекватности отражающей особенности реального объекта.

Понятия «свойство», «отношение» и все иные, обозначающие общие особенности отношений, предполагаются исходными и формальному определению не подлежат. Исходные понятия можно лишь пояснить с помощью общеупотребительных и «понятных» слов или примеров [8, с. 13].

Рассмотрим две крайние разновидности материальных отношений, отличающиеся степенью их важности для объектов, — *существенные* и *несущественные* отношения. Прежде всего необходимо указать на конкретные сосуществующие объекты и процессы. Основное отношение, благодаря которому группа объектов объединяется в целую систему и без которого система или объект не могут существовать, и есть *существенное*. Благодаря ему элементы системы находятся в состоянии *существенного* сосуществования. Примером *существенного* отношения может служить гравитационное взаимодействие планет Солнечной системы с Солнцем.

Несущественное — это отношение, которое не определяет характер относительного движения, расположения и изменения объектов системы и не обязательно для данной системы. Обмен световыми квантами не изменяет характера относительного движения планет Солнечной системы и по отношению к этому движению является примером *несущественного* отношения. Посредством *несущественного* отношения объекты сосуществуют *несущественно*.

В материальном пространстве — времени между объектами могут наблюдаться *существенные* и *несущественные* отношения, а также занимающие промежуточное положение между ними. В первом приближении эти промежуточные отношения и критерии

для различения «еще существенных» от «уже несущественных» не учитываются, т. е. рассматривается упрощенная модель материального пространства — времени.

Следующая фундаментальная особенность отношений — способность данного объекта в иерархии вступать во взаимодействие с другими объектами, воздействовать на них либо подвергаться воздействию с их стороны. В соответствии с вышесказанным все множество материальных отношений разделяется на *исходящие* и *входящие* воздействия. Взаимодействие рассмотрим как промежуточную форму между двумя названными видами отношений. Указанные особенности отношений, так же, как их существенный и несущественный характер, очень важны для выяснения необходимых условий адекватного и неадекватного отражения действительности. Эти условия необходимо выделить для выяснения принципов работы нервной системы и разумного использования этих принципов при построении технических аналогов нервной системы.

Односторонние отношения, в отличие от взаимных, не обеспечивают условий взаимного существования, сосуществования объектов. По отношению к первому объекту, подвергающемуся воздействию, существует второй — источник воздействия, но первый объект, не воздействующий на второй, не существует по отношению ко второму. Реальный объект может, например, сосуществовать в одном отношении (взаимном) с другим объектом и только существовать для другого объекта посредством второго отношения (одностороннее воздействие).

Третьей общей группой особенностей отношений является их непосредственный или косвенный характер. Иными словами, на определенном уровне отношений отчетливо выделяются те из них, которые не имеют или имеют посредника, например в виде третьего тела или среды. Такие отношения будем называть в дальнейшем соответственно *непосредственными* и *косвенными*. Для иллюстрации таких отношений рассмотрим два достаточно удаленных друг от друга объекта на поверхности Земли, которые практически не взаимодействуют непосредственно друг с другом, но притягиваются порознь Землей. Взаимодействие каждого объекта с Землей в определенном смысле можно считать непосредственным, прямым, а взаимодействие объектов, определяющее их относительное расположение, но осуществляемое опосредствованно, через Землю, — косвенным. Непосредственному и косвенному отношениям соответствуют непосредственное и косвенное существования (сосуществования) объектов.

Относительно некоторого ограниченного материального пространства — времени отношения могут быть *внутренними* и *внешними*. Эти свойства отношений приобретают смысл только при указании конкретного места объекта в иерархии объектов. Отношения, внешние для элементов системы, относительно самой системы являются внутренними, когда не выходят за пределы

одной системы или объекта. Если отношения охватывают несколько уровней в иерархии объектов, то их нельзя считать ни внутренними, ни внешними. Назовем такие отношения *универсальными*. Пример универсальных отношений — гравитационные силы, благодаря которым тела взаимодействуют в земных и космических масштабах.

Итак, внутренние отношения объекта или системы — это отношения, которые не выходят за пределы объекта (системы) и ограничены пределами объекта, т. е. отношения между элементами структуры объекта (системы). Внешние отношения объекта (или системы) — его отношения с другими объектами (системами). Соответственно универсальные отношения имеют место между элементами внутри объекта, между элементами разных объектов и между разными объектами, т. е. охватывают несколько микро- и макроуровней объектов. Внутренним, внешним и универсальным отношениям соответствуют внутреннее, внешнее и универсальное существования объектов.

Указания на внешнюю и внутреннюю природу отношений недостаточно для определения степени распространения данного отношения внутрь или вне системы. Необходимо дополнительно ввести понятие об ограниченных и неограниченных отношениях. Условимся называть микро- или макросистемой первого порядка соответственно ближайшую к данной системе подсистему или надсистему. Микро- или макросистемой второго порядка будем называть соответственно более мелкие, чем подсистема, и более крупные, чем надсистема, объекты. Аналогично можно определить микро- и макросистемы n -го порядка.

Отношение назовем *ограниченным* относительно микро- или макросистемы n -го порядка, если оно не проникает дальше микро- или макросистемы n -го порядка включительно. Существуют отношения, ограниченные всего лишь одним уровнем, т. е. не проникающие в микро- и макросистему. Другие отношения ограничены «сверху» и «снизу» несколькими уровнями объектов (систем), т. е. не выходят за пределы ограниченного числа уровней. *Неограниченным* назовем отношение, проникающее за неопределенное число макро- или микроуровней системы. Ограниченным и неограниченным отношениям соответствуют ограниченные и неограниченные числом уровней существования (сосуществования) объектов одного или нескольких уровней.

Чтобы выяснить условия, в которых элементарное и неэлементарное отражение может быть адекватным, следует также определить, в каком смысле свойства объектов могут проявляться и возникать в отношении, каковы вообще условия возникновения, существования и исчезновения свойств. Для ответа на эти вопросы введем понятия еще о двух общих особенностях отношений — их *прерывности* и *непрерывности*. При этом необходимо по-прежнему иметь в виду относительность противопоставления введенных особенностей отношений. Непрерывность или прерыв-

ность отношений внутри некоторой системы (объекта) рассматривается как объективная возможность или невозможность разделения отношений на отдельные акты, элементы отношения на данном уровне разрешения, диктуемом местом системы (объекта) в иерархии. Прерывные и непрерывные отношения лучше всего пояснить на примерах, т. е. использовать остенсивный способ определения [8, с. 13]. Прерывным и непрерывным отношениям соответствуют прерывные и непрерывные формы существования (сосуществования) объектов.

Для понимания сущности различных форм отражения важно выяснить роль внутренних и внешних, существенных и несущественных отношений в возникновении, существовании и исчезновении свойств отображаемых объектов.

Вопрос о возможности возникновения свойств в отношении тесно связан с понятием о существовании вообще. Существование, безусловно,— универсальное и фундаментальное свойство материи, без отражения которого в соответствующих понятиях нельзя представить ни один вид деятельности человека. Вместе с тем понятие «существование», особенно понятия, отвечающие частным видам существования, менее всего определены и разработаны. Казалось бы, единственным правомерным разъяснением термина «существование» является указание на примеры существования объектов. Однако современный уровень научной мысли требует более четкого понимания существования и разработки частных форм понятия «существование», применимых в конкретных условиях. В частности, необходимо установить, может ли предмет объективно существовать прерывным образом, а свойство объекта — то появляться, то исчезать и каковы условия возникновения, существования и исчезновения свойств.

О существовании объектов

Критерием объективного существования материальных объектов, т. е. существования вне и независимо от сознания, является способность одних объектов воздействовать на другие. В этом воздействии данного объекта на иные и осуществляется его реализация. Если объекты находятся в состоянии взаимного воздействия, взаимодействия, то можно говорить о взаимном существовании, сосуществовании объектов.

Всякое отношение (взаимодействие) предполагает наличие членов отношения, существование членов отношения. В такой отвлеченной постановке существование членов отношения предполагается чем-то абсолютным, наперед заданным, стоящим вне отношения. Но существование невозможно рассматривать вне проявления внутренних конкретных свойств объектов через отношения. Само существование (точнее, внешнее существование) объекта не есть его абсолютная принадлежность. Оно утверждается, реализуется, осуществляется только посредством

отношения, взаимодействия реальных объектов, которые лишь таким образом и становятся реально сосуществующими объектами. Если между объектами нет никаких связей, отношений, взаимодействий или эти отношения нарушаются, исчезают, то такие объекты не существуют по отношению друг к другу, не сосуществуют, или это сосуществование нарушается вместе с исчезновением отношений, т. е. объекты исчезают друг для друга.

Существование реальных объектов всегда конкретно и осуществляется в процессе и посредством конкретного отношения. Для обозначения такого существования (сосуществования) будем использовать термин «*конкретное существование (сосуществование)*» в отличие от существования вообще, не предполагающего учет конкретных форм и особенностей отношения объектов. Невозможно вести рассуждения об объекте, не указывая определенно форму его существования, отношений и свойств. Каждому виду отношения и существования должны быть поставлены в соответствие определенные формы свойств, движений, отражения, пространства — времени и т. д. Относительно различных форм существования Гегель писал: «Разные виды бытия требуют или содержат каждый свой особый вид опосредствования; поэтому и природа доказывания относительно каждого из них также различна» [9, т. 2, с. 113]. Особенно важно, что отражение как свойство всякой материи можно рассматривать «...как одно из существенных форм существования движения вообще, являющегося основной формой существования материи вообще» [10, с. 343].

Сформулируем несколько замечаний относительно природы свойств и осуществим их классификацию в соответствии с выделенными особенностями отношений. Материалистическая философия выделяет в действительности предметы, свойства и отношения. Марксистская философия, развивая и укрепляя материалистические позиции в данном вопросе и строго различая предметы, свойства и отношения, подходит к проблеме соотношения этих трех определений действительности диалектически, указывая на относительность данного различения, на взаимопереходы указанных определений друг в друга. В материальных формах существования (сосуществования) предмет никогда не реализуется отдельно от своих свойств и отношений к другим предметам. Но свойство данной вещи нельзя «рассматривать ни как простой результат отношения, ни как некую статическую принадлежность вещи. Свойство данной вещи выступает в единстве внешних и внутренних связей. Внутренние связи объекта образуют специфическую природу этого свойства, которая проявляется во внешних связях. Итак, свойство вещи есть присущая ей характеристика, существующая в неразрывном единстве внешних и внутренних связей данной вещи» [11, с. 11—13]. Подобным образом Гегель определяет роль внутренних и внешних отношений в возникновении и существовании свойств вещи:

«Вещь обладает свойствами; они, в-о-п-е-р-в-ы-х, ее определенные соотношения с иными; свойство имеется лишь как способ взаимного отношения; оно поэтому внешняя рефлексия и сторона положенности вещи. Но, в-о-в-т-о-р-ы-х, вещь в этой положенности есть в себе; она сохраняет себя в соотношении с иным» [9, т. 2, с. 121]. Свойства, как и формы существования объектов, всегда конкретны. Каковы отношения объекта, какова его форма существования, таковы и его свойства.

Отметим также, что свойство и отношение можно рассматривать самостоятельно, в отрыве от вещей, лишь как результат мысленной абстракции [12, с. 71] и только в сфере идеального существования, особенности которого будут рассмотрены отдельно. Что же касается материальных, объективных форм существования вещей, то «разные вещи находятся благодаря своим свойствам в существенном взаимодействии; свойство есть само это взаимоотношение, и вещь — ничто вне этого взаимоотношения» [9, т. 2, с. 124].

Ограничимся пока сферой материальных объектов и отношений и рассмотрим некоторые особенности свойств, вытекающие из особенностей отношений объектов, образующих систему. Элементы некоторой вещи как системы, по определению системы, находятся между собой в существенном отношении. Система, не подвергающаяся воздействию извне, обладает существенными внутренними свойствами. Вещь как система находится в состоянии внутреннего сосуществования по отношению к своим элементам и тем самым определяет состояние всех своих элементов. Если вещь находится в существенном отношении с другими внешними вещами, то ее внешние (а возможно, и внутренние) движения зависят теперь и от других вещей. Вещь в существенном внешнем отношении приобретает также внешние существенные свойства, становясь, вообще говоря, уже другой вещью, так как приобретенные свойства существенны. В целом вещь во всеобщей связи явлений обладает внутренними и внешними свойствами. При этом внешние и внутренние свойства отличаются всем многообразием «оттенков», присущих особенностям конкретных внутренних и внешних отношений вещи.

ВЫВОДЫ

1. Вещь в существенном внешнем отношении приобретает внешние свойства. Это чрезвычайно важное обстоятельство для понимания специфики элементарного отражения, если при этом иметь в виду, что всякое отражение как процесс — прежде всего отношение отражаемого и отражающего. На уровне элементарного отражения несущественные отношения безразличны для взаимодействующих объектов, они не изменяют существенно состояние отражающего, и не происходит отражение сущности отражаемого. В принятой нами терминологии можно говорить об элементарном отражении как о существенном существовании движения, как о любом существенном изменении отображающего. Но это изменение — также единственный способ внешнего существования свойств отображаемого. Реализация свойства данного объекта

для другого на уровне элементарного отражения — это существенное изменение второго объекта в соответствии со свойствами первого

2. В результате общего анализа отношений установлены их следующие особенности, важные для понимания природы процесса отражения и условий его адекватности: отношения существенные и несущественные, воздействия на данный объект и воздействия, исходящие от данного объекта, непосредственные и косвенные, внутренние и внешние, ограниченные и неограниченные, прерывные и непрерывные.

3. В связи с изложенным процесс элементарного отражения можно описать как непосредственное или косвенное существенное воздействие одного объекта на другой, в результате которого существенно изменяется второй, отображающий, объект в соответствии со свойствами первого, отображаемого. При отсутствии обратного влияния отображающего на отображаемое выполняется одно из основных необходимых условий адекватного отражения. Другие необходимые условия различных форм адекватного отражения рассмотрены в работе [13, с. 178].

4. Если отображаемый объект находится в существенном отношении с ограниченным или неограниченным числом объектов, к числу которых относится и отображающий объект, то в процессе отображения в отображающем фиксируются также свойства отображаемого, приобретенные им во внешнем отношении с другими объектами.

5. Прерывность и непрерывность отношений накладывает соответствующий отпечаток на характер процесса отражения. Элементарное отражение в связи с этим может быть прерывным или непрерывным. Однако процесс элементарного отражения — вместе с тем и единственный способ внешнего существования свойств отображаемого объекта, т. е. в процессе элементарного отражения свойства отображаемого объекта могут реализовываться, существовать относительно отображающего объекта прерывно или непрерывно.

6. Несущественные сигналы о свойствах на уровне элементарного отражения не имеют важного значения из-за отсутствия способа реализации свойств. Только на уровне более сложных, неэлементарных форм отражения при определенных условиях значимыми становятся также несущественные воздействия, сопутствовавшие когда-либо существенным воздействиям и ставшие для достаточно организованных искусственных или естественных систем отображения сигналами.

7. Единственным способом отображения свойств среды является непосредственное существенное отношение со средой в прошлом или настоящем. Если существенное отношение имело место в прошлом, то оно может сохраняться и передаваться по наследству в виде структур, не утрачивающих следов прошлых отношений. Если такие следы в виде начальной организации системы отсутствуют, то только одни сигналы как несущественные воздействия для такой системы совершенно бесполезны и не могут быть использованы для существенного адекватного отображения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э н г е л ь с Ф. Дialeктика природы. М., ОГИЗ, 1952, с. 129.
2. Л е н и н В. И. Соч., т. 14. М.—Л., ОГИЗ, 1947, с. 81.
3. Р и м а н Б. Сочинения. М.—Л., ОГИЗ, 1948, с. 463.
4. Словарь терминов по информатике. М., «Наука», 1971, с. 359.
5. У к р а и н ц е в Б. С. О сущности элементарного отображения.— «Вопросы философии», 1960, № 2, с. 65.
6. П л а т о н о в К. К. О системе психологии. М., «Мысль», 1972, с. 72.
7. Л я п у н о в А. Л. В чем состоит системный подход к изучению реальных объектов сложной природы.— В кн.: Системные исследования (ежегодник, 1971). М., «Наука», 1972, с. 5.
8. П е т р о в Ю. А. Логические функции категорий диалектики. М., «Высшая школа», 1972. 271 с.
9. Г е г е л ь Г. В. Ф. Наука логики. Т. 2. М., «Мысль», 1972, с. 121—124.
10. П а в л о в Т. Теория отражения. М., ИЛ, 1949. 522 с.

11. Овчинников Н. Ф. Понятие массы и энергии в их историческом развитии и философском значении. М., Изд-во АН СССР, 1957, с. 11—13.
12. Уемов А. И. Вещи, свойства и отношения. М., Изд-во АН СССР 1953, с. 71.
13. Тухтин В. С. Отражение, системы, кибернетика. М., «Наука», с. 178

УДК 62.506.2

В. А. БАХТИГОЗИН, инж
Ю. П. БУГАЙ, канд. техн. нау

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПОВ ОБОБЩЕННОЙ ГОЛОГРАФИИ К ПРОБЛЕМЕ СИНТЕЗА ОБРАЗОВ

Главная особенность психических форм отражения внешнего мира — их образный характер. Следы внешних воздействий используются субъектом в синтетической форме чувственных образов, представляющих собой целостное, системное образование в отраженном [1, 2]. Под субъектом в широком смысле слова психологи понимают носителей психического отражения и поведения, т. е. животных и человека, причем вследствие ассоциативных свойств памяти возникновение образа в отраженном не всегда соответствует объективному существованию системы элементов в отображаемом. Эти ассоциативные свойства мозга, представляя собой основу для отражения всеобщей взаимосвязи явлений во внешнем мире, являются одновременно источником возможных искажений объективно существующих форм связи объектов среды в отраженном.

Не всякий способ объединения элементов отображенного в целостный образ пригоден с точки зрения того, что подобное объединение не должно исключать возможность раздельного восприятия элементов образа [2]. Синтез образа не должен иметь характер пространственно-временного интегрирования с потерей информации. Для выполнения этого условия нервная система должна иметь определенную начальную организацию, заданную в виде некоторого класса возможных способов взаимодействия элементов структуры нервной системы. В настоящей работе показана возможность использования идей обобщенной голографии при анализе способов синтеза психических образов в нервной системе.

Основой голографии как метода обратимой регистрации волны является введение дополнительного опорного пучка, чаще всего в виде плоской или сферической волны. Класс волновых фронтов, с помощью которых можно получить голограмму, существенно расширяется, если принять во внимание условия, которым должен удовлетворять опорный пучок. Автосвертка или автокорреляция функции, описывающей пространственную структуру источника опорного пучка, должна иметь вид двумерной дельта-функции либо фигуры с одним максимумом, настолько резко выраженным, что ею можно было бы аппроксимировать

дельта-функцию. Если ввести понятие опорного предмета, более широкое, чем понятие опорного пучка, то класс опорных пучков можно расширить и дальше. Голограмму с опорным предметом в отличие от обычной можно назвать обобщенной [3, 4].

Одна из важных особенностей голографического способа записи сигналов — распределенный характер представления информации об отдельных точечных элементах изображения. Это позволяет восстановить по фрагменту нетренированной голограммы полное изображение объекта [4]. С последним свойством связана возможность дальнейшего расширения области применимости голографических принципов для систем, в которых осуществляется распределенное пространственное кодирование. В частности, можно рассмотреть аналог голограммы в пределах геометрической оптики, где волновые свойства света несущественны.

В общем случае операция линейного кодирования для однородных и неоднородных кодов записывается в виде интегрального преобразования

$$U(\vec{x}) = \iiint_{R^3} G(\vec{x}, \vec{x}') I(\vec{x}') d\vec{x}', \quad (1)$$

где \vec{x}' — точка (x', y', z') исходного пространственного изображения;

\vec{x} — точка закодированного изображения в выходной области пространства;

$G(\vec{x}, \vec{x}')$ — функция рассеяния точки кодирующей системы;

$I(\vec{x}')$ — функция, описывающая кодируемый пространственный объект.

В результате такого интегрального преобразования исходная функция $I(\vec{x}')$ переходит в интегральный образ $U(\vec{x})$. Здесь G — ядро интегрального преобразования, зависящее от параметра \vec{x} . Обратный переход к прообразу можно записать в виде аналогичного соотношения

$$I(\vec{x}') = \iiint_{R^3} U(\vec{x}) G_{\text{обр}}(\vec{x}, \vec{x}') d\vec{x}, \quad (3)$$

где $G_{\text{обр}}(\vec{x}, \vec{x}')$ — интегральное ядро преобразования, обратного преобразованию (1).

Существует класс интегральных ядер G , которые обладают свойством $G_{\text{обр}} = G$ или $G_{\text{обр}} = G^*$, т. е. прямое и обратное преобразования осуществляются с помощью одного и того же интегрального ядра, называемого ядром Фурье. Общая теорема, определяющая условия обратимости линейных преобразований, не сформулирована. Достаточным условием обратимости интеграль-

ного преобразования типа свертки для ядер $G(\vec{x} - \vec{x}')$, зависящих только от разности $(\vec{x} - \vec{x}')$:

$$U(\vec{x}) = \iiint_{R^3} I(\vec{x}') G(\vec{x} - \vec{x}') d\vec{x}', \quad (3)$$

является условие

$$G_{\text{обр}}(\vec{x}) * G(\vec{x}) = \delta(\vec{x}), \quad (4)$$

т. е. свертка интегрального ядра с самим собой равна дельта-функции Дирака.

Примером неоднородного линейного кодирования пространственных изображений является способ получения некогерентных, так называемых трафаретных, голограмм. Для получения этих голограмм используются апертурные маски в виде готового трафарета голограммы точки — зонной пластинки Френеля, которая располагается между предметом и фотопластинкой [4]. В такой системе каждая точка предмета отбрасывает тень (образует центральную проекцию) в виде зонной пластинки, и эти тени от всех точек предмета накладываются одна на другую. Чтобы получить трафаретную голограмму, не нужны линзы и монохроматические источники света. При этом рассеивается непосредственно интенсивность света, пропорциональная квадрату амплитуды сигнала.

Способы распределенного кодирования легко осуществить в нервных структурах с широко разветвленной системой возбуждающих и тормозящих связей. Иными словами, если иррадиация возбуждения и торможения будет осуществляться по такому закону, что функция, описывающая эту иррадиацию, будет иметь автокорреляционную функцию, близкую к дельта-функции, то при подобном распределенном кодировании не будет потеряна информация (например, о пространственном расположении элементов исходного изображения).

Функциональная аналогия нервных и голографических систем, отмеченных в целом ряде работ, широко используется при построении голографических моделей нервной системы [5—8].

Помимо известных функциональных голографических моделей, интересно рассмотреть модели, которые учитывают многие данные о структуре нервных образований, полученные при микрорелектродных и морфологических исследованиях. В большинстве голографических моделей в явной или неявной форме используется предположение о существовании в нервных структурах распространяющихся волн — так называемых волн активности. Это предположение необходимо для объяснения условий возникновения в нервной системе устойчивой картины активности, аналогичной интерференционной картине. Из сказанного выше о возможностях распределенных пространственных кодов следует, что для построения моделей нервной системы, близких по

своим функциональным особенностям к голографическим, нет необходимости предполагать существование волн активности, наличие которых весьма спорно. Для этого вполне достаточно использовать хорошо известные особенности нервных структур. Специальные виды иррадиации возбуждения и торможения, обнаруженные при исследовании рецептивных полей зрительного и других анализаторов, можно оценить как механизмы, обеспечивающие фильтрацию и распределенное кодирование сенсорной информации.

Как правило, нейронные сети представляют собой слоистые структуры. Типичным примером является зрительная система животных. Так, сетчатка состоит из трех нейронных слоев: рецепторных клеток с горизонтальными клетками, биполярных клеток с амакриновыми клетками и ганглиозных клеток. Выходящий из сетчатки зрительный нерв попадает в колленчатом теле на следующие нейронные слои, и, наконец, зрительная информация достигает коры головного мозга, которая также состоит из множества слоистых структур. Нейронные слоистые структуры соединены не только одна с другой. Внутри слоев имеются свои, латеральные связи. Изучение передачи и обработки информации такими структурами затруднено из-за сложности нервной системы, а часто и полного отсутствия сведений о ее структуре. В теории систем однородных слоев поставлена задача описания достаточно сложных слоистых структур простыми приемами [9, 10]. Интегро-дифференциальные операции, осуществляемые в различных нервных слоях, в линейном приближении описываются соотношениями, подобными (1). Характер осуществляемого преобразования (фильтрация, кодирование — декодирование) определяется ядром интегрального преобразования (1). Таким образом, приближенное представление различных слоев нервных клеток в виде однородных и неоднородных непрерывных сред, с одной стороны, и данные о тонких структурных и функциональных особенностях этих слоев, с другой — позволяют формализованно рассматривать любые аналогии между голографическими и нервными системами. Основные предпосылки использования голографических аналогий при описании нервных систем обусловлены данными физиологических исследований [11, 12]. В частности, установлена зависимость функциональных нарушений в нервной системе от количества разрушенной нервной ткани и независимость нарушений от места разрушения. Эта зависимость обобщена в виде:

1) закона действия масс, согласно которому функциональные нарушения пропорциональны массе поврежденной ткани головного мозга;

2) закона равнозначности, по которому функциональные нарушения не зависят от места повреждения.

Первоначально эти законы были сформулированы после многочисленных безуспешных попыток в процессе нейрофизиологи-

ческих исследований экспериментально выделить определенные части мозга, участвующие в распознавании образов. Некоторые виды голограмм включают оба закона в упрощенной форме. Так, эксперименты показали, что чем меньше участок голограммы, используемый для восстановления изображения, тем меньше отношение сигнал/шум (это качественно моделирует первый закон). Кроме того, любой небольшой участок голограммы, площадь которого превосходит определенный минимум, позволяет восстановить изображение первоначального объекта. Это указывает на проявление свойства распределенности, качественно совпадающего со вторым законом.

Ассоциативные свойства и связанные с ними способности нервной системы к прогнозированию легко воспроизводятся в голографических моделях именно благодаря распределенности голографических кодов. Еще одним преимуществом голографической интерпретации методов обработки информации в нервных структурах является, как и в нервной системе, практически одновременная обработка исходной информации по всему полю входного многомерного сигнала. Голографическая система не нуждается в операциях сканирования изображения, что согласуется с известным, свойственным нервной системе, принципом параллельной обработки информации, поступающей по многим входным каналам анализаторов.

Рассмотрев функциональную аналогию нервных и голографических систем и выяснив структурные особенности нервных систем, проанализируем образы как целостные образования в отраженном. Целостность образа является для организма необходимым средством выражения качественной обособленности и устойчивости объектов внешней среды. Различимость отдельных элементов воспринимаемого образа обеспечивает условия адекватного поведения организма в среде. М. Борн предлагал целостный психический образ «приравнять к математическому понятию «инвариант» и говорить об «инвариантах восприятия» как элементах нашего духовного мира» [13, с. 282].

Инварианты восприятия, образы как нечто остающееся в восприятии неизменным необходимы живым организмам для успешного целенаправленного поведения. Единственный способ выявить инварианты — это осуществить ряд преобразований объекта, которые соответствуют его возможным изменениям при воздействиях извне. Вероятно, формирование образа как целого в отраженном и последующее его разностороннее преобразование для выявления инвариантного содержания и есть способ функционирования нервной системы организмов, способных к обучению.

Известные механизмы формирования последовательных зрительных образов [14] и различные виды движения глаз при зрительном восприятии можно оценить как конкретные элементы деятельности нервной системы, действия в целях получения зри-

тельных образов — инвариантов. Однако необходимо выяснить, чем является именно целостность образа, что скрывается за интуитивно понимаемым целым и каковы критерии последнего. Наиболее конструктивным следует считать путь рассуждений от критериев целостности отображаемых объектов внешнего мира к соответствующим критериям для образов этих объектов в отображенном.

Отображаемый материальный предмет объективно представляет собой нечто целое, если элементы этого предмета связаны отношениями, которые определяют состояние и изменение всего его элементов, а также само существование предмета. Подобные отношения элементов можно назвать существенными, тем самым подчеркнув их роль в существовании предмета как такового. Соответственно несущественными следует назвать отношения, которые не влияют на состояние отдельных элементов их множества и не обязательны для существования некоторого предмета.

Итак, в качестве объективного критерия целостности множества взаимодействующих предметов можно использовать существенность совместного, суммарного влияния всех предметов на каждый отдельный предмет множества. Приведенный качественный критерий целостности можно конкретизировать и довести до количественной оценки.

В общем случае результат совместного влияния всех материальных предметов множества в некоторой точке пространственно-временной области, в которой находятся все указанные предметы, описывается в виде интегрального соотношения, подобного выражению (1):

$$U(\vec{x}, t) = \iiint_{R_i} G(\vec{x}, \vec{x}', t, t') J(\vec{x}', t') d\vec{x}' dt'. \quad (5)$$

Здесь $G(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$ — функция, описывающая характер влияния каждого из элементов множества на окружающую область и их вклад в суммарное влияние $U(\vec{x}, t)$ всех элементов во всякой точке области;

$J(\vec{x}', t')$ — функция, учитывающая расположение и вес элементов множества в различные моменты времени.

Реальные объекты могут одновременно находиться в различных отношениях R_i друг с другом, и каждому из этих отношений можно поставить в соответствие свою особую функцию влияния $G_i(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$. Для любой из этих функций с помощью соотношения (5) следует найти величину суммарного влияния $U_i(\vec{x}, t)$ в любой точке рассматриваемой области. Роль различных отношений может оказаться неодинаковой, так что некото-

рыми отношениями можно пренебречь. Посредством существенного отношения элементы множества объединены в систему. Количественным критерием целостности, «системности» группы элементов, находящихся в некотором отношении R_i , служит величина $U_i(\vec{x}, t)$, превышающая некоторое установленное, например какое-то пороговое $U_{i \text{ пор}}$, значение. Другими словами, элементы множества объектов при помощи данного отношения включены в целое и являются элементами системы, если они оказываются в области, где $U_i(\vec{x}, t) \geq U_{i \text{ пор}}$. Элементы, находящиеся в области, где $U_i(\vec{x}, t) < U_{i \text{ пор}}$, не принадлежат данной системе. Аналогичные рассуждения можно провести для любого существенного отношения (или их группы) в множестве объектов. При этом посредством различных существенных отношений одни и те же элементы множества могут включаться в различные системы.

Целостность материальных систем определяется очень многими конкретными отношениями. Однако в системах отображения фиксируются лишь некоторые свойства и отношения элементов материальных объектов, в том числе и несущественные для отображаемых объектов, но существенные по какой-либо причине для отображающих объектов. Указанная способность отображающих систем фиксировать несущественные отношения и возводить их в ранг существенных в отображаемом принципиально важна для понимания сущности проблемы синтеза образов и трактовки последних как целостных образований в отображенном. Отношения, устанавливаемые внутри отображающей системы, могут иметь совершенно иную природу и отражать лишь внешнее проявление существенных отношений элементов отображаемых объектов. Тем не менее возможность адекватного отражения при этом сохраняется [1, с. 178], но появляется также вероятность неадекватного отражения вследствие специфичности структуры отображающего [15]. Независимо от того, каким отношениям отображаемого поставлены в соответствие отношения в отображающем, существенность последних и их роль в формировании образа как целого следует оценивать аналогично целостным материальным системам. Распределенные пространственные коды, рассмотренные в настоящей работе, возможно, позволят объяснить механизмы формирования целостных нервных образов. Так, в силу своей распределенности эти коды обеспечивают взаимосвязь всех нервных элементов, участвующих в отображении входного сигнала. Если при этом все элементы находятся в сфере взаимного влияния, то суммарное действие на один из них со стороны всех остальных может быть значительным.

ВЫВОДЫ

1. Если образ есть целое, то по аналогии с материальными системами его можно рассматривать как такое состояние отображающего субстрата, при котором элементы последнего объединяются под влиянием отображаемого в систему. Если при этом всякому отображаемому ставится в соответствие свой закон взаимосвязи элементов, то, как в голограмме и ее обобщенных вариантах, становится возможным отображение и раздельное воспроизведение многих объектов на одном и том же носителе.

2. Механизм движения глаз животных может обеспечить необходимый способ оригинального кодирования каждого входного сигнала (например, при формировании зрительного образа). Эти движения обеспечивают многократное предъявление одного и того же зрительного сигнала проекционной зоне коры зрительного анализатора во многих ракурсах. Таким образом, способ распределения информации задается самой формой входного изображения, разной для каждого изображения.

3. При движении глаз учитываются контуры изображения и взгляд фиксируется вблизи контура изображения [16]. Это свойство зрительной системы фактически обеспечивает распределение каждой точки изображения на целую область проекционной зоны зрительной коры по закону, повторяющему форму самого изображения. Это распределение, происходящее преимущественно в точках контура одного из ракурсов изображения, обеспечивает осуществление процедуры, являющейся нервным аналогом вычисления автокорреляционной функции.

4. Автокорреляционная функция для большинства контурных изображений и любых дискретизированных по случайному знакопеременному закону неконтурных изображений имеет один или несколько резко выраженных максимумов. Эти максимумы, например в виде зон с повышенной нервной активностью, могут сигнализировать в зрительной системе о завершении формирования зрительного образа для последующего запоминания или распознавания либо являться результатом, фиксируемым в длительной памяти.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тюттин В. С. Отражение, системы, кибернетика. М., «Наука», 1972. 256 с.
2. Бахтигозин В. А., Бугай Ю. П. Математическая модель пространственного кодирования в зрительном анализаторе. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 8. Харьков, 1972, с. 52—55.
3. Строук Дж. Введение в когерентную оптику и голографию. М., «Мир», 1967. 347 с.
4. Сороко Л. М. Основы голографии и когерентной оптики. М., «Наука», 1971. 616 с.
5. Суайгерт К. Дж., Фогельгут П. О. Пространственная фильтрация в модели нейронной сети. — В сб.: Модели нейронных структур. М., «Наука», 1970, с. 244—265.
6. Westlake P. R. The Possibilities of Neural Holographic Processes with in the Brain. — «Kybernetik», Bd 7, N 4, S. 129—153.
7. Barrett T. W. Holography, Information Theory and Cerebral Cortex. — «Mathematical Biosciences». vol. 9, p. 49—60.
8. Габор Д. Ассоциативная голографическая память. — «Зарубежная радиоэлектроника», 1970, № 4, с. 61—67.
9. Бугай Ю. П. Исследование нейрноподобных элементов и систем как устройства первичной переработки информации. Автореф. канд. дис. Харьков, 1968. 27 с.
10. Marko H. Die Sistemtheorie der homogenen Schichten. Mathematische Grundlagen. — «Kybernetik», Bd 5, N 6, S. 221—240.
11. Лешли К. С. Мозг и интеллект. М. — Л., Госэнергоиздат, 1933. 222 с.
12. Pribram K. H. The Neurophysiology of Remembering. — «Scientific American», 1969, vol. 22, N 1.

13. Борн М. Физика в жизни моего поколения. М., ИЛ, 1963. 535 с.
14. Балоннов Л. Я. Последовательные образы. Л., «Наука», 1971. 214 с.
15. Бугай Ю. П. Об особенностях элементарных и неэлементарных форм отражения, существенных для моделирования нервной системы. Сообщение I (см. ст. в настоящем сборнике).
16. Ярбус А. Л. Роль движения глаз в процессе зрения. М., «Наука», 1965. 166 с.

УДК 62.506.2

Ю. П. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО, д-р техн. наук
Е. А. СОЛОВЬЕВА, инж

К ВОПРОСУ ОБ АВТОМАТИЧЕСКОМ МОРФОЛОГИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ ПРИЧАСТИЙ РУССКОГО ЯЗЫКА

Математическое моделирование на ЭЦВМ способности человека решать задачи морфологического анализа позволяет автоматически получать морфологическую информацию о словоформе. При этом наибольшую практическую и теоретическую ценность представляет изучение словесного поведения идеального грамотного человека, которое мы и анализируем.

В настоящей работе исследуется классификация причастий по признаку формы (полной или краткой), залога и времени. Причастия входят в систему глагольных образований. Поэтому необходимо научить ЭЦВМ автоматически отличать их от остальных форм глагола. Этот вопрос рассматривается здесь в более общем виде как задача определения, к какому из множеств (глаголов, причастий или деепричастий) принадлежит любая глагольная форма.

Изложим некоторые соображения относительно выбора задачи для моделирования.

Причастие и деепричастие являются атрибутивными формами глагола, обозначающими действие как признак, свойство предмета или лица или как признак, характеризующий другое действие [1]. Причастие совмещает в себе признаки глагола и прилагательного, но теснее связано с глаголом. Это проявляется прежде всего в общности основы и ее лексического значения, также в наличии у причастия основных глагольных категорий например залога и времени [2, 3]. Деепричастие, обозначающее в качестве наречного признака тот процесс, который назван инфинитивом, относится вместе с инфинитивом к морфологическому разряду неизменяемых слов, но при этом также близко к глаголу и является его формой. Следовательно, в данной работе моделируются задачи определения глагольных признаков причастий и различения основных множеств глагольных форм.

Введем обозначения, которые позволят описать функционирование моделей. Множество глагольных форм русского языка обозначим через $X = \{x_1, \dots, x_n, \dots\}$, глаголов — $X^V = \{x_1^V, \dots$

..., x_k^V, \dots }, причастий — $X^P = \{x_1^P, \dots, x_m^P, \dots\}$, деепричастий — $X^A = \{x_1^A, \dots, x_l^A, \dots\}$. Число n, k, m, l элементов этих множеств не ограничено ввиду развития языка и возможности появления в нем новых словоформ. Для обозначения произвольного элемента

$$x_i \in X, \quad (1)$$

$$x_i^V \in X^V, \quad (2)$$

$$x_i^P \in X^P, \quad (3)$$

$$x_i^A \in X^A, \quad (4)$$

например, глагольной формы *читаю*, будем применять запись $x_i = [\text{читаю}]$ или $x_i^V = [\text{читаю}]$, так как известно, что $([\text{читаю}] \in X) \wedge ([\text{читаю}] \in X^V)$. Следует отметить, что x_i является синтетической (одно слово) формой глагола. В данной работе примеры глагольных форм приводятся из словаря [4].

Множества X^V, X^P, X^A являются подмножествами множества X ($X^V \subset X, X^P \subset X, X^A \subset X$), причем

$$X = X^V \cup X^P \cup X^A. \quad (5)$$

Эти подмножества могут в принципе пересекаться, например:

$$X^V \cap X^P \neq \emptyset$$

Покажем это. Так, $x_i = [\text{изменяем}]$ относится одновременно к множествам глаголов и причастий, т. е. выполняется условие $x_i \in X^V \cap X^P$. Следовательно, (5) верно.

Множество $Y^P = \{y_1^P, \dots, y_r^P\}$ объединяет r признаков (выбрано $r = 6$) причастий, приведенных в таблице Y_j^P .

Форма	Время	Залог	
		Действительный	Страдательный
Полная	Настоящее	y_1^P	y_2^P
	Прошедшее	y_3^P	y_4^P
Краткая	Настоящее	—	y_5^P
	Прошедшее	—	y_6^P

Элемент y_j ($j = \overline{1,3}$) множества $Y = \{y_1, y_2, y_3\}$ означает принадлежность к одному из трех подмножеств: X^V (при $j = 1$), X^P ($j = 2$), X^A ($j = 3$).

Преобразователь словесной информации F^P , ставящий в соответствие произвольному элементу $x_i^P \in X^P$ некоторый элемент $y_j^P \in Y^P$ (X^P — множество входных слов F^P ; Y^P — выходных), является математической моделью способности человека опреде-

лать форму, залог и время причастий русского языка. Эта модель получена в виде граф-схемы алгоритма Γ^P , которую можно представить как последовательное соединение трех составных блоков — нормализации, классификации и выходного. Аналогичный вид (с точностью до обозначений) имеет алгоритм морфологического анализа A_k (рис. 1 [5]). Блок нормализации алгоритма идентичен блоку 1 (рис. 2, а, [5]). Выходной блок Γ^P подобен блоку 3 (рис. 2б, [5]), и так как определенное количество выходных сигналов алгоритма (для $\Gamma^P - r = 6$) требует такого же числа операторов в выходном блоке и соответственно входов в этот блок, для выходного блока Γ^P окажется шесть операторов и входов.

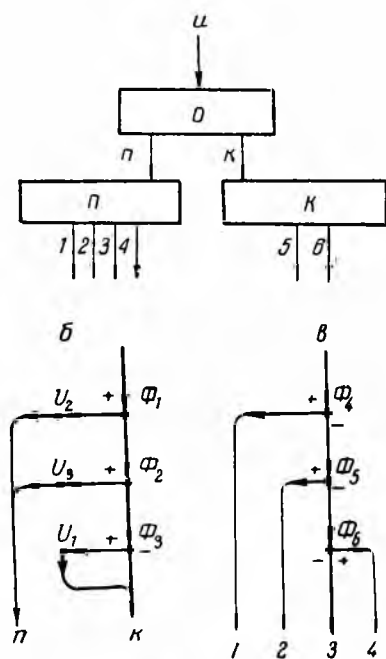


Рис. 1.

Блок классификации, показанный на рис. 1, а, удобно подразделить на три блока: O — выделения основы, Π — классификации полных причастий, K — классификации кратких. Выделяя основу причастия, блок O направляет его на выход Π , если причастие стоит в полной форме, и на выход K — если в краткой. Блок O (рис. 1, б) состоит из операторов $U_1 - U_3$ и распознавателей $\Phi_1 - \Phi_3$. Операторы U_1, U_2, U_3 отбрасывают соответственно одну, две или три последние буквы слова. Распознаватели проверяют конец слова на совпадение с одним из буквосочетаний *ая, ее, ей, ем, ею, ие, ий, им, их, ое, ой, ом, ою, ые, ый, ым, ых, ую* (Φ_1); *его, ему, ими, ого, ому, ыми* (Φ_2) или с одной из букв *а, о, ы* (Φ_3). В состав блока Π (рис. 1, в) входят только распознаватели ($\Phi_4 - \Phi_6$), поэтому он не изменяет сигнал, поступающий на его вход. Φ_4 проверяет конец слова на *ущ, ющ, ащ* или *ящ*, Φ_5 — на *н* или *т*, Φ_6 — на *ем, им* или *ом*. Блок K состоит из одного распознавателя Φ_5 , положительный выход которого отмечен цифрой 6, а отрицательный — цифрой 5.

При отладке алгоритма Γ^P на большом массиве слов (3) не было обнаружено ни одного x_i^P , неточно проанализированного. Эти результаты, а также данные исследования множества X^P и правил его образования позволяют заключить, что погрешность алгоритма $\Gamma^P - \epsilon^P = 0$ (видимо, теоретически следует считать $\epsilon^P \approx 0$).

Рассмотрим преобразователь F , который любому элементу x_i входного множества X ставит в соответствие элемент y_j выходного множества Y . Этот преобразователь, моделирующий поведение человека при классификации глагольных форм на три разряда (глаголы, причастия или деепричастия), получен в виде алгоритма Γ , аналогичного по своей структуре Γ^P . Подавая на вход Γ слово (1), на его выходе получаем признак y_1, y_2 или y_3 в зависимости от того, выполнение какого из условий (2), (3) или (4) он установит. Граф-схема упрощенного блока классификации алгоритма Γ приведена на рис. 2. Она состоит из распознавателей $\Phi_1 - \Phi_3$ и операторов $U_1 - U_3$. Распознаватель Φ_1 проверяет конец слова на *ая*; Φ_5 — на *а* или *о*; Φ_6 — на *л*; Φ_8 — на *н, ы, от, рт, ыт*, или *нут*; Φ_9 — на *в, я* или *ии* (с предшествующей согласной). Выполняются условия

$$[\Phi_4]_{\Gamma} = [\Phi_2]_{\Gamma^P}, [\Phi_7]_{\Gamma} = [\Phi_5]_{\Gamma^P},$$

$$[U_1]_{\Gamma} = [U_1]_{\Gamma^P}, [U_2]_{\Gamma} = [U_2]_{\Gamma^P},$$

$$[U_3]_{\Gamma} = [U_3]_{\Gamma^P},$$

означающие идентичность функционирования соответствующих блоков алгоритмов Γ и Γ^P , а также условие

$$[\Phi_3]_{\Gamma} = [\Phi_1]_{\Gamma^P} - [\Phi_1]_{\Gamma},$$

из которого следует, что Φ_3 в алгоритме Γ проверяет конец слова на те же буквосочетания, что и Φ_1 в алгоритме Γ^P , за исключением буквосочетания *ая*. Φ_3 проверяет конец слова на *ущ, ющ, ащ, ящ, н, т, ем, им* или *ом, т. е.*

$$[\Phi_2]_{\Gamma} = [\Phi_4]_{\Gamma^P} + [\Phi_5]_{\Gamma^P} + [\Phi_6]_{\Gamma^P}.$$

Ввиду сложности точного алгоритма Γ в данной работе приведен упрощенный блок классификации (рис. 2), не всегда дающий верное решение. Число глагольных форм, анализируемых ошибочно, настолько мало по сравнению со всем множеством X , что погрешность алгоритма ϵ будет незначительно отличаться от нуля. Эту погрешность можно уменьшить (при условии, что множество X конечно) путем введения перед блоком классификации дополнительного блока, который позволит получить более точный (но усложненный) алгоритм Γ_1 .

Не описывая дополнительный блок, отметим наиболее важные случаи, которые будут им рассматриваться.

Подавляющее большинство глагольных форм можно классифицировать однозначно. Возможен и неоднозначный ответ. Например, для $x_i = [\text{изменяем}] \in X \cap X^P$ правильным будет ответ

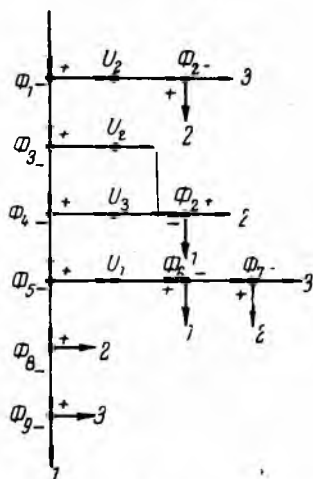


Рис. 2.

$y_1 = y_1 \wedge y_2$, а алгоритм F выдаст сигнал y_1 . Число таких случаев незначительно, потому что краткие страдательные причастия настоящего времени на *ем, им* в современном русском языке почти не употребляются [6], но при необходимости их можно учитывать.

Рассмотрим $x_i = [\text{подшѐй}]$ и $x_q = [\text{пáдшей}]$. Алгоритм F , проверив концы слов на совпадение с *ей*, а затем, отбросив *ей*, — с *ди*, отнесет x_i и x_q к причастиям, в то время как x_i является глаголом. Такую ошибку можно устранить, если заметить, что ударение в причастиях не падает на флексии. Избавиться от ошибки можно также путем различения приставки и корня словоформ. Деепричастия, как и причастия, могут оканчиваться на *тая*. Для устранения неточности в этом случае можно ввести знак ударения либо воспользоваться другими приемами. Алгоритм F входным сигналам $x_i = [\text{пропащѐим}]$ и $x_q = [\text{протащѐим}]$ поставит в соответствие один и тот же выходной сигнал y_2 , в то время как x_q должен соответствовать y_1 . Такие x_q малочисленны и могут классифицироваться точно дополнительным блоком. При разрешении подобных случаев мы стремимся, когда это возможно, не использовать словарь исключений.

Если необходимо автоматически различать четыре формы глагола (неопределенную, личную, причастие и деепричастие) то F можно дополнить алгоритмом классификации глаголов по признаку формы (неопределенной или личной), предложенным в работе [7].

Рассмотренные алгоритмы реализованы на ЭЦВМ и могут применяться на практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грамматика русского языка. Т. I. М., Изд-во АН СССР, 1960. 719 с.
2. Грамматика современного русского литературного языка. М., «Наука», 1970. 767 с.
3. Гужва Ф. К. Современный русский литературный язык. Киев, «Радянськ школа», 1967. 223 с.
4. Орфографический словарь русского языка, изд. II-е. М., «Сов. энциклопедия», 1971. 520 с.
5. Соловьева Е. А. Автоматический морфологический анализ суженно парадигмы глагола (см. ст. в настоящем сборнике).
6. Земский А. М., Крючков С. Е., Светлаев М. В. Русский язык ч. I-я. М., «Просвещение», 1971. 287 с.
7. Бондаренко М. Ф., Соловьева Е. А. Методы решения задач морфологической и субморфологической классификации.— В сб.: Проблемы бионики. Вып. 10. Харьков, 1973, с. 145—150.

К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В НЕРВНОЙ ТКАНИ. СООБЩЕНИЕ I

Системный подход в теоретических и экспериментальных исследованиях успешно применяется в различных областях знаний. Конкретизируя основные положения диалектического материализма, он позволяет изучать сложные явления материального мира.

В связи с особенностями макро- и микроподхода к изучаемому явлению [1], требующими описания объекта при помощи моделей на различных уровнях разрешения, необходимо рассматривать «триаду» уровней [2]. Основной, выбранный для моделирования данного процесса, уровень разрешения охватывается двумя ближайшими уровнями, один из которых отражает микроявления и позволяет обосновывать исходные положения основной модели, в то время как другой служит для проверки результатов, получаемых на основании модели среднего уровня и находится в таком же отношении к среднему уровню, как тот к предыдущему. Подобный метод дает возможность начинать исследование явления с любого уровня и, двигаясь по мере необходимости «вверх» или «вниз», достигать требуемой полноты описания.

Используя уравнения Максвелла [3] для моделирования электрических явлений в нервной ткани (НТ), мы тем самым определяем уровень разрешения будущей модели. Целью данной работы является построение математической модели электрических явлений в НТ, учитывающей пассивные свойства среды и не противоречащей возможным электрическим процессам на ионном уровне. Рассмотрим основные положения, которыми руководствуются при исследовании ионных процессов.

Две концепции электрохимической природы биопотенциалов

Исследователи процессов в возбудимых тканях не выработали единого представления о механизме возникновения биоэлектрических явлений в клетках живых организмов. Можно отметить две основные теории [4]: классическую мембранную теорию, представителями которой являются Бернштейн, Катц, Ходжкин, Кол и другие, и более позднюю фазовую теорию, разработанную школой Насонова, Александрова и Трошина.

Странники мембранной теории рассматривают биологическую среду вне и внутри клетки как растворы электролитов, в которых в свободном состоянии находятся различные ионы. В спокойном (невозбужденном) состоянии мембрана клетки избирательно проницаема для ионов Na^+ , K^+ , Cl^- , потоки которых сквозь мембрану уравниваются электрическим полем.

Асимметрия в распределении концентраций ионов по обе стороны мембраны и их диффузионный обмен осуществляются сложными мембранными механизмами, обуславливающими наличие потенциала покоя (ПП) и потенциала действия (ПД). Согласно мембранной теории, в природе ПП и ПД отсутствует принципиальная разница. В связи с этим возникают гипотезы о ионных «насосах» и «переносчиках», усложняющие функциональную роль мембраны и труднообъяснимые.

Сторонниками фазовой теории сформулированы три основных положения, позволяющих избежать отмеченных выше трудностей [4].

1. Дисперсионная среда живой протоплазмы проявляет себя как фаза по отношению к окружающему водному раствору электролитов.

2. Меньшая часть электролитов протоплазмы присутствует в ней в виде раствора, уравниваясь с растворами электролитов в окружающей среде. Большая часть не ионизирована и химически связана с протоплазмой.

3. При повреждении или в состоянии возбуждения дисперсионная среда протоплазмы теряет свои фазовые свойства. Связанные с протоплазмой электролиты освобождаются, переходя в простой водный раствор.

Таким образом, фазовая теория отвергает активный перенос ионов через мембрану клетки, а асимметрию их распределения объясняет различием физико-химических состояний ионов вне и внутри клетки. Следовательно, ПП определяется недиффузibilityными ионами полиэлектролитов. ПД возникает при нарушении доннановского равновесия и определяется диффузibilityными ионами, которые освобождаются в результате этого процесса и движутся по градиентам образующихся концентраций.

Фазовая теория более обоснована с энергетической точки зрения и позволяет объяснять многие экспериментальные факты, которые тяжело интерпретировать с позиций мембранной теории. Однако некоторые положения фазовой теории также противостоят наблюдаемым явлениям. Это обусловило попытку создания так называемой фазово-мембранной теории [4].

Описание электрического поля в нервной ткани с помощью уравнений Максвелла

Хотя рассмотренные концепции электрохимических явлений в клетках живых организмов содержат некоторые взаимоисключающие положения, они позволяют утверждать, что электродинамические явления в биологических средах возникают благодаря движению потоков заряженных частиц (ионов). Анализируя этот факт с позиций классической электродинамики, можно пренебречь различием в толкованиях природы возникновения ПП и ПД, так как классическая электродинамика не рассматривает

механизмы перераспределения токов и зарядов в некоторой области пространства, а описывает изменение электромагнитных полей, вызванное этими процессами. Еще одним преимуществом такого подхода является возможность учитывать различные неэлектрические процессы, влияющие на электромагнитное поле, путем введения сторонних эквивалентных токов. Используя уравнения Максвелла, можно получить картину распределения напряженности электрического поля в биологической среде с учетом неоднородностей морфологической структуры тканей. Для описания электрических процессов в нервной ткани уравнения Максвелла следует дополнить уравнениями источников сторонних токов, сложная динамика которых отражает специфические особенности изучаемой среды и влияние различных раздражителей [3].

Принимая в качестве основной характеристики электрических явлений вектор напряженности электрического поля \vec{E} и используя уравнения Максвелла для сред, обладающих проводимостью, получаем

$$\Delta \vec{E} = \mu \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma [S(\vec{x})] \vec{E} + \vec{j}_{\text{ст}} \right\}, \quad (1)$$

где $S(\vec{x}) = 0$ — уравнение поверхности, образованной мембранами нервных клеток:

$\sigma [S(\vec{x})]$ — удельная проводимость среды, задаваемая в виде

$$\sigma [S(\vec{x})] = \begin{cases} \sigma_{\text{н}}, & S > \frac{h}{2}; \\ \sigma_{\text{м}}, & -\frac{h}{2} \leq S \leq \frac{h}{2}; \\ \sigma_{\text{в}}, & S < -\frac{h}{2}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{н}}$ — удельная проводимость внеклеточной среды;
 $\sigma_{\text{в}}$ — удельная проводимость внутриклеточной среды;
 $\sigma_{\text{м}}$ — удельная проводимость мембраны клетки в невозбужденном состоянии;

$\vec{j}_{\text{ст}}(\vec{x}, t)$ — вектор плотности сторонних токов.

Соотношение (1) учитывает неоднородность биологических сред и геометрические особенности рассматриваемых пространственных структур.

Если факторы, воздействующие на электрическую активность ткани, представить в виде плотности эквивалентного стороннего тока, источники которого расположены на соответствующих участках мембраны, то можно записать

$$\vec{j}_{\text{ст}}(\vec{x}, t) = \vec{n}_S(\vec{x}) \delta^* [S(\vec{x})] \{ j_{\text{н}}(\vec{x}, t) + j_{\text{с}}(\vec{x}, t) + j_{\text{р}}(\vec{x}, t) + j_{\text{п}}(\vec{x}, t) \}, \quad (3)$$

где j_n — плотность тока, вызываемого электрическим полем в данной точке мембраны;
 j_c — плотность тока, вызываемого медиатором в постсинаптической мембране;
 j_p — плотность тока несинаптического рецепторного источника;
 $\vec{n}_s(\vec{x})$ — вектор внешней нормали к поверхности мембраны;
 J_n — плотность тока, генерирующего нейсмекерный потенциал;

$\delta^* [S(\vec{x})]$ — характеристическая функция множества точек пространства R^3 , принадлежащих мембранам клеток:

$$\delta^* [S(\vec{x})] = \begin{cases} 1, & -\frac{h}{2} \leq S \leq \frac{h}{2}; \\ 0, & \frac{h}{2} < S, S < -\frac{h}{2}. \end{cases}$$

Представление внешних воздействий в форме (3) дает возможность вводить в рассмотрение новые влияния, увеличивая число слагаемых в (3), а также определять вклад каждой компоненты в формирование электрического поля мембраны.

Построенная модель основана на законах классической электродинамики. Поэтому она достаточно полно описывает явления в средах, обладающих некоторыми свойствами нервной ткани. Для использования ее в качестве модели реальных процессов необходимо конкретизировать каждую компоненту $\vec{j}_{ст}(\vec{x}, t)$ в (3). Пути решения этой задачи требуют особого рассмотрения, так как сложная динамика мембранных токов тесно связана с молекулярными процессами в клетках. В данной работе основное внимание уделяется физическим и геометрическим свойствам среды и их влиянию на распределение электрических полей. Возможность такого разделения задач и связанное с этим удобное математическое описание обусловлены способами решения неоднородных дифференциальных уравнений [5]. Перепишем выражение (1) в виде

$$\Delta \vec{E} - \mu\mu_0\epsilon\epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E} - \mu\mu_0\sigma [S(\vec{x})] \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} = \mu\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{j}_{ст}(\vec{x}, t). \quad (4)$$

Тогда его решение можно представить с помощью интеграла свертки

$$\vec{E}(\vec{x}, t) = \mu\mu_0 \iiint_{R^3} d\vec{x}' \int_{-\infty}^t dt' \vec{E}_\Phi(\vec{x} - \vec{x}', t - t') \frac{\partial}{\partial t'} \vec{j}_{ст}(\vec{x}', t'), \quad (5)$$

где $\vec{E}_\Phi(\vec{x}, t)$ — решение уравнения (4) с правой частью вида δ -функции Дирака $\delta(\vec{x} - \vec{x}', t - t')$.

Таким образом, задача состоит в нахождении фундаментального решения (функции влияния) $\vec{E}_\Phi(\vec{x}, t)$ дифференциального

оператора (1) для различного вида поверхностей нервных клеток $S(\vec{x}) = 0$. В последующем изложении будем использовать термин «функция влияния» соответствующей мембраны.

Функция влияния мембран простой геометрической формы

Коэффициент при первой производной по t в (1) полагаем равным

$$\sigma[S(\vec{x})] = \sigma_c [1 - h\delta(S(\vec{x}))],$$

где σ_c — константа удельной проводимости среды. Подобная идеализация соответствует тому, что проводимость мембран клеток в невозбужденном состоянии на несколько порядков ниже проводимости окружающей среды, а различием в значениях проводимостей вне и внутри клетки по сравнению с различием в проводимостях самой мембраны и окружающего ее пространства можно пренебречь. Согласно этим предположениям, уравнение (4) для нормальной составляющей вектора напряженности электрического поля принимает вид

$$\Delta E - \mu\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} + \sigma_0 [1 - h\delta(S(\vec{x}))] \right\} E = \mu\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} j_{ct}(\vec{x}, t). \quad (6)$$

Фундаментальное решение ищем в виде

$$E(\vec{x}, t) = e^{at} \tilde{E}(\vec{x}, t). \quad (7)$$

После подстановки (7) в (6) и замены в правой части свободного члена δ -функцией получаем уравнением для \tilde{E} :

$$\Delta \tilde{E} - b \frac{\partial^2}{\partial t^2} \tilde{E} + a \tilde{E} = c \left(\frac{\partial}{\partial t} + \alpha \right) \tilde{E} \delta[S(\vec{x})] + \delta(\vec{x}, t). \quad (8)$$

Здесь

$$\begin{aligned} a &= -\frac{\sigma_c}{2\epsilon\epsilon_0}; \quad \alpha = \frac{\mu\mu_0\sigma_c^2}{4\epsilon\epsilon_0}; \\ b &= \mu\mu_0\epsilon\epsilon_0; \quad c = \mu\mu_0\sigma_c h. \end{aligned}$$

Обозначая $\tilde{\epsilon}(\vec{x}, \omega) = F_t \{ \tilde{E}(\vec{x}, t) \}$, где F_t — преобразование Фурье во времени от $\tilde{E}(\vec{x}, t)$ для определения $\tilde{\epsilon}(\vec{x}, \omega)$ записываем интегральное уравнение

$$\begin{aligned} \tilde{\epsilon}(\vec{x}, \omega) &= \frac{1}{(2\pi)^2} \frac{\cos(|\vec{x}| \sqrt{b\omega^2 + a})}{|\vec{x}|} + \frac{c(i\omega + \alpha)}{(2\pi)^2} \times \\ &\times \iint_{R^3} \frac{\cos(|\vec{x} - \vec{x}'| \sqrt{b\omega^2 + a})}{|\vec{x} - \vec{x}'|} \delta[S(\vec{x}')] \tilde{\epsilon}(\vec{x}', \omega) d\vec{x}', \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\vec{x} = \{x_1, x_2, x_3\}; \quad |\vec{x}| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}.$$

Соотношение (9) можно переписать в виде [6]

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon}(\vec{x}, \omega) &= \frac{1}{(2\pi)^2} \left\{ \frac{\cos(|\vec{x}| \sqrt{b\omega^2 + a})}{|\vec{x}|} + c(i\omega + a) \times \right. \\ &\times \left. \int \int \int_{\Omega} \frac{\cos(|\vec{x} - \vec{u}| \sqrt{b\omega^2 + a})}{|\vec{x} - \vec{u}|} D\left(\frac{\vec{x}}{\vec{u}}\right) \delta(u_3) \tilde{\varepsilon}(\vec{u}, \omega) d\vec{u}, \right. \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$\Omega = \{\vec{x} | S(\vec{x}) = 0\};$$

$$\vec{u} = \{u_1, u_2, u_3\};$$

$u_3 = S(\vec{x})$, u_1, u_2 — произвольные, но такие, что Якобиан $D\left(\frac{\vec{x}}{\vec{u}}\right) \neq 0$.

В случае бесконечной плоской мембраны, совпадающей с координатной плоскостью, значения

$$\Omega = \{\vec{x} | x_3 = 0\}, \quad \vec{u} = \{x_1, x_2, x_3\}, \quad D\left(\frac{\vec{x}}{\vec{u}}\right) \equiv 1$$

и (10) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon}(\vec{x}, \omega) &= \frac{1}{(2\pi)^2} \left\{ \frac{\cos(|\vec{x}| \sqrt{b\omega^2 + a})}{|\vec{x}|} + c(i\omega + a) \times \right. \\ &\times \left. \int_{R^2} \frac{\cos\left(\sqrt{(x_1 - x'_1)^2 + (x_2 - x'_2)^2 + x_3^2} \sqrt{b\omega^2 + a}\right)}{\sqrt{(x_1 - x'_1)^2 + (x_2 - x'_2)^2 + x_3^2}} \times \right. \\ &\times \left. \tilde{\varepsilon}(x'_1, x'_2, 0, \omega) dx'_1 dx'_2. \right. \end{aligned} \quad (11)$$

Полагая в (11) $x_3 = 0$ и решая полученное уравнение с помощью преобразования Ханкеля, находим

$$\tilde{\varepsilon}(x'_1, x'_2, 0, \omega) = \int_0^{\infty} \frac{\rho J_0\left(\rho \sqrt{(x'_1)^2 + (x'_2)^2}\right)}{2\pi \sqrt{\rho^2 - (b\omega^2 + a)} - c(i\omega + a)} d\rho. \quad (12)$$

После подстановки полученного решения в (11) аналитически записываем решение уравнения (9):

$$\tilde{\varepsilon}(\vec{x}, \omega) = \frac{1}{(2\pi)^2} \left\{ \frac{\cos(|\vec{x}| \sqrt{b\omega^2 + a})}{|\vec{x}|} + c(i\omega + a) \times \right.$$

$$\times \int_{R^2} \int \frac{\cos \left(\sqrt{(x_1 - x_1')^2 + (x_2 - x_2')^2 + x_3^2} \sqrt{b\omega^2 + a} \right)}{\sqrt{(x_1 - x_1')^2 + (x_2 - x_2')^2 + x_3^2}} \times$$

$$\times \left[\int_0^\infty \frac{\rho J_0 \left(\rho \sqrt{(x_1')^2 + (x_2')^2} \right) d\rho}{2\pi \sqrt{\rho^2 - (b\omega^2 + a) - c(t\omega + \alpha)}} \right] dx_1 dx_2. \quad (13)$$

Фундаментальное решение уравнения (6) получается в результате применения к (13) обратного преобразования Фурье и использования равенства (7):

$$E_{\Phi}(\vec{x}, t) = e^{-\frac{\sigma_c}{2\epsilon\epsilon_0} F_{\omega}^{-1} \{ \tilde{\epsilon}, \vec{x}, \omega \}}. \quad (14)$$

Конструкция решения позволяет исследовать влияние неоднородностей рассматриваемых мембран, которые отражены в решении интегралом по соответствующей поверхности, учитывающей геометрию мембраны. В дальнейшем это может привести к установлению связи между морфологической структурой и функциональными свойствами различных образований из нервных элементов. В частности, этот метод предполагает использовать при рассмотрении нейронных сетей и определять возможность синтеза нейронных сетей с заданными свойствами.

Анализ полученного решения и сравнение его с физиологическими данными позволят оценить значение пассивных свойств нервной ткани для наблюдаемых в ней электрических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амосов И. М. Моделирование мышления и психики. Киев, «Наукова думка», 1965. 304 с.
2. Физиология высшей нервной деятельности, ч. 1-я. М., «Наука», 1970. 632 с.
3. Зозуля Ю. И., Марченко С. Ф., Червов В. Г. Модель информационных процессов в нервной ткани.— В кн.: Модели структурно-функциональной организации биосистем. М., 1972, с. 157—162.
4. Либерман Е. А., Чайлахян Л. Н. Две основные концепции о природе биопотенциалов нервных и мышечных волокон.— В сб.: Тр. МОИП. Физико-химические основы биопотенциалов. Т. 9. М., «Наука», 1964, с. 55—73.
5. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. М., «Наука», 1971. 512 с.
6. Мэтьюз Дж., Уоркер Р. Математические методы физики. М., Атомиздат, 1972. 399 с.

УДК 62.506.2

О. А. КОЛЕСНИКОВ, С. Ф. МАРЧЕНКО, инженеры

К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В НЕРВНОЙ ТКАНИ. СООБЩЕНИЕ II

В работе [1] рассмотрены некоторые вопросы моделирования нервной ткани (НТ) и поставлена задача моделирования электрического поля в НТ на основании уравнений Максвелла.

В такой постановке задача решается в два этапа: ищется фундаментальное решение линейного дифференциального оператора

$$T = \left\{ \Delta - \mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \mu\mu_0\sigma [S(\vec{x})] \right\}, \quad (1)$$

отражающего пассивные свойства изучаемой среды (НТ), и описываются специфические свойства НТ, которые моделируются введением в рассмотрение источников сторонних токов.

В предлагаемой работе сделана попытка построить такой вид моделей источников сторонних токов, который был бы удобен для исследования на данном уровне разрешения. Выбрана интегральная форма представления необходимых зависимостей, которая позволяет более наглядно рассматривать динамические свойства объекта, а также аппроксимировать сложные зависимости более простыми при использовании полученной модели для решения конкретных задач.

До сих пор наиболее точное описание экспериментальных данных электрохимических процессов в мембранах нервных волокон получается при использовании известной модели Ходжкина — Хаксли, построенной по результатам опытов на аксонах кальмара [2—5]:

$$I_m = C \frac{dV}{dt} + \bar{g}_{Na} m^3 h (V - V_{Na}) + \bar{g}_K n^4 (V - V_K) + g_l (V - V_l); \quad (2a)$$

$$\frac{dm}{dt} = \alpha_m (1 - m) - \beta_m m;$$

$$\frac{dh}{dt} = \alpha_h (1 - h) - \beta_h h; \quad (2б)$$

$$\frac{dn}{dt} = \alpha_n (1 - n) - \beta_n n,$$

где V — мембранная разность потенциалов;
 V_{Na}, V_K, V_l — равновесные разности потенциалов для ионов участвующих в образовании мембранного тока
 $\bar{g}_{Na}, \bar{g}_K, g_l$ — соответствующие максимальные ионные проводимости;

m — переменная натриевой активации;

h — переменная натриевой инактивации;

n — переменная калиевой активации;

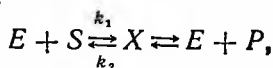
$\alpha_m, \alpha_h, \alpha_n; \beta_m, \beta_h, \beta_n$ — константы скоростей изменения активации и инактивации, определенным образом зависящих от мембранного потенциала;

I_m — плотность тока, вызываемого изменением напряженности электрического поля в данной точке мембраны.

Рассмотрим эту модель на основании изложенного в [1] методологического приема. Модель (2a)—(2б) описывает процесс изменения во времени проводимости мембраны по отношению к ионам Na^+ , K^+ и является моделью электрохимических про-

цессов на ионном уровне. Однако динамика ионных потоков в свою очередь описывается системой линейных дифференциальных уравнений для так называемых переменных активации m , n и инактивации h . Согласно интерпретации Ходжкина, эти переменные являются вероятностями того, что некоторые гипотетические заряженные частицы находятся вблизи данного участка мембраны. Обосновать эту гипотезу с точки зрения статистической физики очень трудно, так как при изучении полиэлектролитов, в которых, помимо интересующих нас веществ, присутствуют еще сотни других веществ и ферментов, пришлось бы учитывать кинетику реакций, катализируемых многочисленными ферментами.

В простейшем случае механизм ферментативного катализа представляется схемой



где E — активный центр фермента;

S — субстрат;

X — промежуточное соединение или комплекс фермент-субстрат;

P — продукт;

k_1, k_2 — константы скоростей химических реакций.

Кинетические уравнения, описывающие этот процесс, сложны и в общем случае не решаются, однако при объяснении происхождения биопотенциалов этот механизм исключить невозможно. Подобный подход описан в работе [6]. Нельзя также забывать о ярко выраженных сорбционных свойствах клеточных структур. В связи с этим интересно отметить, что уравнения (2б) подобны уравнению кинетики сорбции [7]

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \gamma^-(u - y), \quad (3)$$

Где $a(x, t)$ — количество сорбированного вещества в данном объеме сорбента;

$u(x, t)$ — концентрация вещества, находящегося в порах сорбента;

y — концентрация вещества, находящегося в равновесии с его сорбированным количеством;

γ^- — кинетический коэффициент.

Характеристика сорбента задается уравнением $a = f(y)$ или изотермой сорбции. Если положить $\gamma = 1$, $u = a_N$,

$$f(y) = \frac{y}{\alpha_N + \beta_N},$$

то, рассматривая $a(x, t)$ как одну из переменных m, h, n в уравнениях (2б), из (3) получаем соотношение

$$\frac{dN}{dt} = \alpha_N - (\alpha_N + \beta_N) N, \quad (4)$$

где через N обозначена одна из переменных m , h , n . Выражение (4) в точности совпадает с (26),

Не анализируя полученные результаты, отметим, что эмпирические зависимости, найденные Ходжкиным и Хаксли, допускают аналогию с уравнениями химической кинетики. Поэтому, рассматривая их лишь как формальные зависимости, мы не противоречим фазовой и мембранной теориям.

Таким образом, модель (2а) — (2б) построена на основании некоторых усредненных характеристик процесса движения более мелких, чем ионы, частиц. Ее можно вывести из модели с более высоким уровнем разрешения. Однако ввиду отсутствия данных о более тонких процессах этот вывод получен не формально, а проверен в эксперименте путем выявления закономерностей изменения коэффициентов в дифференциальных уравнениях, взятых за основу. Из модели (2а) формально выводится уравнение для описания распространяющегося потенциала действия в гигантском аксоне кальмара. По используемой в [1] терминологии здесь имеется триада представлений с гипотетической моделью на одном из уровней.

Рассматривая ионные процессы как источники токов сторонних сил для модели электрического поля в нервной ткани, заключаем, что модель Ходжкина — Хаксли можно использовать для получения основных характеристик динамики ионных токов зависящих от напряженности электрического поля в мембране. А так как уровень разрешения модели [1] не требует дифференциальных характеристик ионных процессов, можно воспользоваться их интегральной формой. Удобный прием разделения общего мембранного тока на основные ионные составляющие. используемый Ходжкиным при описании источника тока, регулируемого изменением напряженности поля в мембране, применяется нами для моделирования других источников, что кажется естественным ввиду их общей природы.

Исходя из этих соображений, каждую компоненту стороннего тока можно представить в виде трех основных составляющих j_{Na} , j_K , j_{Cl} , отражающих прохождение через мембрану потоков ионов Na^+ , K^+ , Cl^- . Подобное разделение, обусловленное свойствами реально наблюдаемых процессов, облегчает моделирование и, возможно, позволит в дальнейшем учитывать влияние различных фармакологических веществ на биоэлектрическую активность нервной ткани. Кроме того, всегда имеется возможность дополнить любой источник другими ионными составляющими.

Введем следующую индексацию: r — индекс источника тока; i — индекс иона. Пусть r и i принимают значения

$$i = \begin{cases} 1 & \text{для } Na^+, \\ 2 & \text{для } K^+, \\ 3 & \text{для } Cl^-; \end{cases}$$

$$r = \begin{cases} 1 & \text{для импульсного источника,} \\ 2 & \text{для синаптического источника,} \\ 3 & \text{для пейсмекерного источника,} \\ 4 & \text{для рецепторного источника.} \end{cases}$$

Тогда выражение для $\vec{j}_{cr}(x, t)$ [8] можно записать в виде

$$\vec{j}_{cr}(x, t) = \vec{n}_S(x) \delta^* [S(x)] \sum_{r=1}^4 \sum_{i=1}^3 \vec{j}_{ri}(x, t), \quad (5)$$

где $\vec{j}_{ri}(x, t)$ — i -я компонента r -го источника тока. Изменение \vec{j}_{ri} во времени рассматривается как динамический процесс с нелинейными характеристиками. Это позволяет избежать противоречивых гипотез о механизмах электрохимических процессов и непосредственно использовать результаты экспериментов.

Изученные ранее для импульсного источника процессы активации и инактивации [2—4] и предположение о наличии подобных явлений у пейсмекерного источника [9] отражены в предлагаемой модели в виде быстрой и медленной составляющих процессов изменения плотности соответствующих токов. Статические характеристики этих источников учитывают регенеративные свойства определенных участков мембран. Выделение быстрых и медленных процессов в работе синаптического и рецепторного источников, наряду с удобством аппроксимации функций влияния более простыми зависимостями, дает возможность учитывать также адаптивные свойства этих источников. В связи с этим выражение для \vec{j}_{ri} можно записать в виде

$$\begin{aligned} \vec{j}_{ri} = & \int_{-\infty}^t K_{ri} (E_{n_S}^+, t - t') \Phi_{ri} [Q_r(t'), (E_{n_S}^- - E_i)] \times \\ & \times \int_{-\infty}^{t'} G_{ri} (E_{n_S}^+, t' - t'') \Psi_{ri} [Q_r(t''), (E_{n_S}^- - E_i)] dt'' dt', \quad (6) \end{aligned}$$

где K_{ri} — динамические характеристики быстрых процессов;
 Φ_{ri} — функции, характеризующие статику быстрых процессов;
 G_{ri} — динамические характеристики медленных процессов;
 Ψ_{ri} — статические характеристики медленных процессов;
 Q_r — внешние воздействия;
 E_i — напряженность электрического поля в мембране, при которой диффузионный поток ионов i -го типа уравновешивается противоположно направленным потоком, обусловленным действием поля.

Не нарушая общности, можно представить (6) в зависимости от $V(x, t)$ — разности потенциалов между внутренней и внешней сторонами мембраны — ввиду того, что именно эта величина регистрируется в электрофизических экспериментах. Связь между

разностью потенциалов и нормальной составляющей напряженности в предположении однородности поля в мембране имеет вид

$$V(\vec{x}, t) = h(\vec{x}) E_{nS}(\vec{x}, t),$$

где $h(\vec{x})$ — толщина мембраны клетки.

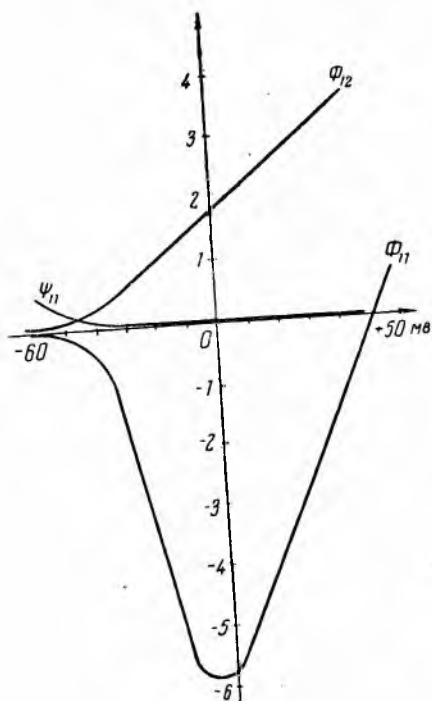


Рис. 1.

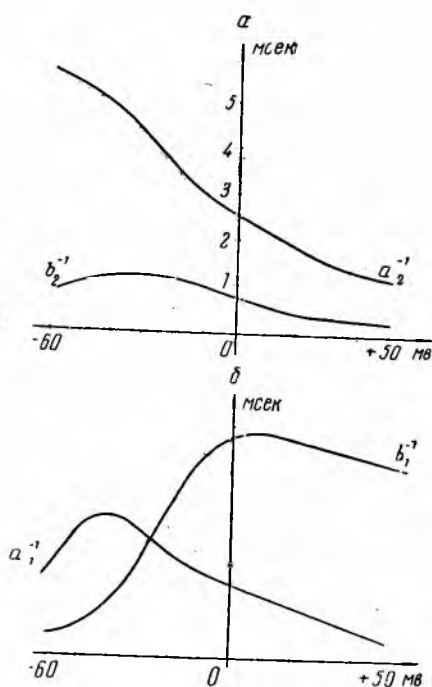


Рис. 2.

В качестве примера для основных составляющих импульсного источника построена модель

$$I_{11}(\vec{x}, t) = \int_{-\infty}^t K_{11}(V, t-t') \Phi_{11}(\vec{x}, V - V_1) \times \\ \times \int_{-\infty}^{t'} G_{11}(V, t'-t'') \Psi_{11}(\vec{x}, V - V_1) dt'' dt'; \quad (7)$$

$$I_{12}(\vec{x}, t) = \int_{-\infty}^t K_{12}(V, t-t') \Phi_{12}(\vec{x}, V - V_2) dt', \quad (8)$$

где $K_{11}(V, t-t'') = a_1(V) e^{-a_1(V)(t-t'')}$ — динамическая характеристика процесса активации натриевой компоненты; $G_{11}(V, t'-$

$-t'' = b_1(V) e^{-b_1(V)(t'-t'')} -$ динамическая характеристика процесса инактивации для Na^+ ;

$$K_{12}(V, t-t') = \frac{a_2(V) b_2(V)}{a_2(V) - b_2(V)} (e^{-a_2(V)(t-t')} - e^{-b_2(V)(t-t')})$$

— характеристика динамики калиевой активации.

Зависимость постоянных времени рассматриваемых процессов от величины мембранного потенциала иллюстрируется рис. 1. Статические характеристики процессов активации и инактивации для Na^+ и активации для K^+ представлены на рис. 2. Вольт-амперная характеристика, рассчитанная по модели (7) — (8), показана на рис. 3. Кривая, отражающая изменение плотности натриевого тока, имеет характерный участок с отрицательным наклоном, что и наблюдается в экспериментах. График калиевого тока представляется плавной, монотонно растущей кривой, что также согласуется с опытами.

Параметры модели рассчитаны на ЭВМ «Наири-С» путем аппроксимации решений уравнений (2а) — (2б) выбранными интегральными зависимостями (7) — (8). Численные значения величин, входящих в соотношения (2а) — (2б), получены из экспериментов на гигантских аксонах кальмаров [2—4].

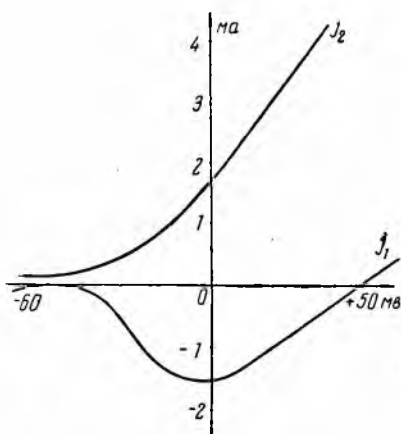


Рис. 3.

ВЫВОДЫ

Интегральная форма представления источников активности нервной ткани сохраняет характеристики электрических явлений, необходимые для описания процессов возникновения и распространения возбуждения на уровне нервной ткани. Вне рассмотрения специфических механизмов работы каждого источника их можно сравнивать между собой. Такая единая форма описания позволяет совместно изучать активные и пассивные свойства НТ с использованием фундаментального решения дифференциального оператора (1) [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников О. А., Марченко С. Ф. К моделированию электрического поля в нервной ткани. Сообщение I (см. ст. в настоящем сборнике).
2. Ходжкин А. Нервный импульс. М., «Мир», 1965, 125 с.
3. Hodgkin A. L., Huxley A. F. Currents, Carried by Sodium and Potassium Ions Through the Membrane of the Giant Axon of Loligo. — «J. Physiol.», 1952, vol. 116, p. 449—473.

4. Hodgkin A. L., Huxley A. F. The components of membrane conductance in the Giant Axon of loligo. — «J. Physiol». 1952, vol. 116 p. 473—496.
5. Ходоров Б. И. Проблема возбудимости. Л., «Медицина», 1969. 304 с.
6. Фишман С. Н., Ходоров Б. И., Волькенштейн М. В. Молекулярные механизмы изменения ионной проницаемости. — «Биофизика», 1972, т. 17, вып. 4, с. 611—617; вып. 5, с. 794—800.
7. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М., «Наука», 1972. 735 с.
8. Зозуля Ю. И., Марченко С. Ф., Червов В. Г. Модель информационных процессов в нервной ткани. — В кн.: Модели структурно функциональной организации биосистем. М., 1972, с. 157—162.
9. Соколов Е. Н. Механизмы памяти. Изд-во Моск. ун-та, 1969. 176 с.

УДК 62.506.2.

В. А. БАХТИГОЗИН, инж

ОБРАБОТКА ЗРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ В БИОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Во многих областях науки и техники все чаще информации об исследуемом объекте извлекается посредством анализа его изображения. При этом анализ должен осуществляться автоматически, без участия человека. Это позволит повысить скорости обработки данных и точность полученных результатов. В связи с необходимостью построения сложных технических систем, оптимальным образом реализующих автоматический анализ изображений, требуется подробно изучить методы переработки зрительной информации в биологических системах, с помощью которых подобные задачи решаются очень точно.

Постановка задачи

Чтобы определить принципы построения многослойной системы зрительного анализатора животных, исследуем некоторые особенности ее элементов, накладывающие существенные ограничения на работу всей системы.

1. Зрительные изображения являются полезными сигналами и поступают на вход зрительного анализатора на фоне шумов. Поэтому обработку зрительных сигналов в биологических опико-сенсорных системах следует рассматривать как оптимальную фильтрацию, при которой выделяются полезные сигналы и подавляются шумы. Функцию оптимального фильтра в зрительном анализаторе выполняют многослойные нейронные сети, которые в связи с возложенной на них задачей должны сочетать в себе интегральные и дифференциальные свойства.

2. Фильтрующие возможности многослойных нейронных сетей в значительной мере ограничены относительно малым количеством слоев тормозных клеток. Информация от слоя к слою передается в основном клетками с возбуждающими связями.

3. Рецептивные поля слоев нейронов зрительного анализатора имеют ограниченные размеры. Области нейронов промежуточных слоев, связанных с нейронами последующих слоев, также ограничены.

4. Реальные входные изображения зрительной системы обладают конечными размерами и ограниченной полосой частот собственного спектра.

5. Биологические системы зрительного анализатора обрабатывают только положительные сигналы. На входе системы — это распределение интенсивности света, а в каналах связи — средняя частота импульсов нейронов. Частота импульсов в каналах связи ограничена снизу пороговыми свойствами выходных нейронов.

Перечисленные ограничения имеют место и при построении технических, например, оптических систем автоматического анализа изображений. Такие оптические системы прежде всего фильтруют поступающее на вход изображение. Накапливание полезного сигнала и декорреляция помех в системе осуществляются элементами, обладающими дифференциальными и интегральными свойствами. Признаки входного изображения в реальных оптических системах выделяются в самостоятельных каналах системы. Задача о распознавании сложного объекта в целом решается с помощью набора фильтров отдельных свойств.

В оптических системах затруднена реализация отрицательных компонент дифференцирующих элементов системы. Как и в зрительной системе, входные сигналы оптической системы представляются собой конечных размеров изображения реальных объектов с ограниченной полосой частот собственного спектра. Подобно зрительному анализатору, оптическая система анализа изображений использует на входе системы и в каналах связи только положительные сигналы.

Математическая модель процессов обработки сигналов в зрительном анализаторе

Чтобы описать слоистую структуру нейронной сети зрительного анализатора, можно применить непрерывную модель, в которой зрительный анализатор рассматривается как непрерывная вычислительная среда, обрабатывающая поступающие на вход системы зрительные сигналы $I_{вх}(\vec{x}, t)$ и вычисляющая выходные сигналы: подпороговую и надпороговую реакции нейронной среды — $P(\vec{x}, t)$ и $Q(\vec{x}, t)$ [1].

Зрительный анализатор представляется системой уравнений

$$P_i(\vec{x}, t) = \sum_{i=1}^l \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t G_{ik}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') Q_k(\vec{x}, t') dt' d\vec{x}' + \delta_{il} \int_{-\infty}^t K_p(\vec{x}, t, t') I(\vec{x}, t') dt'; \quad (1)$$

$$Q_k(\vec{x}, t) = P_k(\vec{x}, t) \{ [P_k(\vec{x}, t) - c(\vec{x}, t)] \}. \quad (2)$$

Индекс $i = 1$ относится к слою рецепторов; остальным слоям присвоены индексы 2, 3, ..., L .

Подставляя (2) в (1), получаем

$$P_i(\vec{x}, t) = \sum_{i=1}^L \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t G_{ik}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') \{ [P_k(\vec{x}', t') - c(\vec{x}', t')] \} \times \\ \times P_k(\vec{x}', t') dt' d\vec{x}' + \delta_{il} \int_{-\infty}^t K_p(\vec{x}, t, t') I(\vec{x}', t') dt', \quad (3)$$

где $c(\vec{x}, t)$ — порог генерирования импульсов в нейронной среде;

$G_{ik}(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$ — функция влияния нейронной сети, характеризующая связи между слоями нервных клеток;

δ_{il} — символ Кронекера;

$K_p(\vec{x}, t, t')$ — динамическая характеристика реакции непрерывной среды на внешнее воздействие.

Основным функциональным элементом непрерывной вычислительной среды в зрительном анализаторе является рецептивное поле, вычисляющее некоторый параметр входного сигнала. Комплексные параметры входных сигналов вычисляются сложными рецептивными полями, составленными из простых путем их параллельного или последовательного соединения.

Математическая модель рецептивного поля связывает реакцию выходного нейрона рецептивного поля с входными сигналами поступающими на рецепторы. Подпороговая реакция рецептивного поля, выходной нейрон которого принадлежит j -му слою нейронов, описывается интегральным преобразованием входного сигнала $I(\vec{x}, t)$ с функцией влияния $G_j(\vec{x}, t)$:

$$P_j(\vec{x}, t) = \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t G_j(\vec{x}, \vec{x}', t, t') I(\vec{x}', t') d\vec{x}' dt'. \quad (4)$$

Функция влияния интегрального преобразования (4) определяется функциями влияния интегральных преобразований, осуществляемых рецептивными полями сетчатки, из которых формируется сложное рецептивное поле, а также зависит от способа объединения простых рецептивных полей в сложные.

Подпороговую реакцию простых рецептивных полей сетчатки можно получить как результат интегрального преобразования сигнала, поступающего с рецепторов:

$$P(\vec{x}''', t''') = \int_{-\infty}^{t'''} K_p(\vec{x}''', t''', t''') I(\vec{x}''', t''') dt''', \quad (5)$$

с функцией влияния $G_i(\vec{x}, t)$, связывающей слой рецепторов с первым слоем нейронов сетчатки:

$$P_i(\vec{x}', t') = \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^{t'} P(\vec{x}'', t'') G_i(\vec{x}', \vec{x}'', t', t'') d\vec{x}'' dt'' = \\ = \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^{t'} \int_{t''}^{t'} K_p(\vec{x}'', t'', t''') G_i(\vec{x}', \vec{x}'', t', t'') I(\vec{x}'', t'') d\vec{x}'' dt'' dt'''. \quad (6)$$

Подпороговую реакцию сложного рецептивного поля, полученного параллельным соединением L простых рецептивных полей (рисунок, а, б) можно описать уравнением

$$P_j^{pp}(\vec{x}, t) = \sum_{i=1}^L \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t Q_i(\vec{x}', t') G_{ji}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') d\vec{x}' dt' = \\ = \sum_{i=1}^L \iiint_{R^3} \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t \int_{t''}^t K_p(\vec{x}'', t'', t''') G_i(\vec{x}', \vec{x}'', t', t'') I[P_i(\vec{x}', t') - \\ - c_i(\vec{x}', t')] I(\vec{x}'', t''') G_{ji}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') d\vec{x}' d\vec{x}'' dt' dt'' dt'''. \quad (7)$$

Если сложное рецептивное поле получено последовательным соединением нейронных слоев (рисунок, в, г), то входной сигнал подвергается последовательно в каждом слое интегральному преобразованию с функцией влияния слоя. Реакция выходного нейрона такого рецептивного поля

$$P_N^{p,c}(\vec{x}, t) = \underbrace{\iiint_{R^3} \dots \iiint_{R^3}}_N \int_{-\infty}^t \int_{t'}^t dt' \dots \int_{t^{N-1}}^t dt^{N-1} K_p(\vec{x}^N, t^N, t^{N+1}) \times \\ \times G_1(\vec{x}^{N-1}, \vec{x}^N, t^{N-1}, t^N) G_{21}(\vec{x}^{N-2}, \vec{x}^{N-1}, t^{N-2}, t^{N-1}) I[P_1 \times \\ \times (\vec{x}^{N-1}, t^{N-1}) - c_1(\vec{x}^{N-1}, t^{N-1})] \dots G_{NN-1}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') I[P_{N-1} \times \\ \times (\vec{x}', t') - c_{N-1}(\vec{x}', t')] I(\vec{x}^N, t^{N+1}) dt^N d\vec{x}^N \dots d\vec{x}', \quad (8)$$

где N — число нейронных слоев сложного рецептивного поля.

В общем случае, когда выходной нейрон объединяет комбинацию параллельно-последовательно соединенных нейронных слоев (рисунок, д, е), сложное рецептивное поле описывается уравнением

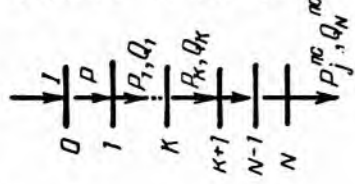
$$P_N^{p,n}(\vec{x}, t) = \sum_{i=1}^L \iiint_{R^3} \dots \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t \int_{t'}^t dt' \dots \int_{t^{N-1}}^t dt^{N-1} K_p \times \\ \times (\vec{x}^N, t^N, t^{N+1}) G_1^i(\vec{x}^{N-1}, \vec{x}^N, t^{N-1}, t^N) G_{21}^i(\vec{x}^{N-2}, \vec{x}^{N-1}, t^{N-2}, \\ t^{N-1}) I[P_1(\vec{x}^{N-1}, t^{N-1}) - c_1(\vec{x}^{N-1}, t^{N-1})] \dots G_{NN-1}^i(\vec{x}, \vec{x}', t, t') \times \\ \times I[P_{N-1}(\vec{x}', t') - c_{N-1}(\vec{x}', t')] I(\vec{x}^N, t^{N+1}) dt^N d\vec{x}^N \dots d\vec{x}', \quad (9)$$

где i — индекс параллельного канала ($i = 1, 2, \dots, L$);

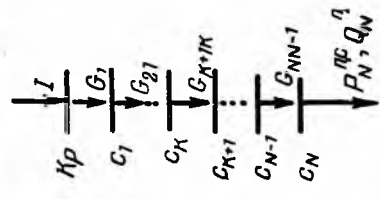
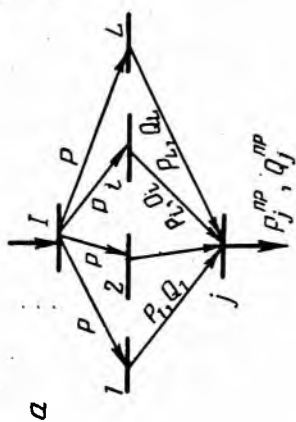
N_i — число последовательных слоев в каждом параллельном канале.

\bar{x}^{N+1}, t^{N+1}
 \bar{x}^N, t^N
 \bar{x}^{N-1}, t^{N-1}
 \bar{x}^{N-K}, t^{N-K}
 $\bar{x}^{N-K-1}, t^{N-K-1}$
 \bar{x}^1, t^1
 \bar{x}, t

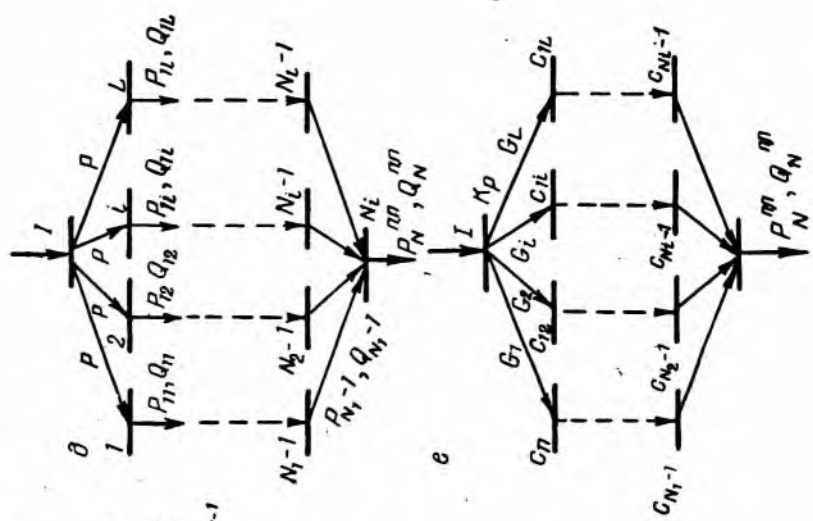
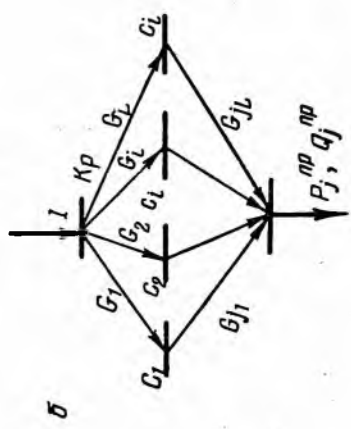
6



\bar{x}^m, t^m
 \bar{x}^n, t^n
 \bar{x}^1, t^1
 \bar{x}, t



8



e

Математическое описание работы зрительного анализатора в ряде случаев можно упростить, принимая входные сигналы неизменяющимися во времени и рассматривая нейронные сети и слой рецепторов как однородную двумерную среду. Для такой однородной среды с линейными безынерционными связями между слоями и $K_p = 1$ уравнения (4), (7) — (9) принимают вид

$$P_I(\vec{x}) = \iint_{R^2} G_I(\vec{x} - \vec{x}') I(\vec{x}') d\vec{x}'; \quad (10)$$

$$P_I^{np}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^L \iint_{R^2} \iint_{R^2} G_i(\vec{x}' - \vec{x}'') G_{ji}(\vec{x} - \vec{x}') 1[|P_i(\vec{x}') - c_i|] \times \\ \times I(\vec{x}'') d\vec{x}' d\vec{x}'' = \iint_{R^2} \left\{ \sum_{i=1}^L \iint_{R^2} G_i(\vec{x}' - \vec{x}'') G_{ji}(\vec{x} - \vec{x}') 1[|P_i(\vec{x}') - c_i|] \right\} \times \\ \times I(\vec{x}'') d\vec{x}' d\vec{x}''; \quad (11)$$

$$P_N^{n,c}(\vec{x}) = \underbrace{\iint_{R^2} \left\{ \iint_{R^2} \dots \iint_{R^2} G_1(\vec{x}^{N-1} - \vec{x}^N) G_{21}(\vec{x}^{N-2} - \vec{x}^{N-1}) \right\}}_{N-1} \times \\ \times 1[|P_1(\vec{x}^{N-1}) - c_1|] \times \dots \times G_{NN-1}(\vec{x} - \vec{x}') \times \\ \times 1[|P_{N-1}(\vec{x}') - c_{N-1}|] \underbrace{d\vec{x}^{N-1} \dots d\vec{x}'}_{N-1} I(\vec{x}^N) d\vec{x}^N; \quad (12)$$

$$P_N^{n,n}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^L \underbrace{\iint_{R^2} \dots \iint_{R^2} G_1^i(\vec{x}^{N-1} - \vec{x}^N) G_{21}^i(\vec{x}^{N-2} - \vec{x}^{N-1})}_{N_i} \times \\ \times 1[|P_1(\vec{x}^{N-1}) - c_1|] \times \dots \times G_{NN-1}^i(\vec{x} - \vec{x}') 1[|P_{N-1}(\vec{x}') - c_{N-1}|] \times \\ \times I(\vec{x}^N) \underbrace{d\vec{x}^N \dots d\vec{x}'}_{N_i} = \iint_{R^2} \left\{ \sum_{i=1}^L \iint_{R^2} \dots \iint_{R^2} G_1^i(\vec{x}^{N-1} - \vec{x}^N) G_{21}^i(\vec{x}^{N-2} - \vec{x}^{N-1}) \right. \\ \left. - \vec{x}^{N-1}) 1[|P_1(\vec{x}^{N-1}) - c_1|] \times \dots \times \right. \\ \left. \times G_{NN-1}^i(\vec{x} - \vec{x}') 1[|P_{N-1}(\vec{x}') - c_{N-1}|] \underbrace{d\vec{x}^{N-1} \dots d\vec{x}'}_{N_i-1} \right\} I(\vec{x}^N) d\vec{x}^N. \quad (13)$$

Сравнение соотношений (11) — (13) с уравнением (10) позволяет записать выражение для функции влияния сложного рецептивного поля через функции влияния связей между соседними слоями нейронов. В случае трех способов построения сложного рецептивного поля

$$G_I^{np}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^L \iint_{R^2} G_{ji}(\vec{x} - \vec{x}') 1[|P_i(\vec{x}') - c_i|] G_i(\vec{x}' - \vec{x}'') d\vec{x}'; \quad (14)$$

$$G_N^{n,c}(\vec{x}) = \underbrace{\iint_{R^2} \dots \iint_{R^2}}_{N-1} G_1(\vec{x}^{N-1} - \vec{x}^N) G_{21}(\vec{x}^{N-2} - \vec{x}^{N-1}) \dots [P_1(\vec{x}^{N-1}) - c_1] \times \\ \times \dots \times G_{NN-1}(\vec{x} - \vec{x}') \cdot 1 [P_{N-1}(\vec{x}') - c_{N-1}] \underbrace{d\vec{x}^{N-1} \dots d\vec{x}'}_{N-1}; \quad (15)$$

$$G_N^{n,n}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^L \underbrace{\iint_{R^2} \dots \iint_{R^2}}_{N_i-1} G_1^i(\vec{x}^{N-1} - \vec{x}^N) G_{21}^i(\vec{x}^{N-2} - \vec{x}^{N-1}) \times \\ \times 1 [P_1(\vec{x}^{N-1}) - c_1] \times \dots \times G_{N_i N_i-1}(\vec{x} - \vec{x}') \times \\ \times 1 [P_{N_i-1}(\vec{x}') - c_{N_i-1}] \underbrace{d\vec{x}^{N-1} \dots d\vec{x}'}_{N_i-1}. \quad (16)$$

В оптических системах анализа изображений, аналогичных биологической системе зрительного анализатора, фильтр сложного признака входного изображения получается сочетанием оптических фильтров простых признаков. Для реальных оптических фильтров порог $c_i \rightarrow 0$ и выполняется тождество $1 [P_i(\vec{x}) - c_i] \equiv 1$. В связи с этим математическое описание работы таких фильтров имеет вид

$$P_j^{np}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^L I(\vec{x}) * G_i(\vec{x}) * G_{ji}(\vec{x}); \quad (17)$$

$$P_N^{n,c}(\vec{x}) = I(\vec{x}) * G_1(\vec{x}) * G_2(\vec{x}) * \dots * G_N(\vec{x}); \quad (18)$$

$$P_N^{n,n}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^L I(\vec{x}) * G_1^i(\vec{x}) * G_2^i(\vec{x}) * \dots * G_N^i(\vec{x}). \quad (19)$$

Запишем математическую модель обработки входного изображения в виде свертки сигнала на входе с функцией влияния оптической системы:

$$P_1(\vec{x}) = I(\vec{x}) * G_1(\vec{x}). \quad (20)$$

Функцию влияния оптического фильтра сложного признака, составленного из оптических фильтров простых признаков с помощью одного из трех способов, можно описать уравнениями

$$G_j^{np}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^L G_i(\vec{x}) * G_{ji}(\vec{x}); \quad (21)$$

$$G_j^{n,c}(\vec{x}) = G_1(\vec{x}) * G_2(\vec{x}) * \dots * G_N(\vec{x}); \quad (22)$$

$$G_j^{n,n}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^L G_1^i(\vec{x}) * G_2^i(\vec{x}) * \dots * G_N^i(\vec{x}). \quad (23)$$

Помимо выделения признаков полезного сигнала или их совокупности, зрительный анализатор как система оптимальной фильтрации должен осуществлять подавление шумов. Одни шумы поступают в систему вместе с входным изображением, другие образуются внутри сети в результате нарушений в каналах связи. Шумы обоих видов по определению могут быть рассмотрены как аддитивные по отношению к оптимальным сигналам, поступающим на вход системы и передаваемым по каналам связи:

$$I(\vec{x}, t) = S^{\text{опт}}(\vec{x}, t) + \eta(\vec{x}, t); \quad (24)$$

$$P_{k+1}^{\eta}(\vec{x}, t) = S_{k+1k}^{\text{опт}}(\vec{x}, t) + \eta_{k+1k}(\vec{x}, t), \quad (25)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots, N$.

Из условия оптимальности пространственной фильтрации по критерию правдоподобия для стационарных аддитивных шумов можно записать систему N уравнений [2], которые связывают оптимальный сигнал, идущий по каналу связи от одного слоя к другому $S_{k+1k}^{\text{опт}}(\vec{x})$, корреляционную функцию шума в этом канале связи $\text{сog } \eta_{k+1}(\vec{x})$ и функцию влияния связи между слоями $G_{k+1k}(\vec{x})$:

$$S_{k+1k}^{\text{опт}}(\vec{x}', \vec{x}) = a_{k+1k} \iiint_{R^3} G_{k+1k}(\vec{x}, \vec{x}') \text{сog } \eta_{k+1}(\vec{x}' - \vec{x}'') d\vec{x}', \quad (26)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots, N$.

Шум $\eta_{k+1}(\vec{x})$ складывается из пришедшего с других слоев $\tilde{\eta}_k(\vec{x})$ и собственного шума в канале связи между $(k+1)$ -м и k -м слоями $\eta_{k+1k}(\vec{x})$:

$$\eta_{k+1}(\vec{x}) = \tilde{\eta}_k(\vec{x}) + \eta_{k+1k}(\vec{x}). \quad (27)$$

Рассмотрим статический неоднородный вариант сети. Левую часть каждого из уравнений системы (26) можно выразить через входной оптимальный сигнал и функции влияния всех предшествующих слоев:

$$\begin{aligned} S_{k+1k}^{\text{опт}} &= \underbrace{\iiint_{R^3} \dots \iiint_{R^3}}_k K_p(\vec{x}^N) S^{\text{опт}}(\vec{x}^N) G_1(\vec{x}^{N-1}, \vec{x}^N) \times \\ &\times G_{21}(\vec{x}^{N-2}, \vec{x}^{N-1}) [S_1(\vec{x}^{N-1}) - c_1(\vec{x}^{N-1})] \times \dots G_{kk-1} \times \\ &\times (\vec{x}^{N-k}, \vec{x}^{N-k+1}) [S_{k-1}(\vec{x}^{N-k+1}) - c_{k-1}(\vec{x}^{N-k+1})] \times \\ &\times \underbrace{d\vec{x}^N \dots d\vec{x}^{N-k+1}}_k. \end{aligned} \quad (28)$$

Корреляционную функцию шума в правой части каждого из уравнений системы (26) выразим через корреляционные функции шума на входе системы, шумов всех предшествующих слоев и шума в собственном слое:

$$\begin{aligned} \eta_{k+1} = \tilde{\eta}_k + \eta_{k+1k} = & \underbrace{\int_{R^3} \dots \int_{R^3}}_k [K_p(\vec{x}^N) \eta(\vec{x}^N) + \eta_{21}(\vec{x}^{N-1})] \times \\ & \times G_1(\vec{x}^{N-1}, \vec{x}^N) G_{21}(\vec{x}^{N-2}, \vec{x}^{N-1}) [S_1(\vec{x}^{N-1}) - c_1(\vec{x}^{N-1})] \times \\ & \times \dots \times G_{kk-1}(\vec{x}^{N-k}, \vec{x}^{N-k+1}) [S_{k-1}(\vec{x}^{N-k+1}) - \\ & - c_{k-1}(\vec{x}^{N-k+1})] \underbrace{dx^N \dots dx^{N-k+1}}_k + \dots + \int_{R^3} \eta_{kk-1} \times \\ & \times (\vec{x}^{N-k+1}) G_{kk-1}(\vec{x}^{N-k}, \vec{x}^{N-k+1}) [S_{k-1}(\vec{x}^{N-k+1}) - \\ & - c_{k-1}(\vec{x}^{N-k+1})] + \eta_{k+1k}(\vec{x}^{N-k}); \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \text{сog } \eta_{k+1} = & \underbrace{\int_{R^3} \dots \int_{R^3}}_k [K_p(\vec{x}^N) \text{сog } \eta(\vec{x}^N) + \text{сog } \eta_{21}(\vec{x}^{N-1})] \times \\ & \times G_1(\vec{x}^{N-1}, \vec{x}^N) G_{21}(\vec{x}^{N-2}, \vec{x}^{N-1}) [S_1(\vec{x}^{N-1}) - c_1(\vec{x}^{N-1})] \times \\ & \times \dots \times G_{kk-1}(\vec{x}^{N-k}, \vec{x}^{N-k+1}) [S_{k-1}(\vec{x}^{N-k+1}) - \\ & - c_{k-1}(\vec{x}^{N-k+1})] \underbrace{dx^N \dots dx^{N-k+1}}_k + \dots + \int_{R^3} \text{сog } \eta_{kk-1} \times \\ & \times (\vec{x}^{N-k+1}) G_{kk-1}(\vec{x}^{N-k}, \vec{x}^{N-k+1}) [S_{k-1}(\vec{x}^{N-k+1}) - \\ & - c_{k-1}(\vec{x}^{N-k+1})] + \text{сog } \eta_{k+1k}(\vec{x}^{N-k}). \end{aligned} \quad (30)$$

После подстановки (28) и (30) в (26) число неизвестных функций влияния в системе станет равным числу уравнений. Задаваясь оптимальным сигналом, который должна выделить система анализа изображений, и корреляционными функциями шума на входе системы и шумов в каналах связи, можно решить систему уравнений относительно функций влияния нейронных слоев, образующих сложный фильтр, т. е. найти $G_1, G_{21}, G_{32}, \dots, G_{k+k1}, \dots, G_{NN-1}$.

Коррелированные шумы в системе зрительного анализатора подавляются из-за наличия в ней рецептивных полей с функциями влияния, обладающими дифференциальными свойствами. Такие рецептивные поля должны содержать связи с положительными и отрицательными весами. Отрицательные и положительные компоненты сложных рецептивных полей появляются в результате комбинирования слоев тормозных и возбуждающих нейронов, причем количество слоев тормозных нейронов очень

мало, так как в нейронной сети преобладают слои возбуждающих нейронов.

В математической модели зрительного анализатора принадлежность слоя к возбуждающему или тормозному типам обозначим множителем A :

$$G_{k+1k} = A \tilde{G}_{k+1k}, \quad (31)$$

который может принимать одно из двух значений: $+1$ для слоя возбуждающих нейронов и -1 для слоя тормозных нейронов:

$$A \in \{+1; -1\}. \quad (32)$$

В технических системах анализа изображений борьбу с шумами осуществляют дифференциальные фильтры. При построении систем с использованием только элементов оптики сильно затруднена реализация отрицательных компонент дифференциального фильтра. Большими возможностями пространственного дифференцирования помех обладают комбинированные оптико-электронные системы.

Не менее существенное ограничение, накладываемое на работу системы зрительного анализатора, состоит в следующем. Рецептивным полям и областям, с которых нейроны одного слоя конвергируют на выходной нейрон другого, свойственно ограничение, связанное с тем, что функция влияния биологического фильтра имеет конечную полосу частот пропускания, так как моделирует распределение дискретных связей. Аналогично в оптической системе реальный оптический фильтр имеет ограниченное разрешение и конечные размеры.

В математической модели первое ограничение сводится к умножению функции влияния на обобщенную функцию медленного роста $\Psi(\vec{x})$:

$$\tilde{G}_{k+1k}(\vec{x}) = \tilde{G}_{k+1k}(\vec{x}) \Psi(\vec{x}). \quad (33)$$

Второе ограничение учитывается путем умножения спектра функции влияния на обобщенную функцию медленного роста $\varphi(\vec{f})$:

$$g_{k+1k}(\vec{f}) = \tilde{g}_{k+1k}(\vec{f}) \varphi(\vec{f}). \quad (34)$$

Замечательным свойством класса обобщенных функций медленного роста является то, что операция преобразования Фурье не выходит за пределы этого класса [3]. Поэтому функция влияния фильтра представляет собой результат умножения функции произвольного вида $\tilde{G}_{k+1k}(\vec{x})$ на ограничивающую функцию $\Psi(\vec{x})$ и свертки с ограниченной функцией $\Phi(\vec{x})$:

$$G_{k+1k}(\vec{x}) = [\tilde{G}_{k+1k}(\vec{x}) \Psi(\vec{x})] * \Phi(\vec{x}), \quad (35)$$

а спектральная характеристика фильтра ограничена обобщенной функцией медленного роста $\varphi(\vec{f})$ и размыта ограниченной функцией $\psi(\vec{f})$:

$$g_{k+1}(\vec{f}) = [g_{k+1}(\vec{f}) * \psi(\vec{f})] \varphi(\vec{f});$$

$$g(\vec{f}) = F[G(\vec{x})];$$

$$\psi(\vec{f}) = F[\psi(\vec{x})];$$

$$\varphi(\vec{f}) = F[\Phi(\vec{x})].$$
(36)

Здесь F — оператор преобразования Фурье.

ВЫВОДЫ

1. Зрительный анализатор животных представляет собой систему оптимальной фильтрации пространственных сигналов, поступающих на вход системы. Функцию оптимального фильтра в зрительном анализаторе выполняет многослойная нейронная сеть.

2. По известной схеме соединения рецепторов и нейронных слоев в сложный фильтр можно составить систему уравнений, описывающих оптимальную фильтрацию изображения в зрительном тракте. Решение такой системы даст полный набор функций влияния связей между нейронными слоями зрительного анализатора.

3. При неполных данных о структурной схеме соединения нейронных слоев необходимо исходить из требования минимального количества слоев, используемых при решении задачи оптимальной фильтрации. Такое требование реализуется в зрительном анализаторе животных и человека в процессе эволюции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зозуля Ю. И., Червов В. Г., Бугай Ю. П. Непрерывная математическая модель нейронной сети.— В сб.: Проблемы бионики. Вып. 8. Харьков, 1972, с. 93—102.
2. Башаринов А. Е. и др. Измерение радиотепловых и плазменных излучений в СВЧ диапазоне. М., «Сов. радио», 1968. 390 с.
3. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. М., «Наука», 1967. 436 с.

УДК 62.506.2

А. В. ШАТОХИН, Ю. И. ЗОЗУЛЯ, инженеры

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНТУРНЫХ И СВОДИМЫХ К НИМ ИЗОБРАЖЕНИЙ

(критический обзор)

В последние годы резко увеличился объем информации, необходимой для решения технических и научных задач. В связи с этим очень важно автоматизировать процессы обработки и ввода исходных данных в ЭВМ. Эти данные представляют собой

изображения в виде букв, графиков, чертежей, аэрофотоснимков, треков ядерных частиц, контуров хромосом; показания приборов, измеряющих электрический ток или напряжение, давление, температуру и т. п. [1—3].

Поток информации содержит много сведений о структуре изображений — телевизионных, оптических, фотографических и др. Вопросами анализа изображений занимаются техника [4—6] и физиология [7]. Изучение физиологических данных о процессах предварительной обработки зрительных сигналов в сетчатке глаза животных и человека позволяет глубже понять обнаруженные принципы преобразования визуальной информации и использовать их в процессе построения эффективных технических систем [8].

При анализе изображений особенно велико значение контуров, так как они несут значительную долю информации, необходимую для распознавания анализируемых объектов [9, 10]. Результаты проведенных исследований контурных изображений [11—19] еще не позволяют создать общую модель идеализированного изображения и классифицировать изображения по сводимости их к контурным.

При разработке математической модели контурного изображения и постановке задачи о классификации анализируемых объектов по сводимости их к контурным изображениям нами использовался математический аппарат обобщенных функций [20].

Математическая модель контурного изображения

Введем ряд исходных понятий: «изображение», «контур» («контурная линия»), «контурное изображение». Формально многоградационное черно-белое изображение определяется как действительная функция двух переменных, описывающая распределение яркости в некоторой плоскости. Контур (контурная линия) обозначает геометрический объект, вид которого определяется множеством линий на плоскости, имеющих меру нуль [20]. Контурное изображение формально определяется функцией, областью задания которой является контур (т. е. это функция, носителем которой выступает множество меры нуль). Рассмотрим идеальное контурное изображение $f_n(x, y)$. Любая функция с носителем, имеющим меру нуль, может быть представлена в виде линейной комбинации δ -функций и конечного числа m ее производных [20]. Если $S(x, y) = 0$ — уравнение контурной линии, то в общем случае идеальное контурное изображение представляется в виде

$$f_n(x, y) = \sum_{\alpha=0}^m G_\alpha D_n^\alpha \delta[S(x, y)],$$

где $\delta[\cdot]$ — функция Дирака;

D_n^α — производная порядка α по нормали \vec{n} к контурной линии;

$S(x, y)$ — R -функция, сохраняющая свой знак в отдельных областях плоскости R^2 и изменяющая его при переходе через контур $S(x, y) = 0$ [21];

C_α — коэффициент разложения при соответствующих производных.

Для удобства операций над изображениями уравнение контурной линии $S(x, y)$ можно аппроксимировать с помощью прямых линий и частей окружностей [21].

Реальные контурные изображения $f_p(x, y)$ имеют конечную «толщину» контурной линии, которая обусловлена размытием, характерным для всех реальных систем. Эту особенность реальных контурных изображений можно учесть путем регуляризации сингулярной функции $\delta[S(x, y)]$. При неоднородной регуляризации уравнение реального контурного изображения принимает вид

$$\begin{aligned} f_p(x, y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x, x', y, y') f_n(x', y') dx' dy' = \\ &= \sum_{|\alpha|=0}^m C_\alpha \iint_{R^2} \varphi(x, x', y, y') D_{x', y'}^\alpha \varphi[S(x', y')] dx' dy'. \end{aligned}$$

Приведенное соотношение представляет собой линейную комбинацию регуляризаций сингулярной функции $\delta[S(x, y)]$ и ее производных $D_{x', y'}^\alpha \delta[\cdot]$ с помощью регулярной функции $\varphi(x, x', y, y')$. В частности в технике телевидения регуляризирующая функция $\varphi(x, x', y, y')$ может описываться уравнением

$$\varphi(x, x', y, y') = ae^{-\alpha[(x-x')^2 + (y-y')^2]}.$$

Тогда контурная линия на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) представляется в виде

$$f_p(x, y) = f_n(x, y) * ae^{-\alpha(x^2 + y^2)},$$

где $*$ — знак операции свертки;

a, α — параметры светового пятна на экране ЭЛТ.

Классификация изображений, сводимых к контурным

В общем случае можно поставить задачу о сведении произвольного черно-белого изображения, описываемого обобщенной функцией $f(x, y)$, к реальному контурному изображению $f_p(x, y)$ путем его преобразования с помощью некоторого оператора A :

$$Af(x, y) = f_p(x, y).$$

В частном случае таким оператором может являться любой линейный дифференциальный оператор типа [15, 16, 22]

$$A = \sum_{t=1}^{\beta} D_{x,y}^t.$$

Задача о выделении контуров изображения решается с помощью оператора Лапласа [10]:

$$A = \Delta = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2}.$$

В целом черно-белые изображения $f(x,y)$ можно классифицировать по виду оператора A , сводящего их к контурному изображению. Таким образом, предложена математическая модель контурного изображения и способ классификации изображений, сводимых к контурным. Результаты данной работы можно использовать при синтезе эффективных технических систем обработки визуальной информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петренко А. И. Автоматический ввод графиков в ЭВМ. М., «Энергия», 1968, 423 с.
2. Автоматизация ввода письменных знаков в электронные вычислительные машины. Вильнюс. 1965, 271 с.
3. Иваницкий Т. Р., Литинская Л. П., Шихмостова В. Л. Автоматический анализ микрообъектов. М.—Л., «Энергия», 1967. 204 с.
4. Ивахненко А. Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления. Киев, «Техника», 1969. 392 с.
5. Лебедев Д. С., Цуккерман И. П. Телевидение и теория информации. М.—Л., «Энергия», 1965, 219 с.
6. Иконика. Пространственная фильтрация изображений. Фотографические системы. М., «Наука», 1970. 136 с.
7. Пинчук Л. Е. Биоэлектрические процессы, периферические механизмы преобразования пространственных сигналов в анализаторах. Автореф. канд. дис. Новосибирск, 1969. 141 с.
8. Нефедов Ю. И., Червов В. Г., Бугай Ю. П. Исследование возможности изотропного выделения контуров изображений в телевизионной передающей системе.—В сб.: Радиотехника. Вып. 11. Харьков, 1969, с. 11—19.
9. Глезер В. Д. Цуккерман И. И. Информация и зрение. М., Изд-во АН СССР, 1961. 214 с.
10. Kovaszny L. S., Joseph H. M. Image Processing. — PIRE, 1955, May, vol 43, p. 560.
11. Лебедев Д. Г. Повышение помехоустойчивости выделения в системах обобщенного квантования изображений.—В кн.: Иконика. М., «Наука», 1968, с. 88—93.
12. Маркович М. Г., Ольховский Л. А., Цуккерман И. И. Электронно-оптическая фильтрация контуров.—«Техника кино и телевидения», 1965, № 7, с. 4—15.
13. Вайнштейн Г. Г. Оценка эффективности линейного предискажения при передаче координатных сигналов.—В кн.: Иконика. М., «Наука», 1968, с. 8—14.
14. Романов В. П. Интегральные методы опознания.—В кн.: Читающие устройства. М., ВИНТИ АН СССР, 1962, с. 18—26.
15. Романов В. П. Преобразование изображений в одной модели непрерывной нейронной сети.—НТИ, 1963, № 2, с. 36—41.

16. Романов В. П. Система распознавания, использующая анизотропную фильтрацию изображений.— В кн.: Автоматическое чтение текста. М. ВИНТИ АН СССР, 1967, с. 15—29.
17. Шейфис И. И. Способы улучшения качественных показателей телевизионных центров. М., «Связь», 1967. 140 с.
18. Лебедев Д. Г., Лебедев Д. С. Дискретизация изображений посредством выделения и квантования контуров.— «Изв. АН СССР. Техническая кибернетика», 1965, № 1, с. 140—146.
19. Романов В. П., Савин А. А. О структурно-лингвистическом методе опознания изображения.— В кн.: Структурные методы опознания автоматическое чтение. М., ВИНТИ АН СССР, 1970, с. 5—20.
20. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. М., «Наука» 1971. 512 с.
21. Рвачев В. Л. Геометрические приложения алгебры логики. Киев «Наукова думка», 1965. 104 с.
22. Бугай Ю. П. Исследование нейроподобных элементов и систем как устройств первичной переработки информации. Автореф. канд. дис. Харькoв, 1968, 27 с.

УДК 62.506.2

Е. П. ПУТЯТИН, канд. техн. наук,
М. С. ТРЕПЕТИН, ст. науч. сотр.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ НОРМАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ. СООБЩЕНИЕ II

Настоящая статья является продолжением исследования [1].

Параллельная и последовательная нормализация

Введем необходимые понятия (не определяемые здесь и далее основные понятия теории групп изложены в монографии [2]).

Пусть M — некоторое множество изображений (называемых далее эталонами), G — некоторая группа. Множество $\mu = M \cdot G$ всех пар $B \cdot g \in M \cdot G$, $B \in M$, $g \in G$ называется множеством изображений.

Эталонные изображения вида $B \cdot e$, где e — единица группы G , отождествляются с самими эталонами, т. е. полагается $B \cdot e = B$ для всех $B \in M$. Действие группы G на множество μ задается формулой

$$(B \cdot g) f = B \cdot gf \quad (1)$$

для всех $B \in M$, $g, f \in G$.

Определение 1. Пусть G' — подгруппа группы G ; F' — оператор вида $\mu \rightarrow \mu$. Если $F'(B \cdot g') = B$ для всякого $g' \in G'$, то оператор F' называется частичным нормализатором множества μ , соответствующим подгруппе G' .

В частности, $F'(B \cdot e) = B \cdot e = B$ для любого $B \in M$. Отсюда вытекает что всякий частичный нормализатор, соответствующий подгруппе G' , действует идемпотентно на множестве $M \cdot G'$, т. е.

$$F'(F'(B \cdot g)) = F'(B \cdot g) \quad (2)$$

для всех $B \cdot g \in M \cdot G'$. Естественно считать, что условие (2) выполняется также для всех $B \cdot g \in M \cdot G'$. Далее предполагается, что каждый оператор частичной нормализации является идемпотентом. Если $G' = G$, то оператор $F = F'$ называется нормализатором (полным нормализатором) множества μ . Частичный нормализатор F' , соответствующий подгруппе G' группы G , является нормализатором множества $M \cdot G'$. Поэтому в дальнейшем F' будем называть (коротко) нормализатором множества $M \cdot G'$.

Действие произвольного нормализатора F' множества $M \cdot G'$ определяется отображением Φ' вида $M \cdot G \rightarrow G'$, которое удовлетворяет условию

$$F'(B \cdot g) = B \cdot g \Phi'(B \cdot g). \quad (3)$$

Задача о приведении произвольного изображения к эталонному виду формулирована в работе [1].

Пусть заданы некоторое множество изображений $\mu = M \cdot G$, нормализатор F и отображение Φ , удовлетворяющие при всяком $B \cdot g \in \mu$ условию

$$B = B \cdot e = F(B \cdot g) = B \cdot g \Phi(B \cdot g). \quad (4)$$

Требуется описать процедуру нормализации изображений в случае, когда группа является произведением своих подгрупп. Для этого необходимо ввести

Определение 2. Будем считать, что процедура нормализации изображения $B \cdot g$ параллельна, если она осуществляется однократным применением оператора F нормализации для изображения $B \cdot g$. Если эта процедура выполняется в несколько приемов, то такая нормализация называется последовательной. В последнем случае принимаем, что нормализатор F — суперпозиция нормализаторов F_i , выполняемых на каждом шаге.

Параллельная нормализация схематически показана на рис. 1, последовательная — на рис. 2.

Нормализацию изображения $B \cdot g \in M$, определяемую равенством (4), можно рассматривать как параллельную и последовательную.

Пусть группа G , действующая в μ , разлагается в произведение своих подгрупп G_1, G_2, \dots, G_n . Тогда всякий элемент можно представить в виде произведения $g_1 g_2 \dots g_n$, $g_i \in G_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$).

Если нормализация $B \cdot g \rightarrow B$ параллельна, то отображение Φ определяет все параметры преобразования g . Соответствующая параллельной нормализации схема (рис. 1) работает следующим образом. Анализатор 1 вычисляет параметры группы преобразований, т. е. реализует отображение $\Phi: \mu \rightarrow G$. Вычисленные в этом блоке параметры поступают в преобразователь 2, где осуществляется нормализация. На выход преобразователя 2 подается эталонное изображение $B = F(B \cdot g)$.

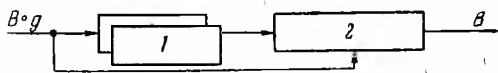


Рис. 1.

Если же нормализация $B \cdot g \rightarrow B$ последовательна, то отображение Φ является произведением отображений $\Phi_r: \mu \rightarrow G_r$, определяющих для всякого $r = 1, 2, \dots, n$ параметры r -й компоненты $g_r \in C_r$ разложения элемента g в группе G . В свою очередь каждому отображению Φ_r на основании (3) соответствует частичный нормализатор F_r ($r = 1, 2, \dots, n$), а произведению $\Phi = \Phi_n \dots \Phi_1$ — суперпозиция нормализаторов $F_1 F_2 \dots F_n$, равная F

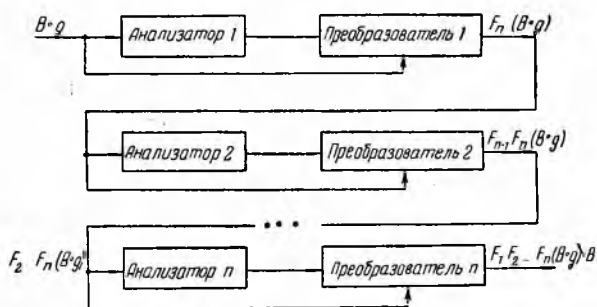


Рис. 2.

Представленная на рис. 2 схема состоит из ряда параллельных, последовательно работающих нормализаторов. На вход поступает изображение вида $B \cdot g = B \cdot g_1 g_2 \dots g_n$. Анализатор 1 определяет параметры преобразования $g_n \in G_n$. Преобразователь 1 подвергает изображение $B \cdot g$ преобразованию g_n^{-1} и приводит его к виду $F_n(B \cdot g) = B \cdot g_1 g_2 \dots g_{n-1}$. Изображение $F_n(B \cdot g)$ поступает на входы анализатора 2 и преобразователя 2. Анализатор 2 вычисляет параметры преобразования g_{n-1}^{-1} , а преобразователь 2 выдает изображение $F_{n-1} F_n(B \cdot g) = B \cdot g_1 g_2 \dots g_{n-2}$ и т. д. После n шагов на выходе n -го преобразователя P_n получим изображение $F_1 F_2 \dots F_n(B \cdot g) = F(B \cdot g) = B$.

Параллельная нормализация удобна, если число параметров группы G невелико (один, два). С увеличением числа параметров группы функционалы Φ , используемые в параллельной нормализации оказались сложными для вычислений и, главное, не универсальными. Параллельная нормализация в аффинной группе преобразований множества μ вообще невозможна. Поэтому для нормализации произвольных изображений необходимо разрабатывать схему последовательной нормализации. При этом можно увеличивать общее время нормализации и аппаратные затраты.

Рассмотрим различные разложения аффинной группы преобразований в произведение своих подгрупп.

Известно [3, с. 111], что группу T можно представить в виде произведения группы $G = \{(a_{13}, a_{23})\}$ смещений по осям и группы $S = \{(a_{ij})\}$, $i, j = 1, 2$ центроаффинных преобразований. Каждую вещественную матрицу $(a_{ij}) \in S$ можно разложить в произведение

ортогональной и симметричной, а симметричную — в произведение диагональной и ортогональной [4, с. 263]. Поэтому всякая матрица S центроаффинной группы разлагается в произведение $I_1 D I_2$, где I_1, I_2 — матрицы ортогонального преобразования, D — диагональная матрица.

Найдем параметры определяющие матрицы I_1, D, I_2 в том случае, когда I_1, I_2 — матрицы чистого вращения. Обозначим последние через U_1, U_2 . Тогда

$$S = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где θ — параметры преобразования вращения U_1 ;

λ, μ — параметры диагонального преобразования D ;

φ — параметр вращения U_2 .

Матричному соотношению (4) соответствуют уравнения

$$\begin{aligned} \lambda \cos \varphi &= a_{11} \cos \theta - a_{21} \sin \theta; \\ \lambda \sin \varphi &= a_{21} \cos \theta - a_{22} \sin \theta; \\ -\mu \sin \varphi &= a_{11} \sin \theta + a_{21} \cos \theta; \\ \mu \cos \varphi &= a_{12} \sin \theta + a_{22} \cos \theta. \end{aligned}$$

Разрешая их относительно параметров λ, μ, θ и φ , получаем

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{-2(a_{11}a_{21} + a_{12}a_{22})}{a_{11}^2 + a_{12}^2 - a_{21}^2 - a_{22}^2}; \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{(2a_{11}a_{12} + a_{21}a_{22})}{a_{11}^2 + a_{21}^2 - a_{12}^2 - a_{22}^2}; \quad (6)$$

$$\lambda^2 = \frac{1}{2} (a_{12}^2 + a_{12}^2 + a_{21}^2 + a_{22}^2 + N) = \left(\frac{\Delta}{\mu} \right)^2, \quad (7)$$

$$\mu^2 = \frac{1}{2} (a_{11}^2 + a_{12}^2 + a_{21}^2 + a_{22}^2 - N);$$

$$N^2 = (a_{11}^2 + a_{12}^2 - a_{21}^2 - a_{22}^2)^2 + 4(a_{11}a_{21} + a_{12}a_{22})^2, \quad (8)$$

$$\Delta = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}.$$

Получены также другие расположения матрицы центроаффинного преобразования. Используя преобразование косо́го сдвига вдоль оси ординат Y , матрицу центроаффинных преобразований представим в виде $S = UDY$, т. е.

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & h \end{pmatrix}, \quad (9)$$

причем параметры θ, λ, μ, h однозначно определяются соотношением (9).

Разложение центроаффинной группы, в которых используются преобразования косо́го сдвига и растяжения по осям, имеют вид

$$S = DXY, S = YDU, S = XDY, S = YDX, S = XDU. \quad (10)$$

При этом параметры разложений в каждом случае будут выражаться вполне определенными формулами.

В целях технической реализации удобно применять разложение диагональной матрицы вида

$$\begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda & |0 \\ 0 & |\mu| \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{sing } \lambda & 0 \\ 0 & \text{sing } \mu \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где $\text{sing } \lambda = \pm 1$; $\text{sing } \mu = \pm 1$; $|\lambda|, |\mu| > 0$. Обозначим

$$\begin{pmatrix} \pm 1 & 0 \\ 0 & \pm 1 \end{pmatrix} = I. \quad (12)$$

В свою очередь, диагональную матрицу с положительными элементами можно представить в виде произведения двух простейших матриц P и Q :

$$\begin{pmatrix} |\lambda| & 0 \\ 0 & |\mu| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P & 0 \\ 0 & P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q, & 0 \\ 0 & \frac{1}{q} \end{pmatrix} = PQ, \quad (13)$$

$$\text{где } P = \sqrt{\lambda\mu}, \quad q = \sqrt{\frac{\lambda}{\mu}}. \quad (13)$$

Другим примером разложения произвольной диагональной матрицы является также разложение вида

$$\begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \mu \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Таким образом, аффинная группа преобразований носителя плоских изображений допускает различные разложения на подгруппы. Наиболее важны из них разложения

$$T = U_2 IPQU_1 C; \quad (15)$$

$$T = UIPQUC. \quad (16)$$

Нормализация при некоммутативных разложениях группы преобразований

Пусть, как и прежде, $\mu = M \circ G$ (M — некоторое множество эталон, G — какая-либо группа), причем условие (1) выполнено. Условимся, что

$$B \circ g = B_1 \iff B = B_1 (g = e). \quad (17)$$

Физически условие (17) очевидно, если G — группа сдвигов. Если же элементами группы G являются повороты, то G есть однопараметрическая периодическая группа. В этом случае равенство (17) справедливо с точностью до периода поворота изображения $B \circ g$.

Из (1) и (17) вытекает, что

$$B \circ g = B_1 \circ g_1 \iff B = B_1 (g = g_1). \quad (18)$$

Действительно, умножим правую часть равенства $B \circ g = B_1 \circ g_1$ на g^{-1} . Тогда в силу (17) получаем $B = B \circ e = B \circ g g^{-1} = (B \circ g) g^{-1} = (B_1 \circ g_1) g^{-1} = B_1 g_1 g^{-1}$. Отсюда $B = B_1$, $e = g_1 g^{-1}$ и $g = g_1$. Таким образом, соотношение (18) выполнено.

Пусть группа G разлагается в произведение $G_1 G_2 \dots G_n$ своих подгрупп $G_i (i = 1, 2, \dots, n)$. Докажем, что нормализатор F и отображение Φ представляются в виде суперпозиции подходящих последовательностей нормализаторов и отображений.

Обозначим $G^{(1)} = G_1$, $G^{(2)} = G_1 G_2, \dots, G^{(n)} = G_1 G_2 \dots G_n = G$. Обозначим также $M^{(r)} = M \circ G_r^{(r)}$, $r = 1, 2, \dots, n$, $M = M_0 = M$. В силу этих обозначений $M^{(n)} = M \circ G^{(n)} = M \circ G = \mu$.

Определение 3. Будем считать, что в разложении $G = G_1 G_2 \dots G_n$ элементы группы G однозначно разлагаются на множители, если для любых $g_i, f_i \in G (i = 1, 2, \dots, n)$ из $g_1 g_2 \dots g_n = f_1 f_2 \dots f_n$ следует $q_i = f_i (i = 1, 2, \dots, n)$.

Теорема 1. Пусть F — нормализатор множества $\mu = M \circ G$, а группа G — произведение некоторых своих подгрупп G_1, G_2, \dots, G_n с однозначным разложением элементов на множители. Тогда существуют последовательности $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ частичных нормализаторов и $\{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n\}$ отображений таких, что

- 1) $F_{n-k}(B \circ g) \in M^{(n-k-1)}$ для всех $k = 0, 1, \dots, n-1$, $B \circ g \in M^{(n-k)}$;
- 2) $\Phi_{n-k}(B \circ g) \in G_{n-k}$ для всех $k = 0, 1, \dots, n-1$, $B \circ g \in M^{(n-k)}$;
- 3) $F_{n-k}(B \circ g) = B \circ g \Phi_{n-k} \langle B \circ g \rangle$ для всех $B \circ g \in M^{(n-k)}$, $k = 0, 1, 2, \dots, n-1$;
- 4) $F_1 F_2 \dots F_n (B \circ g) = F (B \circ g)$ для всех $B \circ g \in M \circ G$.

Доказательство. Пусть $k = 0$ и $B \circ g \in M \circ G$.

Тогда

$$B \circ e = F (B \circ g) = B \circ g \Phi \langle B \circ g \rangle. \quad (19)$$

Отображение $\Phi^{-1} \langle B \circ g \rangle \in G$, причем каждый элемент из G можно разложить в произведение элементов $f_i \in G_i (i = 1, 2, \dots, n)$. Поэтому

$$\Phi^{-1} \langle B \circ g \rangle = f_1 f_2 \dots f_n. \quad (20)$$

Полагаем

$$\Phi_n \langle B \circ g \rangle = f_n^{-1}; \quad (21)$$

$$F_n (B \circ g) = B \circ g \Phi_n \langle B \circ g \rangle. \quad (22)$$

Тем самым условия 2), 3) теоремы 1 при $k = 0$ удовлетворяются. Покажем, что условие 1) также выполняется. Для этого заметим, что по определению нормализатора $F (B \circ g f_n^{-1}) = B \circ e$. Отсюда в силу (4)

$$B \circ e = B \circ g \Phi \langle B \circ g \rangle = F (B \circ g) = F (B \circ g f_n^{-1}) = B \circ g f_n^{-1} \Phi \langle B \circ g f_n^{-1} \rangle. \quad (23)$$

Следовательно,

$$\Phi (B \circ g) = f_n^{-1} \Phi \langle B \circ g f_n^{-1} \rangle, \quad (24)$$

и с учетом условия (20) получим

$$\begin{aligned} \Phi \langle B \circ g f_n^{-1} \rangle &= f_n \Phi \langle B \circ g \rangle = f_n (\Phi^{-1} \langle B \circ g \rangle)^{-1} = f_{n-1}^{-1} f_{n-2}^{-1} \dots f_1^{-1} = \\ &= (f_1 \dots f_{n-2} f_{n-1})^{-1}. \end{aligned} \quad (25)$$

Из (23) и (18) вытекает $g f_n^{-1} \Phi \langle B \circ g f_n^{-1} \rangle = e$ и, значит, $g f_n^{-1} = \Phi^{-1} \langle B \circ g f_n^{-1} \rangle$. Пользуясь определениями Φ_n , F_n и условием (25), выводим

$$\begin{aligned} F_n(B \circ g) &= B \circ g \Phi_n \langle B \circ g \rangle = B \circ g f_n^{-1} = B \circ \Phi^{-1} \langle B \circ g f_n^{-1} \rangle = \\ &= B \circ f_1 f_2 \dots f_{n-1}. \end{aligned}$$

По определению $B \circ f_1 f_2 \dots f_{n-1} \in M^{n-1}$. Таким образом, условие 1) теоремы 1 при $k=0$ выполняется.

Допустим, что для всех $h < k$ нормализаторы F_{n-k} и отображения Φ_{n-k} построены и условия 1) — 3) для них выполнены. Покажем, что на k -м шаге существуют Φ_{n-k} и F_{n-k} , которые удовлетворяют условиям 1) — 3) теоремы 1.

Пусть $B \circ g \in M^{(n-k)}$, т. е. $g = f_1 f_2 \dots f_{n-k}$, где $f_i \in G_i$. Из (4) имеем $\Phi^{-1} \langle B \circ g \rangle = g$. Положим

$$\Phi_{n-k} \langle B \circ g \rangle = f_{n-k}^{-1}; \quad (26)$$

$$F_{n-k}(B \circ g) = B \circ g \Phi_{n-k} \langle B \circ g \rangle, \quad (27)$$

где f_{n-k} — $(n-k)$ -я компонента в разложении (20) элемента $\Phi^{-1} \langle B \circ g \rangle$. Вследствие однозначности этого разложения в группе G отображения Φ_{n-k} и F_{n-k} определены корректно.

Покажем, что F_{n-k} является частичным нормализатором, соответствующим некоторой подгруппе группы G . Действительно, пусть $g \in G_{n-k}$. Очевидно, что $g = e_1 e_2 \dots e_{n-k-1} g$ (здесь $e_i = e$ — единица подгруппы G_i). Отсюда ввиду однозначности разложения в группе G следует, что g является своей собственной $(n-k)$ -й компонентой. Следовательно, по определению Φ_{n-k} (см. (26)) имеем $\Phi_{n-k} \langle B \circ g \rangle = g^{-1}$ для всякого $B \in M$. Отсюда с учетом (27) получаем $F_{n-k}(B \circ g) = B \circ g \Phi_{n-k} \langle B \circ g \rangle = B \circ g g^{-1} = B \circ e$, т. е. F_{n-k} — частичный нормализатор, соответствующий подгруппе G_{n-k} группы G .

Итак, на основании (26), (27) и условий 2) — 3) теоремы 1 на k -м шаге выполняется.

Покажем, что условие 1) также выполняется. С помощью (4) получаем

$$B \circ e = F(B \circ g) = F(B \circ g f_n^{-1}) = B \circ g f_n^{-1} \Phi \langle B \circ g f_n^{-1} \rangle. \quad (28)$$

Отсюда из (17), (18) следует $g^{-1} = \Phi \langle B \circ g \rangle = f_{n-k}^{-1} \Phi \langle B \circ g f_n^{-1} \rangle$.

Так как $g = f_1 f_2 \dots f_{n-k}$, после сокращения предыдущего равенства на f_{n-k}^{-1} получаем

$$\Phi \langle B \circ g f_{n-k}^{-1} \rangle = f_{n-k-1}^{-1} f_{n-k-2}^{-1} \dots f_1^{-1}. \quad (29)$$

Отсюда с учетом (26), (28)

$$\begin{aligned} F_{n-k}(B \circ g) &= B \circ g \Phi_{n-k} = \langle B \circ g \rangle = B \circ g f_{n-k}^{-1} = \\ &= B \circ \Phi^{-1} \langle B \circ g f_{n-k}^{-1} \rangle = B \circ f_1 f_2 \dots f_{n-k-1} \in M^{n-k-1}, \end{aligned}$$

т. е. условие 1) на k -м шаге выполняется.

Покажем справедливость условия 4) теоремы. По доказанному,

$$\begin{aligned} F_n(B \circ g) \in M^{(n-1)}, F_{n-1} F_n(B \circ g) \in M^{(n-2)}, \dots, F_{n-k+1} \times \\ \times F_{n-k+2} \dots F_n(B \circ g) \in M^{(n-k)}, F_{n-k} = F_{n-k+1} \dots F_n \times \\ \times (B \circ g) \in M^{(n-k-1)}, \dots, F_1 F_2 \dots F_n(B \circ g) \in M^{(0)} = M. \end{aligned}$$

Следовательно, $F_1 F_2 \dots F_n(B \circ g) = B \circ e = F(B \circ g)$. На основании произвольности изображения $B \circ g$ произведение $F_1 F_2 \dots F_n$ является нормализатором множества $M \circ G$. Теорема 1 доказана.

Теорема 2. Пусть нормализатор F множества $M \circ G$ — суперпозиция частичных нормализаторов F_1, F_2, \dots, F_n , множеств соответственно $M \circ G_1, \dots, M \circ G_n$, где G_i ($i=1, 2, \dots, n$) — подгруппы, группы G . Тогда $G = G_1 G_2 \dots G_n$.

Доказательство. Обозначим $\Phi_n \langle B \circ g \rangle = g_n, \Phi_{n-1} \times \times (B \circ g g_n) = g_{n-1}, \Phi_{n-2} \langle B \circ g g_n g_{n-1} \rangle = g_{n-2}, \dots, \Phi_1 \langle B \circ g g_1 \times \times g_2 \dots g_n \rangle = g_1$. Тогда $B \circ e = F(B \circ g) = F_1 F_2 \dots F_n(B \circ g) = F_1 F_2 \dots F_{n-1}(B \circ g g_n) = F_1 F_2 \dots F_{n-2}(B \circ g g_n g_{n-1}) = \dots = F_1 \times \times (B \circ g g_n g_{n-1} \dots g_2) = B \circ g g_n g_{n-1} \dots g_1$.

Отсюда

$$g = (g_n g_{n-1} \dots g_2 g_1)^{-1} = g_1^{-1} g_2^{-1} \dots g_{n-1}^{-1} g_n^{-1}. \quad (30)$$

Однако Φ_i — отображение вида $M \circ G \rightarrow G_i$ для всех $i=1, 2, \dots, n$. Поэтому из (30) следует, что $g \in G_1 G_2 \dots G_n$, т. е. $G \subseteq G_1 G_2 \dots G_n$. Но $G_1 G_2 \dots G_n \subseteq G$ (G_i — по условию подгруппы группы G , $i=1, \dots, n$); следовательно, $G = G_1 G_2 \dots G_n$. Теорема 2 доказана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Путятин Е. П. Теоретические предпосылки нормализации изображений. Сообщение I.— В сб.: Проблемы бионики. Вып. 11. Харьков, 1973, с. 19—28.
2. Путятин Е. П., Трепетин М. С. Теоретические предпосылки нормализации изображений. Сообщение II (см. ст. в настоящем сборнике).
3. Курош А. Г. Теория групп. М., «Наука», 1967. 648 с.
4. Путятин Е. П., Юрченко В. П., Левиков В. Б., Берман В. И. Нормализация изображений при аффинных преобразованиях.— В сб.: Проблемы бионики. Вып. 9. Харьков, 1972, с. 23—37.

УДК 62.506.2

Е. П. ПУЯТИН, канд. техн. наук,
М. С. ТРЕПЕТИН, ст. науч. сотр.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ НОРМАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ. СООБЩЕНИЕ III

Настоящее сообщение является завершением исследований, начатых в [1, 2]. Используются терминология и обозначения, принятые в [2].

Нормализация при коммутативных и слабо коммутативных разложениях

Пусть группа G разлагается в произведение подгрупп G_1, \dots, G_n , а нормализатор F множества $M \cdot G$ можно представить в виде суперпозиции коммутирующих (см. ниже определение 2) частичных нормализаторов F_1, F_2, \dots, F_n , соответствующих подгруппам G_i ($i = 1, 2, \dots, n$). Покажем, что в этом случае подгруппы G_i ($i = 1, 2, \dots, n$) перестановочны (в смысле определения 1). Покажем также, что группа G в том и только в том случае является прямым произведением подгрупп G_i , когда нормализаторы F_i ($i = 1, 2, \dots, n$) взаимонезависимы (см. определение 4).

Определение 1. Подгруппы G_1, G_2, \dots, G_n называются перестановочными, если для всякой подстановки $\varphi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ i_1 & i_2 & \dots & i_n \end{pmatrix}$ выполнено $G_1 G_2 \dots G_n = G_{\varphi 1} G_{\varphi 2} \dots G_{\varphi n}$. Для случая $n = 2$ соответствующее определение приведено в монографии [3].

Таким образом, подгруппы G_1, \dots, G_n группы G перестановочны, если для всякого набора q_1, \dots, q_n ($q_m \in G_m, m = 1, 2, \dots, n$) и произвольной подстановки $\varphi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ i_1 & i_2 & \dots & i_n \end{pmatrix}$ найдутся элементы $q_{\varphi 1}^1, \dots, q_{\varphi n}^1$ ($q_{\varphi m} \in G_{\varphi m}, m = 1, 2, \dots, n$) такие, что $q_1 \dots q_n = q_{\varphi 1}^1 \dots q_{\varphi n}^1$.

Нетрудно показать, что справедливо обратное, т. е. если подгруппы G_1, \dots, G_n группы G таковы, что для произвольного набора $q_1 \dots q_n$ ($q_m \in G_m, m = 1, 2, \dots, n$) и любой подстановки $\varphi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ i_1 & i_2 & \dots & i_n \end{pmatrix}$ существует набор $q_{\varphi 1}^1, \dots, q_{\varphi n}^1$ элементов подгрупп соответственно $G_{\varphi 1}, \dots, G_{\varphi n}$ таких, что $q_1 \dots q_n = q_{\varphi 1}^1 \dots q_{\varphi n}^1$, то $G_{\varphi 1} \dots G_{\varphi n} = G_1 \dots G_n$ и подгруппы G_1, \dots, G_n перестановочны.

Определение 2. Будем считать, что нормализатор F множества $M \cdot G$ можно представить в виде суперпозиции коммутирующих частичных нормализаторов F_i , соответствующих подгруппам G_i ($i = 1, 2, \dots, n$) группы G , если для любой подстановки

$$\varphi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ i_1 & i_2 & \dots & i_n \end{pmatrix} \text{ удовлетворяется условие} \quad F_{\varphi 1} F_{\varphi 2} \dots F_{\varphi n} = F. \quad (2)$$

Теорема 1. Пусть группа G — произведение перестановочных подгрупп G_i ($i = 1, \dots, n$) с однозначным разложением элементов группы G на множители по подгруппам G_i ($i = 1, 2, \dots, n$) (см. определение 3 в [2]). Тогда нормализатор F представляется в виде суперпозиции коммутирующих частичных нормализаторов F_i , соответствующих подгруппам G_i ($i = 1, 2, \dots, n$) группы G .

Доказательство. Согласно теореме 1, приведенной в работе [2], представим нормализатор в виде суперпозиции нормализато-

ров F_i , соответствующих подгруппам G_i ($i = 1, 2, \dots, n$). Покажем, что нормализаторы F_i ($i = 1, 2, \dots, n$) коммутируют. Пусть $B \cdot g \in M \cdot G$, $\varphi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ i_1 & i_2 & \dots & i_n \end{pmatrix}$ — некоторая перестановка элементов $1, 2, \dots, n$. Покажем, что $F_{\varphi_1} F_{\varphi_2} \dots F_{\varphi_n} (B \cdot g) = F_1 F_2 \dots F_n \times (B \cdot g)$.

В самом деле, так как G_1, G_2, \dots, G_n перестановочны, $G_{\varphi_1} G_{\varphi_2} \dots G_{\varphi_n} = G_1 G_2 \dots G_n$. Пусть q — любой элемент из G и $q_{\varphi_1} q_{\varphi_2} \dots q_{\varphi_n}$ — его некоторое разложение ($q_{\varphi_m} \in G_{\varphi_m}$, $m = 1, 2, \dots, n$). Пусть Φ_{φ_m} — отображение вида $M \cdot G \rightarrow G_{\varphi_m}$, определенное формулой

$$\Phi_{\varphi_m} \langle B \cdot q_{\varphi_1} q_{\varphi_2} \dots q_{\varphi_n} \rangle = q_{\varphi_m}^{-1} \quad (m = 1, 2, \dots, n). \quad (3)$$

В силу однозначности разложения элементов в группе G отображения Φ_{φ_m} ($m = 1, 2, \dots, n$) определены корректно.

Последовательно применяя нормализаторы $F_{\varphi_1}, F_{\varphi_2}, \dots, F_{\varphi_n}$, на основании (3) получаем

$$\begin{aligned} F_{\varphi_1} \dots F_{\varphi_n} (B \cdot q) &= F_{\varphi_1} \dots F_{\varphi_{n-1}} (B \cdot q \Phi_n \langle B \cdot q \rangle) = \\ &= F_{\varphi_1} \dots F_{\varphi_{n-1}} (B \cdot q_{\varphi_1} q_{\varphi_2} \dots q_{\varphi_n} \Phi_n \langle B \cdot q \rangle) = \\ &= F_{\varphi_1} \dots F_{\varphi_n} (B \cdot q_{\varphi_1} q_{\varphi_2} \dots q_{\varphi_n} q_{\varphi_n}^{-1}) = \\ &= F_{\varphi_1} \dots F_{\varphi_{n-1}} (B \cdot q_{\varphi_1} q_{\varphi_2} \dots q_{\varphi_{n-1}}) = \dots = F_{\varphi_1} (B \cdot q_{\varphi_1}) = B \cdot e. \end{aligned}$$

$$\text{Следовательно, } F_{\varphi_1} F_{\varphi_2} F_{\varphi_n} (B \cdot q) = F_1 F_2 \dots F_n.$$

Теорема доказана.

Теорема 1 допускает обращение.

Теорема 2. Пусть нормализатор F представлен в виде суперпозиции коммутирующих частичных нормализаторов F_i , соответствующих подгруппам G_i ($i = 1, 2, \dots, n$) группы G . Тогда подгруппы G_i ($i = 1, 2, \dots, n$) — перестановочны, а группа G — их произведение.

Доказательство. Пусть $\varphi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ i_1 & i_2 & \dots & i_n \end{pmatrix}$ — некоторая подстановка. Покажем, что $G_{\varphi_1} G_{\varphi_2} \dots G_{\varphi_n} = G$. Отсюда из $G = G_1 G_2 \dots G_n$ и теоремы 2 [2] следует требуемое. Обозначим $F_{\varphi_1} = F_1, \dots, F_{\varphi_n} = F_n$, $G_{\varphi_1} = G_{i_1}^1, \dots, G_{\varphi_n} = G_{i_n}^1$. Тогда с учетом условия теоремы 2 [2], имеем $F_1^1 \dots F_n^1 = F$. Кроме того, на основании той же теоремы, $G = G_1^1 \dots G_n^1$. Следовательно, $G_{\varphi_1} G_{\varphi_2} \dots G_{\varphi_n} = G$. Теорема доказана.

Теорему 2 можно усилить, введя

Определение 3. Пусть F_i — частичные нормализаторы множеств $M \cdot G_i$ и Φ_i — отображение вида $M \cdot G \rightarrow G_i$, соответствующие F_i ($i = 1, 2, \dots, n$), причем удовлетворяется условие

$$F_i (B \cdot q) = B \cdot q \Phi_i \langle B \cdot q \rangle \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (5)$$

Нормализаторы $F_i (i = 1, 2, \dots, n)$ называются устойчивыми, если из $q = q_{\varphi_1} q_{\varphi_2} \dots q_{\varphi_m} \in G$ для некоторых $q_{\varphi_s} \in G_{\varphi_s} (s = 1, 2, \dots, m)$ следует

$$\Phi_k \langle B \cdot q \rangle = e \quad (6)$$

для всех $k \neq \varphi_s (s = 1, 2, \dots, m)$.

Условие (6) имеет следующий физический смысл. Считается, что нормализаторы F_1, \dots, F_n устойчивы в нормализации, если из того, что нормализатор F_k на некотором шаге не меняет изображение, следует, что применение F_k на любом другом шаге не изменяет изображение.

Теорема 3. Пусть нормализатор F множества $M \cdot G$ можно представить в виде суперпозиции устойчивых коммутирующих нормализаторов F_1, F_2, \dots, F_n множеств соответственно $M \cdot G_1, \dots, M \cdot G_n$. Тогда группа G разлагается в произведение попарно перестановочных подгрупп G_1, \dots, G_n .

Доказательство. Как установлено в процессе доказательства теоремы 2, имеет место разложение $G = G_1 G_2 \dots G_n$. Покажем, что подгруппы $G_i (i = 1, 2, \dots, n)$ попарно перестановочны, т. е. $G_i G_j = G_j G_i$ для всяких $i, j = 1, 2, \dots, n$.

Пусть $q_i \in G_i, q_j \in G_j (i \neq j)$. Убедимся, что $q_i q_j = q_j^1 q_i^1$ для подходящих $q_j^1 \in G_j, q_i^1 \in G_i$.

В силу идемпотентности и перестановочности $F_k (k = 1, 2, \dots, n)$ можно считать их попарно различными. При этом из условия теоремы непосредственно следует, что для всякой подстановки $\varphi =$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ i_1 & i_2 & \dots & i_n \end{pmatrix} \text{ выполнено}$$

$$F_{\varphi_1} F_{\varphi_2} \dots F_{\varphi_n} (B \cdot q) = F(B \cdot g) B \cdot e = B. \quad (7)$$

Вследствие перестановочности нормализаторов F_1, \dots, F_n выберем $F_{\varphi_1} = F_j, F_{\varphi_2} = F_i$. Так как F_k попарно различны, индексы $\varphi_r (r = 3, 4, \dots, n)$ отличны от i, j . Тогда из (6) следует

$$F_{\varphi_r} (B \cdot q_i q_j) = B \cdot q_i q_j \Phi \langle B \cdot q_i q_j \rangle = B \cdot q_i q_j e = B \cdot q_i q_j. \quad (8)$$

Отсюда и из $\varphi_1 = j, \varphi_2 = i$ получаем

$$F_{\varphi_1} F_{\varphi_2} \dots F_{\varphi_n} (B \cdot q_i q_j) = F_{\varphi_1} F_{\varphi_2} (B \cdot q_i q_j) = F_j F_i (B \cdot q_i q_j). \quad (9)$$

Обозначим

$$\tilde{\Phi}_i \langle B \cdot q_i q_j \rangle = \tilde{q}_i; \quad \tilde{\Phi}_j \langle B \cdot q_i q_j q_i \rangle = \tilde{q}_j. \quad (10)$$

Теперь в силу (5) имеем

$$F_j F_i (B \cdot q_i q_j) = F_j (B \cdot q_i q_j q_i) = B \cdot \tilde{g}_i \tilde{g}_j \tilde{g}_i \tilde{g}_j \quad (11)$$

Наконец, из (7), (9), (10) выводим $e = q_i q_j q_i q_j$ и $q_i q_j = \tilde{q}_j^{-1} \tilde{q}_i^{-1}$.

Однако $\tilde{q}_j^{-1} \in G_j, \tilde{q}_i^{-1} \in G_i$. Следовательно, $q_i q_j \in G_j G_i$ и $G_i G_j \leq G_j G_i$. Аналогично получаем $G_j G_i \leq G_i G_j$, т. е. $G_i G_j = G_j G_i$. Теорема доказана.

Лемма. Пусть нормализаторы F_i множеств $M \cdot G_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$) устойчивы. Тогда для всякого $k = 2, 3, \dots, n$ выполнено

$$G_1 G_2 \dots G_{k-1} \cap G_k = e. \quad (12)$$

Доказательство. Предположим противное и пусть $g \in G_1 \dots G_{k-1} \cap G_k \setminus e$. Так как F_k — нормализатор множества $M \cdot G_k$, $F_k(B \cdot g) = B \cdot e$ для всякого $B \in M$. С другой стороны, в силу (7) и устойчивости нормализаторов имеем $\Phi_k \langle B \cdot q_1 \dots g_{k-1} \rangle = e$ для любого набора $q_i \in G_i$ ($i = 1, 2, \dots, k-1$). В частности, $\Phi_k \langle B \cdot g \rangle = e$. Отсюда и из (5) получаем $F_k(B \cdot g) = B \cdot g \Phi_k \langle B \cdot g \rangle = B \cdot qe = B \cdot g$, т. е. $g = e$, вопреки предположению. На основании полученного противоречия утверждение леммы доказано.

Теорема 4. Пусть нормализатор F множества $M \cdot G$ представляется в виде суперпозиции коммутирующих устойчивых нормализаторов F_1, F_2, \dots, F_n (множеств соответственно $M \cdot G_1, M \cdot G_2, \dots, M \cdot G_n$). Тогда элементы группы G единственным образом разлагаются на множители из соответствующих подгрупп G_1, \dots, G_n .

Доказательство. Из условий данной теоремы и теоремы 2 имеем $G = G_1 G_2 \dots G_n = G_{\varphi_1} G_{\varphi_2} \dots G_{\varphi_n}$ для произвольной подстановки $\varphi = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ i_1 & i_2 & \dots & i_n \end{pmatrix}$. Пусть $g_{\varphi_1} g_{\varphi_2} \dots g_{\varphi_n} = f_{\varphi_1} f_{\varphi_2} \dots f_{\varphi_n}$ для некоторых $g_{\varphi_m}, f_{\varphi_m} \in G_{\varphi_m}$ ($m = 1, 2, \dots, n$). Покажем, что $g_{\varphi_m} = f_{\varphi_m}$ ($m = 1, 2, \dots, n$). Предположим противное и пусть $g_{\varphi_l} \neq f_{\varphi_l}$ для некоторого $l \leq n$.

Пусть k — наибольшее из тех l , для которых отмеченное неравенство выполняется. Сокращая соотношение $g_{\varphi_1} \dots g_{\varphi_n} = f_{\varphi_1} \dots f_{\varphi_n}$ на $g_{\varphi_{k+1}} \dots g_{\varphi_n} = f_{\varphi_{k+1}} \dots f_{\varphi_n}$, получаем $g_{\varphi_1} \dots g_{\varphi_k} = f_{\varphi_1} \dots f_{\varphi_k}$, откуда

$$\begin{aligned} f_{\varphi_{k-1}}^{-1} \dots f_{\varphi_1}^{-1} g_{\varphi_1} \dots g_{\varphi_{k-1}} &= \\ = (f_{\varphi_1} \dots f_{\varphi_{k-1}})^{-1} g_{\varphi_1} \dots g_{\varphi_{k-1}} &= f_{\varphi_k} g_{\varphi_k}^{-1}. \end{aligned} \quad (13)$$

В силу попарной коммутативности подгрупп $G_{\varphi_1}, \dots, G_{\varphi_k}$ равенство (13) можно преобразовать к виду $h_1 h_2 \dots h_{k-1} = h_k$, где $h_i = ((f_{\varphi_i}^{-1}) g_{\varphi_i})'$ для некоторых $(f_{\varphi_i}^{-1})' \in G_{\varphi_i}$ ($i = 1, 2, \dots, k-1$; $h_k = f_{\varphi_k} g_{\varphi_k}^{-1}$). При этом $h_k \neq e$ ввиду $f_{\varphi_k} \neq g_{\varphi_k}$.

Для завершения доказательства перенумеруем подгруппы G_{φ_i} и нормализаторы F_{φ_i} , полагая $G_{\varphi_i} = G'_i, F_{\varphi_i} = F'_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Тогда $e \neq h_k = h_1 h_2 \dots h_{k-1}$ и, значит, $G'_k \cap G'_1 G'_2 \dots G'_{k-1} \neq e$, вопреки утверждению леммы. Вследствие полученного противоречия теорема доказана.

Определение 4. Коммутирующие устойчивые нормализаторы F_1, \dots, F_n (множеств соответственно $M \cdot G_1, \dots, M \cdot G_n$) называются независимыми, если для любых изображений $B \cdot g \in$

$\in M \cdot G$ и индексов $m, i_1, i_2, \dots, (i_k = 1, 2, \dots, n; m \neq i_1, \dots, i_k)$ удовлетворяется условие

$$\Phi_m \langle B \cdot q \rangle = \Phi_m \langle F_{i_1} F_{i_2} \dots F_{i_k} (B \cdot q) \rangle. \quad (14)$$

Физически (14) означает, что частичные нормализаторы F_1, \dots, F_n действуют независимо в том числе, если независимо от своего положения в произведении $F_1 F_2 \dots F_n$ нормализатор F_m ($m = 1, 2, \dots, n$) полностью нейтрализует воздействие группы G_m . Для этого действие нормализатора F_m не зависит от того, действует ли он первым в нормализующей последовательности или применяется после некоторого числа частичных нормализаторов.

Теорема 5. Нормализатор F множества $M \cdot G$ тогда и только тогда можно представить в виде суперпозиции взаимно-независимых нормализаторов F_1, \dots, F_n множеств соответственно $M \cdot G_1, \dots, G_n$, когда группа G является прямым произведением подгруппы G_1, \dots, G_n .

Доказательство. Допустим, что группа G — прямое произведение подгрупп G_i ($i = 1, 2, \dots, n; G = G_1 \times G_2 \times \dots \times G_n$). Тогда из теорем 2, 3 следует, что нормализатор F множества $M \cdot G$ представляет собой произведение некоторых коммутирующих нормализаторов F_1, F_2, \dots, F_n . Пусть отображения Φ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) действуют по формуле

$$\Phi_i \langle B \cdot g_1 g_2 \dots g_{i-1} g_i g_{i+1} \dots g_n \rangle = g_i^{-1}. \quad (15)$$

Тогда из определения прямого произведения и из формул (5), (15) следует справедливость условия (14). Очевидно также, что $F_{\varphi_1} F_{\varphi_2} \dots F_{\varphi_n} (B \cdot g) = B \cdot e = F (B \cdot g)$ для произвольной подстановки φ . При доказательстве этого факта вычисления (4) повторяются, поэтому они опущены. Таким образом, нормализаторы F_1, F_2, \dots, F_n взаимно-перестановочны в силу определения 3. Поэтому одна часть теоремы доказана.

Напротив, пусть нормализатор F — произведение взаимно-независимых нормализаторов F_1, F_2, \dots, F_n множеств соответственно $M \cdot G_1, \dots, M \cdot G_n$. Тогда по теореме 3 [2] группа G разлагается в произведение попарно перестановочных подгрупп G_1, \dots, G_n . Покажем, что в действительности это произведение является прямым. В этих целях установим, что $g_i g_j = g_j g_i$ для всяких $g_i \in G_i, g_j \in G_j$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$), и воспользуемся утверждением леммы.

В процессе доказательства теоремы 3 были выведены формулы (7), (8). Полагаем в них $\varphi = \begin{pmatrix} 12 & 3 & \dots & n \\ i & j & i_3 & \dots & i_n \end{pmatrix}$. Обозначаем $\Phi_j \langle B \cdot q_i q_j \rangle = q_j, \Phi_i \langle B \cdot q_i q_j q_i \rangle = q_i$. Тогда в силу вычислений, выполненных в (9), (11), получаем

$$B \cdot e = F_1 F_2 \dots F_n (B \cdot q) = F_{\varphi_1} F_{\varphi_2} \dots F_{\varphi_n} (B \cdot q) = B \cdot g_i g_j g_i g_i. \quad (16)$$

Отсюда $e \cdot g_i g_j g_i g_j$ и $g_i g_j = g_i g_j$. Так как $G_i \cap G_j = e$ по лемме, $g_i g_j = e$. Вследствие этого

$$\Phi_j \langle B \cdot g_i g_j \rangle = g_i = g_j. \quad (17)$$

Пусть, как и в условии (7), $\varphi_1 = 1$, $\varphi_2 = i$. Тогда из (7) — (11) следует

$$B \cdot e = B \cdot g_i g_j g_i g_j. \quad (18)$$

Покажем, что $g_i = g_i$, $g_j = g_j$. Действительно, в силу (10), (14) и (5) имеем $\Phi_i \langle B \cdot g_i g_j \rangle = \Phi_i \langle F_j (B \cdot g_i g_j) \rangle = \Phi_i \langle B \cdot g_i g_j \Phi_j \langle B \cdot g_i g_j \rangle \rangle$. Отсюда с учетом условия (17) выводим $\Phi_i \langle B \cdot g_i g_j \rangle = \Phi_i \langle B \cdot g_i \rangle$. Так как F_i — нормализатор множества $M \cdot G_i$, $B \cdot e = F_i (B \cdot g_i) = B \cdot g_i \Phi \langle B \cdot g_i \rangle$ и, следовательно, $\Phi_i \langle B \cdot g_i \rangle = g_i$. т. е.

$$g_i = \Phi_i \langle B \cdot g_i g_j \rangle = g_i^{-1}. \quad (19)$$

Из (10), (14), (17) следует $g_j = \Phi_j \langle B \cdot g_i g_j g_i \rangle = \Phi_j \langle F_i (B \cdot g_i g_j) \rangle = \Phi_j \langle B \cdot g_i g_j \rangle = g_j^{-1}$. Наконец, из (18) и сказанного заключаем, что $g_i g_j = g_j^{-1} g_i^{-1} = g_i g_j$. Теорема доказана.

Опишем некоторые нормализаторы, обладающие отмеченными свойствами. В работе [4] представлена суперпозиция некоммутативных операторов, которая предназначена для нормализации изображений, подвергающихся преобразованиям из аффинной группы. Согласно теореме 2 [2], такой суперпозиции будет соответствовать некоммутативное разложение группы аффинных преобразований.

Приведем пример суперпозиции коммутирующих частичных нормализаторов. Всевозможные смещения и повороты изображений образуют, как известно, евклидову группу преобразований. Пусть U и C — соответственно группы вращений и смещений, а $u \in U$ и $c \in C$ — их элементы. Легко проверить, что U и C перестановочны. При этом $uc = c'u$. Действительно, если l, m — параметры преобразования C , а θ — параметр вращения, то $B = B_0 \cdot cu = B_0 (x \cos \theta + y \sin \theta - l, -x \sin \theta + y \cos \theta - m)$. С другой стороны, $B = B_0 \cdot u'c' = B_0 [(x - l') \cos \theta' + (y - m') \sin \theta', -(x - l) \sin \theta' + (y - m') \cos \theta']$. Результирующие изображения будут совпадать, т. е. $B_0 \cdot uc = B_0 \cdot u'c'$, если $l = l' \cos \theta + m' \sin \theta$, $m = -l' \sin \theta + m' \cos \theta$ ($\theta = \theta'$).

Пусть имеются частичные нормализаторы F_c и F_n , однозначно определенные отображениями

$$\Phi_c = \Phi_c(x_0, Y_0) = \Phi_c \left(\frac{\iint_D B(x, y) x dx dy}{\iint_D B(x, y) dx dy}, \frac{\iint_D B(x, y) y dx dy}{\iint_D B(x, y) dx dy} \right); \quad (20)$$

$$\Phi_u = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2 \iint_D B(x, y) (x - X_0) (y - Y_0) dx dy}{\iint_D B(x, y) [(x - X_0)^2 - (y - Y_0)^2] dx dy}. \quad (21)$$

Нормализаторы F_c и F_u — коммутирующие. Убедимся в этом. Пусть, например, первым применяется нормализатор смещения F_c . Вычислим значения функционалов X_0, Y_0 , определяющие отображения Φ_c . Эталонные значения функционалов X_0, Y_0, Φ_u положим равными нулю.

Для произвольного изображения из евклидовой группы, связанного с эталонным соотношением $B = B_0 \circ CU$, имеем

$$X_0 = \frac{\iint_D B_0 \circ cu x dx dy}{\iint_D B_0 \circ cu dx dy} = \frac{\iint_D B_0(uv) [(u+l) \cos \theta - (v+m) \sin \theta] dudv}{\iint_D B_0(uv) dudv} = \\ = l \cos \theta - m \sin \theta;$$

$$Y_0 = \frac{\iint_D B_0 \left[cu \left(\frac{x}{y} \right) \right] y dx dy}{\iint_D B \left[cu \left(\frac{x}{y} \right) \right] dx dy} = l \sin \theta + m \cos \theta.$$

В результате действия нормализатора F_c изображение $B = B_0 \circ cu$ будет приведено к виду

$$F_c = (B \circ cu) = B_0 \circ cu \Phi_c = B_0 [(x + X_0) \cos \theta + (y + Y_0) \sin \theta - l; \\ - (x + X_0) \sin \theta + (y + Y_0) \cos \theta - m] = \\ = B_0 (x \cos \theta + y \sin \theta, -x \sin \theta + y \cos \theta) = B_0 \circ u.$$

Функционал Φ_u от этого изображения с учетом эталонных значений составляет

$$\Phi_u(B_0 \circ u) = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2 \iint_D B_0 \left[u \left(\frac{x}{y} \right) \right] xy dx dy}{\iint_D B_0 \left[u \left(\frac{x}{y} \right) \right] (x^2 - y^2) dx dy} = \theta.$$

Применяя нормализатор F_u , получаем эталонное изображение $F_u(B_0 \circ u) = B_0 \circ u \Phi_u = B_0$. Перестановка операторов F_c и F_u также пригодна для нормализации. В самом деле, учитывая, что функционал Φ_u в этом случае также равен углу θ , записываем

$$F_u(B_0 \circ cu) = B_0 \circ cu \Phi_u = B_0 \left[cu \Phi_u \left(\frac{x}{y} \right) \right] = B_0 [(x \cos \Phi_u - \\ - y \sin \Phi_u) \cos \theta + (x \sin \Phi_u + y \cos \Phi_u) \sin \theta - l; \\ (-x \cos \Phi_u + y \sin \Phi_u) \sin \theta + (x \sin \Phi_u + \\ + y \cos \Phi_u) \cos \theta - m] = B_0 \circ c.$$

Используя для полученного изображения оператор нормализации F_c , определяем эталонное изображение B_0 . Функционалы X_0 и Y_0 в этом случае соответственно равны l и m .

Нормализаторы F_u и F_c — не только коммутирующие в смысле определения 2, но и устойчивые, так как $\Phi_c(B \cdot u) = e$, $\Phi_u(B \cdot c) = e$, что согласуется с определением 3.

Более того, нормализатор F_u независим (см. определение 4), так как вне зависимости от того, применяется ли он первым или вторым, значение функционала Φ_u не изменяется и равно углу θ . В то же время отображение Φ_c , как вытекает из изложенного, зависит от места использования нормализатора F_c в суперпозиции. Условие (14) для этого отображения не выполняется, и, следовательно, нормализатор F_c не является независимым. С практической точки зрения предпочтение следует отдать суперпозиции $F_u F_c$, так как в этом случае функционал Φ_u имеет более простой вид.

Примерами коммутативных разложений группы преобразований в свои подгруппы являются приведенные в [2] различные представления диагональной матрицы. При этом матрица P изменения масштаба по осям координат (преобразование подобия) коммутирует со всеми подгруппами аффинной группы.

Рассмотрим суперпозицию коммутативных преобразований, образующих диагональную матрицу:

$$I_x I_y Q P = \begin{pmatrix} \text{sing } \lambda & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ a & \text{sing } \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g & 0 \\ 0 & \frac{1}{q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P & 0 \\ 0 & P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \mu \end{pmatrix} = D.$$

Здесь I_x , I_y — преобразования зеркального отражения относительно осей абсцисс и ординат, определенные в [1]; $q = \sqrt{\frac{\lambda}{\mu}}$; $p = \sqrt{\lambda \mu}$.

Для нормализации центрированных изображений вида $B(x, y) = B_0(\lambda x, \mu y)$ (параметры λ и μ имеют произвольный знак) можно воспользоваться суперпозицией четырех нормализаторов F_{I_x} , F_{I_y} , F_q , F_p , отвечающих приведенному выше разложению. Зададим соответствующие отображения

$$\Phi_p = \sqrt{\left| \iint_D B(x, y) dx dy \right|}; \quad \Phi_g = \sqrt{\frac{\iint_D B(x, y) x^2 dx dy}{\iint_D B(x, y) y^2 dx dy}};$$

$$\Phi_{I_x} = \text{sign } X_r; \quad \Phi_{I_y} = \text{sign } Y_r.$$

Здесь X_r , Y_r — координаты любой другой точки, отличной от центра тяжести. Всякая суперпозиция операторов F_{I_x} , F_{I_y} , F_q , F_p будет нормализующей. Эти нормализаторы устойчивы. В самом деле:

$$\Phi_p = \sqrt{\left| \iint_D \left[B_0 I_x I_y Q \left(\frac{x}{y} \right) \right] dx dy \right|} = e = 1;$$

$$\Phi_q = \sqrt{\frac{\int_D [B_0 \circ I_x I_y P \left(\frac{x}{y} \right)] x^2 dx dy}{\int_D [B_0 \circ I_x I_y P \left(\frac{x}{y} \right)] y^2 dx dy}} = e = 1.$$

Функционалы Φ_{ix} , Φ_{iy} также равны единице для отображения вида $B = B_0 \circ PQ$.

Легко также убедиться, что $\Phi_p = (B_0 \circ D) = \frac{1}{\sqrt{\lambda \mu}} = \frac{1}{p}$; $\Phi_q = \sqrt{\frac{p}{\lambda}} = \frac{1}{q}$ и значения этих функционалов, как и Φ_{ix} , Φ_{iy} , не зависят от места применения соответствующих нормализаторов в суперпозиции. Поэтому, согласно определению 4, нормализаторы F_{ix} , F_{iy} , F_q , F_p независимы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Путятин Е. П. Теоретические предпосылки нормализации изображений. Сообщение I.— В сб.: Проблемы бионики. Вып. 10. Харьков, 1973. с. 47—51.
2. Курош А. Г. Теория групп. М., «Наука», 1967. 648 с.
3. Баккельман И. Я. Высшая геометрия. М., «Просвещение», 1967. 367 с.
4. Мальцев А. И. Основы линейной алгебры. М., «Наука», 1970. 400 с.

УДК 62.506.2

И. В. ШУЛЬГИН, канд. техн. наук,
Б. К. ЛОПАТЧЕНКО, Б. В. ПИЛЬЩИКОВ, инженеры

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗРИТЕЛЬНОЙ РЕЦЕПЦИИ

Математические модели зрения можно строить двумя основными способами. Первый позволяет устанавливать алгоритмы работы глаза в процессе изучения принципов его работы, что вызывает необходимость исследования внутренней структуры глаза. При втором способе используется метод «черного ящика», благодаря которому можно, не изучая глубоко анатомо-физиологическое строение глаза, использовать только результаты наблюдений психических функций человека, связанных со зрительной рецепцией.

Знание физиологических процессов, лежащих в основе психических функций человека, дает возможность определять их закономерности. Однако сведения о физиологических механизмах органов чувств крайне недостаточны, не говоря уже о высших психических функциях — памяти, мышлении, воле и т. д. Имеются лишь данные психологических исследований этих процессов. В частности, описаны некоторые психические функции памя-

ти, хотя о материальном субстрате реализации этих функций почти ничего неизвестно.

Исследования методом «черного ящика» исключают установление структуры и механизмов физиологических явлений; можно лишь получить операторы, являющиеся основой тех или иных психических функций человека. Однако для создания технических устройств, использующих, например, принципы работы органа зрения, достаточно знать именно эти операторы, так как их можно реализовать на иной основе по сравнению с глазом человека.

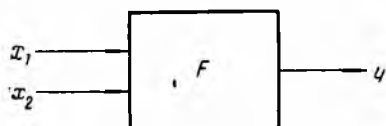


Рис. 1.

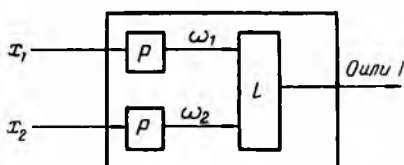


Рис. 2.

Рассмотрим систему преобразования информации — «черный ящик», который реализует некоторую функцию F (рис. 1). При этом входными сигналами служат пары (x_1, x_2) из некоторого множества X . В ответ на каждую пару входных сигналов система вырабатывает сигнал $y \in Y$, где множество $Y = \{0, 1\}$.

Функцию F можно представить в виде

$$y = F(x_1, x_2), \quad (1)$$

где $x_1, x_2 \in X, y \in Y$.

В работе [1] дано более детальное описание рассматриваемого «черного ящика», который можно представить в виде схемы (рис. 2).

На схеме

$$y = F(x_1, x_2) = L(P(x_1), P(x_2)); \quad (2)$$

$$L(\omega_1, \omega_2) = \begin{cases} 1, & \text{если } \omega_1 = \omega_2, \\ 0, & \text{если } \omega_1 \neq \omega_2, \end{cases} \quad (3)$$

где $\omega_1 = P(x_1); \omega_2 = P(x_2)$.

При этом функция F должна обладать свойствами симметричности, рефлексивности и транзитивности.

Приведенные результаты дают возможность рассмотреть построение математических моделей некоторых функций зрительного восприятия, в частности моделей преобразования информации в поле зрения, которые связаны с классификацией объектов зрения, подвергнутых некоторым аффинным и яркостным преобразованиям. Человек уверенно относит к одному классу (нормализует) зрительные картины, отличающиеся такими преобразованиями, как масштаб, смещение, поворот, яркость, контрастность [2—4].

Используя экспериментальные данные, сформулируем аксиоматику нормализации объектов зрения. Для этого проанализируем конкретную психологическую задачу. Будем предъявлять испытуемому попарно зрительные картины, отличающиеся, к примеру, одним из указанных преобразований — масштабом. Испытуемый должен отвечать положительно («да»), если картины различаются масштабом, и отрицательно («нет»), если существуют какие-либо дополнительные отличия. Как показывают литературные данные [2] и эксперименты [3], испытуемый легко справляется с поставленной задачей.

Под входными сигналами «черного ящика» (рис. 1) будем понимать плоские зрительные картины $B_1(x, y)$ и $B_2(x, y)$, которые характеризуются яркостью B в каждой точке картин x, y и которые примем за элементы множества M , т. е. $B_1(x, y), B_2(x, y) \in M$. В качестве выходного сигнала «черного ящика» служит ответ испытуемого «да» (1), когда он относит картины, отличающиеся лишь масштабом, к одному классу, и «нет» (0), когда картины, отличающиеся иными признаками, он относит к другому классу. Таким образом, вводится множество $P = \{0, 1\}$. Очевидно, что одной и той же картине соответствует субъективное зрительное представление испытуемого о ней, но вместе с тем существуют картины $B_1(x, y)$ и $B_2(x, y)$, отличающиеся в данном случае масштабом, т. е. удовлетворяющие условию $B_1(\lambda x, \lambda y) = B_2(x, y)$, которые у испытуемого вызывают одинаковые представления.

При многократном предъявлении одних и тех же отличающихся лишь масштабом картин испытуемый всегда дает однозначный ответ — «да» или «нет». Поэтому можно говорить о существовании функции F , реализуемой испытуемым, которая преобразует элементы из множества M в множество P , т. е.

$$y = F(B_1(x, y), B_2(x, y)), \quad (4)$$

где $B_1(x, y), B_2(x, y) \in M, y \in P$.

Аналогичные рассуждения справедливы также для зрительных картин, отличающихся другими преобразованиями.

Функция F удовлетворяет требованиям рефлексивности, симметричности и транзитивности, которые в применении к указанной задаче означает следующее.

1. Одной и той же зрительной картине у человека соответствует одинаковое зрительное представление (рефлексивность).

2. Если о двух картинах B_1, B_2 у испытуемого существует одно и то же зрительное представление, то о картинах B_2 и B_1 оно останется прежним (симметричность).

3. Если о картинах B_1 и B_2 , а также о B_2 и B_3 возникают одинаковые зрительные представления, то они одинаковы и для B_1, B_3 (транзитивность).

Сформулированные экспериментальные условия дают возможность представить функцию F в виде

$$z = F(B_1(x, y), B_2(x, y)) = L(\omega_1, \omega_2), \quad (5)$$

где L — функция, отвечающая условию (3), т. е.

$$\omega_1 = f(B_1(x, y)); \omega_2 = f(B_2(x, y)),$$

а f — функция преобразующая картины $B_1(x, y)$, $B_2(x, y)$, находящиеся в пространстве зрения (множество M), в элементы ω_1 , ω_2 множества Ω .

Элементы ω_1 , ω_2 можно трактовать как зрительные образы предъявляемых картин. В рассмотренной задаче эти субъективные зрительные образы абстрагируются от какого-либо из аффинных или яркостных преобразований, т. е. происходит нормализация зрительных образов, и испытуемый как бы отстраивается от масштаба, поворота или переноса указанных картин в поле зрения, а также от яркости и контрастности. В этом случае $\omega_1 = \omega_2$.

Совокупность всех зрительных образов, абстрагированных от размера определенной зрительной картины, образует множество Ω_1 . Совокупность всех зрительных картин, абстрагированных от параллельного переноса, яркости, контрастности, образует соответственно множества Ω_2 , Ω_3 , Ω_4 , Ω_5 .

Сформулируем аксиоматические требования, которым должна удовлетворять любая функция $f(B(x, y))$, входящая в выражение

$$z = L[f(B_1(x, y)), f(B_2(x, y))]. \quad (6)$$

Требование 1 (при двусторонней произвольной деформации зрительных картин). Равенство $f(B_1(x, y)) = f(B_2(x, y))$ имеет место в том и только в том случае, если $B_1(\lambda x, \mu y) = B_2(x, y)$, где λ , μ — коэффициенты сжатия (растяжения).

Требование 2 (при односторонней деформации зрительных картин). Равенство $f(B_1(x, y)) = f(B_2(x, y))$ имеет место в том и только в том случае, если $B_1(\lambda x, y) = B_2(x, y)$.

Требование 3 (при деформации одномерных картин). Равенство $f(B_1(x)) = f(B_2(x))$ имеет место в том и только в том случае, если $B_1(\lambda x) = B_2(x)$.

Требование 4 (при изменении масштаба). Равенство $f(B_1(x, y)) = f(B_2(x, y))$ имеет место в том и только в том случае, если $B_1(\lambda x, \lambda y) = B_2(x, y)$.

Требование 5 (при двустороннем смещении зрительных картин в поле зрения). Равенство $f(B_1(x, y)) = f(B_2(x, y))$ имеет место в том и только в том случае, если $B_1(x-l, y-t) = B_2(x, y)$, где l , t — произвольные вещественные числа.

Требование 6 (при одностороннем смещении зрительных картин). Равенство $f(B_1(x, y)) = f(B_2(x, y))$ имеет место в том и только в том случае, если $B_1(x-l, y) = B_2(x, y)$.

Требование 7 (при смещении одномерных картин). Равенство $f(B_1(x)) = f(B_2(x))$ имеет место в том и только в том случае, если $B_1(x-l) = B_2(x)$.

Требование 8 (при повороте зрительных картин в поле зрения). Равенство $f(B_1(x, y)) = f(B_2(x, y))$ имеет место в том и только в том случае, если $B_1(x \cos \theta + y \sin \theta - x \sin \theta + y \cos \theta) = B_2(x, y)$,

где θ — угол поворота одной зрительной картины относительно другой.

Требование 9 (при изменении яркости зрительных картин). Равенство $f(B_1(x, y)) = f(B_2(x, y))$ имеет место в том и только в том случае, если $k B_1(x, y) = B_2(x, y)$, где k — произвольная постоянная.

Требование 10 (при изменении контрастности с фоном). Равенство $f(B_1(x, y)) = f(B_2(x, y))$ имеет место в том и только в том случае, если $B_1(x, y) + c = B_2(x, y)$, где c — произвольная постоянная.

Эти требования означают, что две зрительные картины, отличающиеся любым из приведенных преобразований, вызывают у человека одинаковые зрительные образы. Справедливо также обратное утверждение о том, что две зрительные картины, порождающие у испытуемого одинаковые зрительные образы, могут отличаться любым из указанных преобразований.

Приведем некоторые виды функций, удовлетворяющие сформулированной аксиоматике.

Для зрительных картин, отличающихся масштабом, функция имеет вид

$$f(B(x, y)) = \Phi \left[B \left(x \sqrt{\iint_D B(\xi, \eta) d\xi d\eta}, y \sqrt{\iint_D B(\xi, \eta) d\xi d\eta} \right) \right], \quad (7)$$

где Φ — произвольная функция, имеющая однозначную обратную функцию, отражающую множество Ω на некоторое множество Ω' ;

D — область интегрирования;

ξ, η — связанные переменные.

Для зрительных картин, подвергнутых произвольной деформации по осям координат x и y :

$$f(B(x, y)) = \Phi \left\{ B \left[x \int_a^b B(\xi, \int_{\varphi_1(\xi)}^{\varphi_2(\xi)} B(\xi, \eta) d\eta) d\xi, y \int_c^d B(\int_{\psi_1(\eta)}^{\psi_2(\eta)} B(\xi, \eta) d\xi, \eta) d\eta \right] \right\} \quad (8)$$

где ξ, η — текущие переменные;

a, b и c, d — соответственно крайние абсциссы и крайние ординаты области интегрирования D ;

$\varphi_1(\xi), \varphi_2(\xi), \psi_1(\eta), \psi_2(\eta)$ — функции, выражающие соответственно ординаты и абсциссы нижней и верхней граничных линий области D

Для зрительных картин, подвергнутых параллельному переносу в поле зрения, функция $f(B(x, y))$ может быть представлена следующим образом:

$$f(B(x, y)) = \Phi \left[B \left(x + \frac{\iint_D B(\xi, \eta) \xi d\xi d\eta}{\iint_D B(\xi, \eta) d\xi d\eta}, y + \frac{\iint_D B(\xi, \eta) \eta d\xi d\eta}{\iint_D B(\xi, \eta) d\xi d\eta} \right) \right]. \quad (9)$$

Для случая изменения яркости функция $f(B(x, y))$ имеет вид

$$f(B(x, y)) = \frac{B(x, y)}{\iint_D B(\xi, \eta) d\xi d\eta}. \quad (10)$$

При изменении контрастности одной из возможных форм представления функции $f(B(x, y))$ может быть

$$f(B(x, y)) = B(x, y) - \frac{\iint_D B(\xi, \eta) d\xi d\eta}{\iint_D d\xi d\eta}. \quad (11)$$

Кроме представленных функций, можно привести целый ряд других, которые с точностью до взаимно-однозначного соответствия характеризуют процесс нормализации, осуществляемый зрительной системой человека. Справедливость приведенных аксиом была проверена специальными экспериментами. Опыты по проверке аксиом и порогам нормализации при аффинных преобразованиях изображений описаны в работе [3].

Покажем равносильность введенных аксиоматических требований и математических моделей, описывающих процесс нормализации, на примере приведенной модели нормализации при двусторонней деформации зрительных картин.

Теорема. Если и только если выполняется требование 1, то функция нормализации может быть представлена в виде

$$f(B(x, y)) = \Phi \left\{ B \left[x \int_a^b B(\xi) B(\xi, \eta) d\eta \right] d\xi, y \int_c^d B \left(\int_{\psi_1(\eta)}^{\psi_2(\eta)} B(\xi, \eta) d\xi, \eta \right) d\eta \right\}, \quad (12)$$

Доказательство. Пусть выполняется требование 1. В соответствии с (12)

$$\begin{aligned} f(B_1(x, y)) &= B_1 \left\{ x \int_{a_1}^{b_1} B_1 \left[\xi, \int_{\varphi_1(\xi)}^{\varphi_2(\xi)} B_1(\xi, \eta) d\eta \right] d\xi, y \int_{c_1}^{d_1} B_1 \left[\int_{\psi_1(\eta)}^{\psi_2(\eta)} B_1(\xi, \eta) d\xi, \eta \right] d\eta \right\}; \\ f(B_2(x, y)) &= B_2 \left\{ x \int_{a_2}^{b_2} B_2 \left[\xi, \int_{\varphi_1'(\xi)}^{\varphi_2'(\xi)} B_2(\xi, \eta) d\eta \right] d\xi, y \int_{c_2}^{d_2} B_2 \left[\int_{\psi_1'(\eta)}^{\psi_2'(\eta)} B_2(\xi, \eta) d\xi, \eta \right] d\eta \right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Покажем, что при выполнении условий $a_2 = \frac{a_1}{\lambda}$, $b_2 = \frac{b_1}{\lambda}$, $c_2 = \frac{c_1}{\lambda}$, $d_2 = \frac{d_1}{\lambda}$, $\varphi_1'(\xi) = \varphi_1\left(\frac{\xi}{\lambda}\right)$, $\varphi_2'(\xi) = \varphi_2\left(\frac{\xi}{\lambda}\right)$, $\psi_1'(\eta) = \psi_1\left(\frac{\eta}{\lambda}\right)$, $\psi_2'(\eta) = \psi_2\left(\frac{\eta}{\lambda}\right)$ выполняется равенство $f(B_1(x, y)) = f(B_2(x, y))$.

В значение для $f(B_2(x, y))$ подставим $B_1(\lambda x, \mu y) = B_2(x, y)$

$$f(B_2(x, y)) = B_1 \left\{ \lambda x \int_{a_2}^{b_2} B_1 \left[\lambda \xi, \mu \int_{\varphi_1'(\xi)}^{\varphi_2'(\xi)} B_1(\lambda \xi, \mu \eta) d\eta \right] d\xi, \right. \\ \left. \mu y \int_{c_2}^{d_2} B_1 \left[\int_{\psi_1'(\eta)}^{\psi_2'(\eta)} B_1(\lambda \xi, \mu \eta) d\xi, \mu \eta \right] d\eta \right\}.$$

Произведем замену переменных:

$$\xi^* = \lambda \xi, \quad d\xi^* = \lambda d\xi; \quad \eta^* = \mu \eta, \quad d\eta^* = \mu d\eta.$$

При этом ξ^* в случае изменения ξ от $a_2 = \frac{a_1}{\lambda}$ до $b_2 = \frac{b_1}{\lambda}$ будет изменяться соответственно от a_1 до b_1 ; $\varphi(\xi^*)$ при изменении $\varphi'(\xi)$ от $\varphi_1'(\xi) = \varphi_1\left(\frac{\xi}{\lambda}\right)$ до $\varphi_2'(\xi) = \varphi_2\left(\frac{\xi}{\lambda}\right)$ будет изменяться соответственно от $\varphi_1(\xi)$ до $\varphi_2(\xi)$; η^* при изменении η от $c_2 = \frac{c_1}{\lambda}$ до $d_2 = \frac{d_1}{\lambda}$ будет изменяться соответственно от c_1 до d_1 , а $\psi(\eta^*)$ при изменении $\psi'(\eta)$ от $\psi_1'(\eta) = \psi_1\left(\frac{\eta}{\mu}\right)$ до $\psi_2'(\eta) = \psi_2\left(\frac{\eta}{\mu}\right)$ будет изменяться от $\psi_1(\eta)$ до $\psi_2(\eta)$.
Следовательно,

$$f(B_2(x, y)) = B_1 \left\{ \lambda x \int_{a_1}^{b_1} B_1 \left[\xi^*, \mu \int_{\varphi_1(\xi^*)}^{\varphi_2(\xi^*)} B_1(\xi^*, \eta^*) \frac{d\eta^*}{\mu} \right] \frac{d\xi^*}{\lambda}, \right. \\ \left. \mu y \int_{c_1}^{d_1} B_1 \left[\int_{\psi_1(\eta^*)}^{\psi_2(\eta^*)} B_1(\xi^*, \eta^*) \frac{d\xi^*}{\lambda}, \eta^* \right] \frac{d\eta^*}{\mu} \right\} = B_1 \left\{ x \int_{a_1}^{b_1} B_1 \left[\xi^*, \int_{\varphi_1(\xi^*)}^{\varphi_2(\xi^*)} B_1(\xi^*, \eta^*) d\xi^* \right] d\xi^*, \right. \\ \left. y \int_{c_1}^{d_1} B_1 \left[\int_{\psi_1(\eta^*)}^{\psi_2(\eta^*)} B_1(\xi^*, \eta^*) d\xi^*, \eta \right] d\eta^* \right\}.$$

После замены переменных $\xi^* = \xi$, $\eta^* = \eta$

$$f(B_2(x, y)) = B_1 \left\{ x \int_{a_1}^{b_1} B_1 \left[\xi, \int_{\varphi_1(\xi)}^{\varphi_2(\xi)} B_1(\xi, \eta) d\eta \right] d\xi, y \int_{c_1}^{d_1} B_1 \left[\int_{\psi_1(\eta)}^{\psi_2(\eta)} B_1(\xi, \eta) d\xi, \eta \right] d\eta \right\}$$

В силу (13) $f(B_1(x, y)) = f(B_2(x, y))$.

Покажем теперь, что при $f(B_1(x, y)) = f(B_2(x, y))$ должны выполняться равенство $B_1(\lambda x, \mu y) = B_2(x, y)$.

Пусть

$$B_1 \left\{ x \int_{a_1}^{b_1} B_1 \left[\xi, \int_{\varphi_1(\xi)}^{\varphi_2(\xi)} B_1(\xi, \eta) d\eta \right] d\xi, y \int_{c_1}^{d_1} B_1 \left[\int_{\psi_1(\eta)}^{\psi_2(\eta)} B_1(\xi, \eta) d\xi, \eta \right] d\eta \right\} =$$

$$= B_2 \left\{ x \int_{a_2}^{b_2} B_2 \left[\xi, \int_{\varphi_1'(\xi)}^{\varphi_2'(\xi)} B_2(\xi, \eta) d\eta \right] d\xi, y \int_{c_2}^{d_2} B_2 \left[\int_{\psi_1^*(\eta)}^{\psi_2^*(\eta)} B_2(\xi, \eta) d\xi, \eta \right] d\eta \right\}. \quad (14)$$

Обозначим

$$x \int_{a_2}^{b_2} B_2 \left[\xi, \int_{\varphi_1'(\xi)}^{\varphi_2'(\xi)} B_2(\xi, \eta) d\eta \right] d\xi = x^*; \quad y \int_{c_2}^{d_2} B_2 \left[\int_{\psi_1^*(\eta)}^{\psi_2^*(\eta)} B_2(\xi, \eta) d\xi, \eta \right] d\eta = y^*.$$

Отсюда

$$x = \frac{x^*}{\int_{a_2}^{b_2} B_2 \left[\xi, \int_{\varphi_1'(\xi)}^{\varphi_2'(\xi)} B_2(\xi, \eta) d\eta \right] d\xi}; \quad y = \frac{y^*}{\int_{c_2}^{d_2} B_2 \left[\int_{\psi_1^*(\eta)}^{\psi_2^*(\eta)} B_2(\xi, \eta) d\xi, \eta \right] d\eta}.$$

Подставляем x, y в выражение (14):

$$B_2(x^*, y^*) = B_1 \left\{ x^* \frac{\int_{a_1}^{b_1} B_1 \left[\xi, \int_{\varphi_1(\xi)}^{\varphi_2(\xi)} B_1(\xi, \eta) d\eta \right] d\xi}{\int_{c_2}^{d_2} B_2 \left[\xi, \int_{\varphi_1(\xi)}^{\varphi_2(\xi)} B_2(\xi, \eta) d\eta \right] d\xi}; \right.$$

$$\left. y^* \frac{\int_{c_1}^{d_1} B_1 \left[\int_{\psi_1(\eta)}^{\psi_2(\eta)} B_1(\xi, \eta) d\xi, \eta \right] d\eta}{\int_{c_2}^{d_2} B_2 \left[\int_{\psi_1(\eta)}^{\psi_2(\eta)} B_2(\xi, \eta) d\xi, \eta \right] d\eta} \right\}.$$

Обозначим

$$\lambda = \frac{\int_{a_1}^{b_1} B_1 \left[\xi, \int_{\varphi_1(\xi)}^{\varphi_2(\xi)} B_1(\xi, \eta) d\eta \right] d\xi}{\int_{c_2}^{d_2} B_2 \left[\xi, \int_{\varphi_1(\xi)}^{\varphi_2(\xi)} B_2(\xi, \eta) d\eta \right] d\xi}; \quad \mu = \frac{\int_{c_1}^{d_1} B_1 \left[\int_{\psi_1(\eta)}^{\psi_2(\eta)} B_1(\xi, \eta) d\xi, \eta \right] d\eta}{\int_{c_2}^{d_2} B_2 \left[\int_{\psi_1(\eta)}^{\psi_2(\eta)} B_2(\xi, \eta) d\xi, \eta \right] d\eta}.$$

Тогда $B_1(\lambda x^*, \mu y) = B_2(x^*, y^*)$, а после замены переменных $\{x^* = x, y^* = y\}$ $B_1(\lambda x, \mu y) = B_2(x, y)$, что и требовалось доказать.

Аналогично можно доказать равносильность остальных введенных аксиом и предложенных моделей нормализации.

Согласно изложенным аксиоматическим требованиям, обосновывающим построение математических моделей нормализации зрительных образов, разработана теория инвариантных преобразований зрительных образов в пространстве изображений [4—6]. В связи с этим зрительные картины, подвергнутые ряду

преобразований, можно приводить к некоторому эталонному виду, что следует использовать в технических устройствах, реализующих процессы нормализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шульгин И. В., Лопатченко Б. К., Пильщиков Б. В. Математическое моделирование восприятия человеком монокулярного зрительного пространства.— В сб.: Проблемы бионики. Вып. 9. Харьков, 1972, с. 49—53.
2. Глезер В. Д. Механизмы опознавания зрительных образов. Л., «Наука», 1966. 286 с.
3. Путятин Е. П., Шульгин И. В., Лопатченко Б. К., Юрченко В. П. Психофизическое исследование механизмов нормализации человеком зрительных картин.— В сб.: Проблемы бионики. Вып. 6. Харьков, 1971, с. 26—30.
4. Путятин Е. П., Лопатченко Б. К., Левиков В. Б., Сердюченко В. Я. Нормализация изображений при изменении яркости и контрастности.— В сб.: Проблемы бионики. Вып. 11. Харьков, 1973, с. 15—21.
5. Путятин Е. П., Шульгин И. В., Юрченко В. П. Построение инвариантов смещения и поворота зрительных картин.— В сб.: Биологическая медицинская кибернетика и бионика. Вып. 3. Ин-т кибернетики АН УССР, Киев, 1970, с. 86—89.
6. Путятин Е. П., Шульгин И. В., Юрченко В. П., Абрамов О. М. К вопросу о моделировании механизмов нормализации зрительных образов.— В сб.: Проблемы бионики. Вып. 5. Харьков, 1970, с. 28—31.

УДК 62.506.2

Ю. А. КУМАНИН, инж

ОБРАБОТКА ЦВЕТОВЫХ СИГНАЛОВ ПРОТИВОПОЛОЖНО-ЦВЕТОВЫМИ РЕЦЕПТИВНЫМИ ПОЛЯМИ НА РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ ЗРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА. СООБЩЕНИЕ I

Зрительная информация при обработке в зрительном анализаторе последовательно проходит ряд его уровней, где осуществляются кодирование, выделение существенных признаков, запоминание и воспроизведение, анализ и синтез зрительных сигналов. Слой фоторецепторов является первым уровнем зрительной системы, воспринимающим всю необходимую информацию из внешнего мира. В дальнейшем зрительная информация обрабатывается в сетчатке, рецептивные поля которой выделяют определенные признаки сигналов, поступающих из слоя рецепторов.

У приматов большая часть зрительных волокон (аксонов ганглиозных клеток сетчатки) оканчивается в наружном коллатеральном теле (НКТ). Рецептивные поля НКТ, состоящие из рецептивных полей сетчатки [8—10]*, выделяют из сигналов сет-

чатки еще ряд признаков. В свою очередь, НКТ через зрительную радиацию связано со зрительной корой головного мозга.

В зрительной коре выделено три основных типа клеток, которые по структуре своих рецептивных полей классифицированы как простые, сложные и сверхсложные [1—4]. Рецептивные поля простых клеток коры построены из полей НКТ. Поля сложных клеток состоят из полей простых клеток, а рецептивные поля сверхсложных клеток получены путем объединения полей сложных клеток. Следовательно, зрительную кору можно разбить на три уровня, по которым последовательно проходит зрительный сигнал.

Сетчатка, НКТ и, несомненно, кора связаны с другими нервными центрами, но количество этих связей незначительно по сравнению с рассмотренными выше, и в первом приближении их можно не учитывать.

Рассмотрим зрительный анализатор как многослойную нейронную сеть. Используя аппарат интегральных преобразований [5], можно определить подпороговую реакцию каждого уровня на данный входной сигнал, а также существенные признаки, выделяемые на каждом уровне.

Математическая модель обработки информации в зрительном анализаторе

Последовательно определим реакции каждого слоя зрительного анализатора на световой сигнал $I(\vec{x}, \lambda)$, считая входным сигналом последующего уровня выходной сигнал (реакцию) предыдущего уровня зрительного анализатора.

1. Реакция рецепторного слоя

$$P_p^i(\vec{x}) = \int_{-\infty}^{\infty} f_i(\vec{x}, \lambda) I(\vec{x}, \lambda) d\lambda = \int_{-\infty}^{\infty} \iint_{R^2} \delta(\vec{x} - \vec{x}') \times \\ \times f_i(\vec{x}, \lambda) I(\vec{x}, \lambda) dx'd\lambda, \quad (1)$$

где $f_i(\vec{x}, \lambda)$ — спектральная чувствительность i -го рецептора; i — тип рецептора, равный 1, 2, ..., n ,

$$\vec{x} = (x_1, x_2);$$

$$P_p^i(\vec{x}) = \iiint_{-\infty}^{\infty} G_p^i(\vec{x} - \vec{x}', \lambda) I(\vec{x}, \lambda) dx'd\lambda, \quad (2)$$

где $G_p^i(\vec{x} - \vec{x}', \lambda) = \delta(\vec{x} - \vec{x}') f_i(\vec{x}', \lambda)$ — функция влияния слоя рецепторов.

Реакция сетчатки

$$P_c^i(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n \iint_{R^2} G_c^i(\vec{x} - \vec{x}') P_p^i(\vec{x}') dx' =$$

* Литературу см. в сообщении II (ст. в настоящем сборнике).

$$\begin{aligned}
&= \sum_{i=1}^n \iiint_{R^2} G_i^l(\vec{x} - \vec{x}') \delta(\vec{x}' - \vec{x}'') f_i(\vec{x}'', \lambda) I(\vec{x}'', \lambda) \times \\
&\quad \times d\lambda d\vec{x}'' d\vec{x}' = \iiint_{-\infty R^2} G_i^l(\vec{x} - \vec{x}', \lambda) I(\vec{x}'', \lambda) d\vec{x}'' d\vec{x}' d\lambda, \quad (3)
\end{aligned}$$

где j — индекс, указывающий на тип рецептивного поля сетчатки, $j = 1, 2, \dots, m$;

$G_i^l(\vec{x} - \vec{x}')$ — функция влияния рецептивного поля сетчатки;

$G_i^l(\vec{x} - \vec{x}'', \lambda)$ — функция влияния сетчатки;

$$G_i^l(\vec{x} - \vec{x}'', \lambda) = \sum_{i=1}^n \iiint_{R^2} G_i^l(\vec{x} - \vec{x}') \delta(\vec{x}' - \vec{x}'') f_i(\vec{x}'', \lambda) d\vec{x}'. \quad (4)$$

3. Реакция НКТ

$$\begin{aligned}
P_j^\alpha(\vec{x}) &= \sum_{i=1}^m \iiint_{R^2} G_j^\alpha(\vec{x} - \vec{x}') P_i^l(\vec{x}') d\vec{x}' = \\
&= \sum_{i=1}^m \iiint_{R^2} G_j^\alpha(\vec{x} - \vec{x}') \sum_{i=1}^n \iiint_{R^2} G_i^l(\vec{x}' - \vec{x}'') \iiint_{-\infty R^2} (\vec{x}'' - \vec{x}^{III}) \times \\
&\quad \times f_i(\vec{x}^{III}, \lambda) I(\vec{x}^{III}, \lambda) d\lambda d\vec{x}^{III} d\vec{x}'' d\vec{x}' = \\
&= \iiint_{-\infty R^2} G_j^\alpha(\vec{x} - \vec{x}^{III}, \lambda) I(\vec{x}^{III}, \lambda) d\vec{x}^{III} d\lambda, \quad (5)
\end{aligned}$$

где $G_j^\alpha(\vec{x} - \vec{x}')$ — функция влияния рецептивного поля НКТ;

$G_j^\alpha(\vec{x} - \vec{x}', \lambda)$ — функция влияния слоя клеток НКТ;

$\gamma\alpha$ — индекс рецептивного поля НКТ, $\alpha = 1, 2, \dots, r$;

$$\begin{aligned}
G_j^\alpha(\vec{x} - \vec{x}^{III}, \lambda) &= \sum_{i=1}^m \iiint_{R^2} G_j^\alpha(\vec{x} - \vec{x}') \sum_{i=1}^n \iiint_{R^2} G_i^l(\vec{x}' - \vec{x}'') \times \\
&\quad \times \delta(\vec{x}'' - \vec{x}^{III}) f_i(\vec{x}^{III}, \lambda) d\vec{x}'' d\vec{x}'. \quad (6)
\end{aligned}$$

4. Реакция простых клеток коры

$$\begin{aligned}
P_{\gamma\alpha}^{n\alpha}(\vec{x}) &= \sum_{\gamma=1}^r \iiint_{R^2} G_{\gamma\alpha}^{n\alpha}(\vec{x} - \vec{x}') P_\gamma^\alpha(\vec{x}') d\vec{x}' = \\
&= \sum_{\gamma=1}^r \iiint_{R^2} G_{\gamma\alpha}^{n\alpha}(\vec{x} - \vec{x}') \sum_{i=1}^m \iiint_{R^2} G_j^\alpha(\vec{x}' - \vec{x}'') \sum_{i=1}^n \iiint_{R^2} G(\vec{x}'' - \vec{x}^{III}) \times \\
&\quad \times \iiint_{R^2} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\vec{x}^{III} - \vec{x}^{IV}) I(\vec{x}^{IV}, \lambda) f_i(\vec{x}^{IV}, \lambda) d\vec{x}^{IV} d\vec{x}^{III} d\vec{x}'' \times \\
&\quad \times d\vec{x}' d\lambda = \iiint_{-\infty R^2} G_{\gamma\alpha}^{n\alpha}(\vec{x} - \vec{x}^{IV}, \lambda) I(\vec{x}^{IV}, \lambda) d\vec{x}^{IV} d\lambda, \quad (7)
\end{aligned}$$

де $G_{\gamma\alpha}^{na}(\vec{x} - \vec{x}')$ — функция влияния простого поля коры;
 $G_{\gamma\alpha}^{na}(\vec{x} - \vec{x}^{IV}, \lambda)$ — функция влияния слоя простых клеток коры;
 α — индекс простого поля коры, $\alpha = 1, 2, \dots, l$;

$$G_{\gamma\alpha}^{na}(\vec{x} - \vec{x}^{IV}, \lambda) = \sum_{\gamma=1}^r \iint_{R^2} G_{\gamma\alpha}^{na}(\vec{x} - \vec{x}') \sum_{j=1}^m \iint_{R^2} G_j^{\alpha}(\vec{x}' - \vec{x}'') \times \\ \times \sum_{i=1}^n \iint_{R^2} G_i^j(\vec{x}'' - \vec{x}^{III}) f_i(\vec{x}^{IV}, \lambda) \delta(\vec{x}^{III} - \vec{x}^{IV}) d\vec{x}^{III} d\vec{x}'' d\vec{x}'. \quad (8)$$

5. Реакция сложных клеток коры

$$P_{\alpha}^{ca}(\vec{x}) = \sum_{\alpha=1}^l \iint_{R^2} G_{\alpha}^{ca}(\vec{x} - \vec{x}') P_{\gamma\alpha}^{na}(\vec{x}') d\vec{x}' = \\ = \sum_{\alpha=1}^l \iint_{R^2} G_{\alpha}^{ca}(\vec{x} - \vec{x}') \sum_{\gamma=1}^r \iint_{R^2} G_{\gamma\alpha}^{na}(\vec{x}' - \vec{x}'') \times \\ \times \sum_{j=1}^m \iint_{R^2} C_j^{\alpha}(\vec{x}'' - \vec{x}^{III}) \sum_{i=1}^n \iint_{R^2} G_i^j(\vec{x}^{III} - \vec{x}^{IV}) \iint_{R^2} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\vec{x}^{IV} - \vec{x}^V) \times \\ \times f_i(\vec{x}^V, \lambda) I(\vec{x}^V, \lambda) d\lambda d\vec{x}^V d\vec{x}^{IV} d\vec{x}^{III} d\vec{x}'' d\vec{x}' = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \iint_{R^2} G_{\alpha}^{ca}(\vec{x} - \vec{x}^V, \lambda) I(\vec{x}^V, \lambda) d\vec{x}^V d\lambda, \quad (9)$$

где $G_{\alpha}^{ca}(\vec{x} - \vec{x}')$ — функция влияния рецептивного поля сложной клетки коры;

$G_{\alpha}^{ca}(\vec{x} - \vec{x}^V, \lambda)$ — функция влияния слоя сложных клеток коры;
 α — индекс рецептивного поля сложной клетки коры, $\alpha = 1, 2, \dots, g$;

$$G_{\alpha}^{ca}(\vec{x} - \vec{x}^V, \lambda) = \sum_{\alpha=1}^l \iint_{R^2} C_{\alpha}^{ca}(\vec{x} - \vec{x}') \sum_{\gamma=1}^r \iint_{R^2} G_{\gamma\alpha}^{na}(\vec{x}' - \vec{x}'') \times \\ \times \sum_{j=1}^m \iint_{R^2} G_j^{\alpha}(\vec{x}'' - \vec{x}^{III}) \sum_{i=1}^n \iint_{R^2} G_i^j(\vec{x}^{III} - \vec{x}^{IV}) \delta(\vec{x}^{IV} - \vec{x}^V) f_i(\vec{x}^V, \lambda) \times \\ \times d\vec{x}^{IV} d\vec{x}^{III} d\vec{x}'' d\vec{x}'. \quad (10)$$

6. Реакция сверхсложных клеток коры

$$P_{ca}^{ha}(\vec{x}) = \sum_{ca=1}^g \iint_{R^2} G_{ca}^{ha}(\vec{x} - \vec{x}') \sum_{\alpha=1}^l \iint_{R^2} G_{\alpha}^{ca}(\vec{x}' - \vec{x}'') \times \\ \times \sum_{\gamma=1}^r \iint_{R^2} G_{\gamma\alpha}^{na}(\vec{x}'' - \vec{x}^{III}) \sum_{j=1}^m \iint_{R^2} G_j^{\alpha}(\vec{x}^{III} - \vec{x}^{IV}) \times \\ \times \sum_{i=1}^n \iint_{R^2} G_i^j(\vec{x}^{IV} - \vec{x}^V) \iint_{R^2} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\vec{x}^V - \vec{x}^{VI}) f_i(\vec{x}^{VI}, \lambda) \times$$

$$\begin{aligned} & \times I(\vec{x}^{VI}, \lambda) d\lambda d\vec{x}^{VI} d\vec{x}^V d\vec{x}^{IV} d\vec{x}^{III} d\vec{x}^{\prime} = \\ & = \int_{-\infty}^{\infty} \iint_{R^3} G_{ca}^{ha}(\vec{x} - \vec{x}^{VI}, \lambda) I(\vec{x}^{VI}, \lambda) d\vec{x}^{VI} d\lambda, \end{aligned} \quad (11)$$

где $G_{ca}^{ha}(\vec{x} - \vec{x}^{\prime})$ — функция влияния рецептивного поля сверхсложной клетки коры;

$G_{ca}^{ha}(\vec{x} - \vec{x}^{VI}, \lambda)$ — функция влияния слоя сверхсложных клеток коры;

ha — индекс сверхсложного поля коры, $a = 1, 2, \dots, q$;

$$\begin{aligned} G_{ca}^{ha}(\vec{x} - \vec{x}^{VI}, \lambda) &= \sum_{ca=1}^g \iint_{R^3} G_{ca}^{ha}(\vec{x} - \vec{x}^{\prime}) \sum_{na=1}^l \iint_{R^2} G_{na}^{ca}(\vec{x}^{\prime} - \vec{x}^{\prime\prime}) \times \\ & \times \sum_{\gamma a=1}^r \iint_{R^3} G_{\gamma a}^{na}(\vec{x}^{\prime\prime} - \vec{x}^{III}) \sum_{j=1}^m \iint_{R^2} G_j^{\gamma a}(\vec{x}^{III} - \vec{x}^{IV}) \times \\ & \times \sum_{i=1}^n \iint_{R^3} G_i^j(\vec{x}^{IV} - \vec{x}^V) \delta(\vec{x}^V - \vec{x}^{VI}) f_i(\vec{x}^{VI}, \lambda) \times \\ & \times d\vec{x}^V d\vec{x}^{IV} d\vec{x}^{III} d\vec{x}^{\prime} d\vec{x}^{\prime\prime}. \end{aligned} \quad (12)$$

Определим функцию влияния $G_j^{\gamma a}(\vec{x} - \vec{x}^{III}, \lambda)$ концентрического цветового рецептивного поля в слое клеток НКТ. Схема построения противоположно-цветовых рецептивных полей НКТ представлена на рис. 1.

Из (6) найдем функцию влияния слоя цветовых рецептивных полей НКТ

$$G_j^{\gamma a}(\vec{x} - \vec{x}^{III}, \lambda) = \sum_{i=1}^m \iint_{R^2} G_j^{\gamma a}(\vec{x} - \vec{x}^{\prime}) G_i^j(\vec{x}^{\prime} - \vec{x}^{III}, \lambda) d\vec{x}^{\prime}; \quad (13)$$

$$G_i^j(\vec{x}^{\prime} - \vec{x}^{III}, \lambda) \in \{ G_i^{j1}(\vec{x}^{\prime} - \vec{x}^{III}, \lambda); G_i^{j2}(\vec{x}^{\prime} - \vec{x}^{III}, \lambda) \}, \quad (14)$$

где $G_i^{j1}(\vec{x}^{\prime} - \vec{x}^{III}, \lambda)$ — функция влияния рецептивного поля сетчатки с оп-центром, чувствительным к свету одной длины волны $\lambda = \lambda_{1m}$ и off-окружением, чувствительным к свету другой длины волны $\lambda = \lambda_{2m}$;

$G_i^{j2}(\vec{x}^{\prime} - \vec{x}^{III}, \lambda)$ — функция влияния рецептивного поля сетчатки с off-центром, чувствительным к свету с длиной волны $\lambda = \lambda_{2m}$, и оп-окружением, чувствительным к свету с длиной волны $\lambda = \lambda_{1m}$.

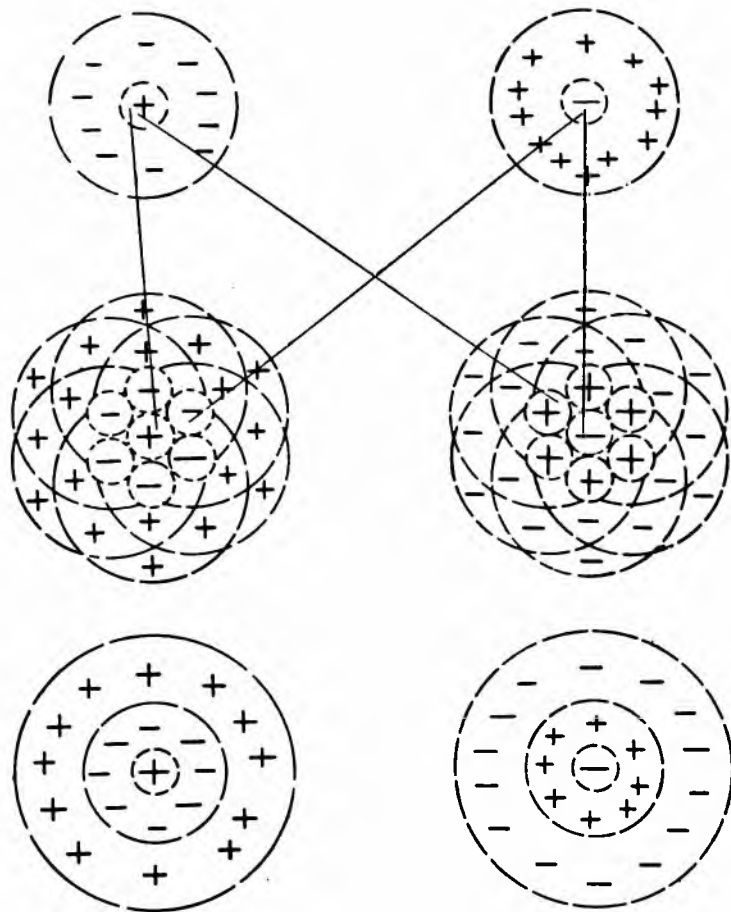
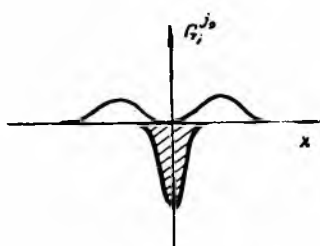
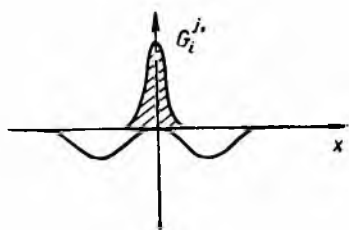


Рис. 1.

Функции влияния рецептивных полей сетчатки имеют вид [7—11]

$$G_i^{j1}(x'_1 - x_1^{111}, x'_2 - x_2^{111}, \lambda) = \{ k_{i1}(\lambda) \gamma_{j1} \times \\ \times e^{-\beta_{j1}^2 [(x'_1 - x_1^{111})^2 + (x'_2 - x_2^{111})^2]} - k_{i2}(\lambda) \times \\ \times \gamma_{j2} [e^{-\beta_{j2}^2 [(x'_1 - x_1^{111})^2 + (x'_2 - x_2^{111})^2]} - \\ - e^{-\beta_{j1}^2 [(x'_1 - x_1^{111})^2 + (x'_2 - x_2^{111})^2]}] \}; \quad (15)$$

$$G_i^{j2}(x'_1 - x_1^{111}, x'_2 - x_2^{111}, \lambda) = \{ -k_{i2}(\lambda) \gamma_{j1} e^{-\beta_{j1}^2 [(x'_1 - x_1^{111})^2 + (x'_2 - x_2^{111})^2]} + \\ + k_{i1}(\lambda) \gamma_{j2} [e^{-\beta_{j2}^2 [(x'_1 - x_1^{111})^2 + (x'_2 - x_2^{111})^2]} - \\ - e^{-\beta_{j1}^2 [(x'_1 - x_1^{111})^2 + (x'_2 - x_2^{111})^2]}] \}; \quad (16)$$

где $k_{i1}(\lambda)$, $k_{i2}(\lambda)$ — коэффициенты, определяющие тип фоторецепторов и степень ослабления их реакции при изменении длины волны падающего света.

Так как поля НКТ являются концентрическими их функции влияния можно представить в виде

$$G_j^\alpha(x_1 - x'_1, x_2 - x'_2) \in \{ G_j^{\alpha 1}(x_1 - x'_1, x_2 - x'_2); G_j^{\alpha 2}(x_1 - x'_1, x_2 - x'_2) \}, \quad (17)$$

где $G_j^{\alpha 1}(x_1 - x'_1, x_2 - x'_2)$ — функция влияния центра рецептивного поля НКТ;

$G_j^{\alpha 2}(x_1 - x'_1, x_2 - x'_2)$ — функция влияния периферии рецептивного поля НКТ;

$$G_j^{\alpha 1}(x_1 - x'_1, x_2 - x'_2) = \gamma_{k1} e^{-\beta_{k1}^2 [(x_1 - x'_1)^2 + (x_2 - x'_2)^2]}. \quad (18)$$

$$G_j^{\alpha 2}(x_1 - x'_1, x_2 - x'_2) = \gamma_{k2} \{ e^{-\beta_{k2}^2 [(x_1 - x'_1)^2 + (x_2 - x'_2)^2]} - \\ - e^{-\beta_{k1}^2 [(x_1 - x'_1)^2 + (x_2 - x'_2)^2]} \}, \quad (19)$$

где γ_{k1} , γ_{k2} — константы, определяющие соотношение между амплитудами реакций центра γ_{k1} и периферии γ_{k2} рецептивного поля НКТ;

β_{k1} , β_{k2} — константы, определяющие размеры центра β_{k1} и периферии β_{k2} поля НКТ.

Подставляя в (13) значения (14)—(19) находим функции влияния противоположно-цветовых рецептивных полей слоя клеток НКТ с оп-центром, off-периферией $G_j^{\alpha 1}(x_1 - x_1^{111}, x_2 - x_2^{111}, \lambda)$ и с off-центром, оп-периферией $G_j^{\alpha 2}(x_1 - x_1^{111}, x_2 - x_2^{111}, \lambda)$:

$$G_i^{j1}(x_1 - x_1^{111}, x_2 - x_2^{111}, \lambda) = \iint_{R^2} \{ G_j^{\alpha 1}(x_1 - x'_1, x_2 - x'_2) \times$$

$$\begin{aligned}
& \times G_i^{l1} (x_1^r - x_1^{l11}, x_2^r - x_2^{l11}, \lambda) + G_j^{l2} (x_1 - x_1^r, x_2 - x_2^r) \times \\
& \times G_i^{l1} (x_1' - x_1^{l11}, x_2' - x_2^{l11}, \lambda) \} dx_1' dx_2' = \pi [a_1^2 k_{l1}(\lambda) \times \\
& \times e^{-b_{k1}^2 \rho^2} - a_2^2 k_{l2}(\lambda) e^{-b_{k2}^2 \rho^2} + a_3^2 k_{l2}(\lambda) e^{-b_{k3}^2 \rho^2} - \\
& - a_4^2 k_{l2}(\lambda) e^{-b_{k4}^2 \rho^2} + a_5^2 k_{l1}(\lambda) e^{-b_{k5}^2 \rho^2} - a_6^2 k_{l1}(\lambda) e^{-b_{k6}^2 \rho^2} + \\
& + a_7^2 k_{l2}(\lambda) e^{-b_{k7}^2 \rho^2} - a_8^2 k_{l1}(\lambda) e^{-b_{k8}^2 \rho^2} + a_9^2 k_{l1}(\lambda) e^{-b_{k9}^2 \rho^2}] = \\
& = \pi (-1)^{n+1} \sum_{n=1}^9 a_{1kn} e^{-b_{kn}^2 \rho^2}, \tag{20}
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
\rho^2 &= (x_1 - x_1^{l11})^2 + (x_2 - x_2^{l11})^2; \\
a_1^2 &= \frac{\gamma_{k1} \gamma_{j1}}{\beta_{k1}^2 + \beta_{j1}^2}; \quad a_{(1k)_1}^2 = a_1^2 k_{l1}(\lambda); \quad b_{k1}^2 = \frac{\beta_{k1}^2 \beta_{j1}^2}{\beta_{k1}^2 + \beta_{j1}^2}; \\
a_2^2 &= \frac{\gamma_{k1} \gamma_{j1}}{\beta_{k1}^2 + \beta_{j2}^2}; \quad a_{(1k)_2}^2 = a_2^2 k_{l2}(\lambda); \quad b_{k2}^2 = \frac{\beta_{k1}^2 \beta_{j2}^2}{\beta_{k1}^2 + \beta_{j2}^2}; \\
a_3^2 &= \frac{\gamma_{k1} \gamma_{j2}}{\beta_{k1}^2 + \beta_{j1}^2}; \quad a_{(1k)_3}^2 = a_3^2 k_{l2}(\lambda); \quad b_{k3}^2 = \frac{\beta_{k1}^2 \beta_{j1}^2}{\beta_{k1}^2 + \beta_{j1}^2}; \\
a_4^2 &= \frac{\gamma_{k2} \gamma_{j1}}{\beta_{k2}^2 + \beta_{j1}^2}; \quad a_{(1k)_4}^2 = a_4^2 k_{l2}(\lambda); \quad b_{k4}^2 = \frac{\beta_{k2}^2 \beta_{j1}^2}{\beta_{k2}^2 + \beta_{j1}^2}; \\
a_5^2 &= \frac{\gamma_{k2} \gamma_{j2}}{\beta_{k2}^2 + \beta_{j2}^2}; \quad a_{(1k)_5}^2 = a_5^2 k_{l1}(\lambda); \quad b_{k5}^2 = \frac{\beta_{k2}^2 \beta_{j2}^2}{\beta_{k2}^2 + \beta_{j2}^2}; \\
a_6^2 &= \frac{\gamma_{k2} \gamma_{j2}}{\beta_{k2}^2 + \beta_{j1}^2}; \quad a_{(1k)_6}^2 = a_6^2 k_{l1}(\lambda); \quad b_{k6}^2 = \frac{\beta_{k2}^2 \beta_{j1}^2}{\beta_{k2}^2 + \beta_{j1}^2}; \\
a_7^2 &= \frac{\gamma_{k2} \gamma_{j1}}{\beta_{k1}^2 + \beta_{j1}^2}; \quad a_{(1k)_7}^2 = a_7^2 k_{l2}(\lambda); \quad b_{k7}^2 = \frac{\beta_{k1}^2 \beta_{j1}^2}{\beta_{k1}^2 + \beta_{j1}^2}; \\
a_8^2 &= \frac{\gamma_{k2} \gamma_{j2}}{\beta_{k1}^2 + \beta_{j2}^2}; \quad a_{(1k)_8}^2 = a_8^2 k_{l1}(\lambda); \quad b_{k8}^2 = \frac{\beta_{k1}^2 \beta_{j2}^2}{\beta_{k1}^2 + \beta_{j2}^2}; \\
a_9^2 &= \frac{\gamma_{k2} \gamma_{j2}}{\beta_{k1}^2 + \beta_{j2}^2}; \quad a_{(1k)_9}^2 = a_9^2 k_{l1}(\lambda); \quad b_{k9}^2 = \frac{\beta_{k1}^2 \beta_{j1}^2}{\beta_{k1}^2 + \beta_{j1}^2};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
G_j^{l2} (x_1 - x_1^{l11}, x_2 - x_2^{l11}, \lambda) &= \iint_{R^2} \{ G_j^{l2} (x_1 - x_1', x_2 - x_2') \times \\
& \times G_i^{l2} (x_1 - x_1^{l11}, x_2 - x_2^{l11}, \lambda) + G_j^{l1} (x_1 - x_1', x_2 - x_2') \times \\
& \times G_i^{l2} (x_1 - x_1^{l11}, x_2 - x_2^{l11}, \lambda) \} dx_1' dx_2' = \\
& = \pi (-1)^n \sum_{n=1}^9 a_{(2k)n}^2 e^{-b_{kn}^2 \rho^2}, \tag{21}
\end{aligned}$$

где

$$a_{(2k)_1}^2 = a_1^2 k_{i2}(\lambda); \quad a_{(2k)_2}^2 = a_2^2 k_{i1}(\lambda); \quad a_{(2k)_3}^2 = a_3^2 k_{i1}(\lambda); \quad a_{(2k)_4}^2 = a_4^2 k_{i1}(\lambda);$$

$$a_{(2k)_5}^2 = a_5^2 k_{i2}(\lambda); \quad a_{(2k)_6}^2 = a_6^2 k_{i2}(\lambda); \quad a_{(2k)_7}^2 = a_7^2 k_{i1}(\lambda); \quad a_{(2k)_8}^2 = a_8^2 k_{i2}(\lambda);$$

$$a_{(2k)_9}^2 = a_9^2 k_{i2}(\lambda).$$

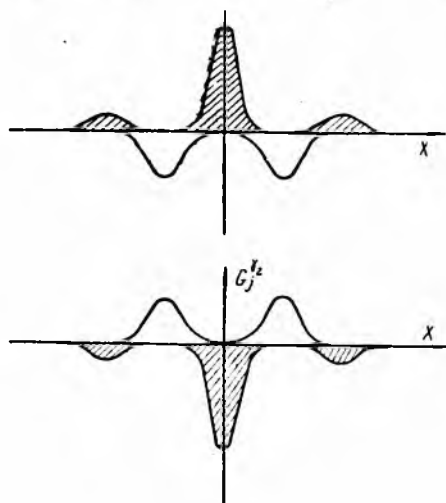


Рис. 2.

При освещении сетчатки монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = \lambda_{1m}$ коэффициенты $k_{i1}(\lambda) = 1$ и $k_{i2}(\lambda) < 1$, а при освещении светом с длиной волны $\lambda = \lambda_{2m}$ и величины $k_{i1}(\lambda) < 1$ и $k_{i2}(\lambda) = 1$.

С учетом соотношений между размерами центра и периферии рецептивного поля, между амплитудами их реакций, а также значений коэффициентов $k_{i1}(\lambda)$, $k_{i2}(\lambda)$ функции влияния противоположно-цветовых рецептивных полей НКТ показаны графически (рис. 2).

УДК 62.506.2

Ю. А. КУМАНИН, инж.

ОБРАБОТКА ЦВЕТОВЫХ СИГНАЛОВ ПРОТИВОПОЛОЖНО-ЦВЕТОВЫМИ РЕЦЕПТИВНЫМИ ПОЛЯМИ НА РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ ЗРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА. СООБЩЕНИЕ II

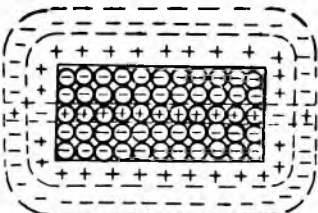
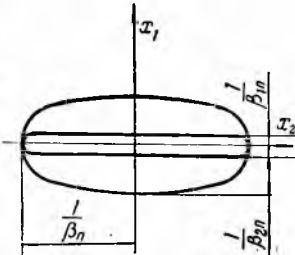
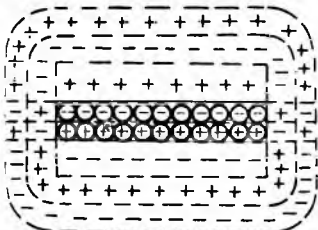
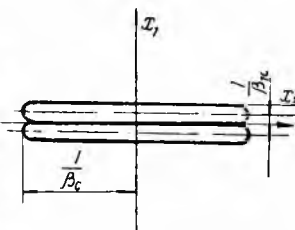

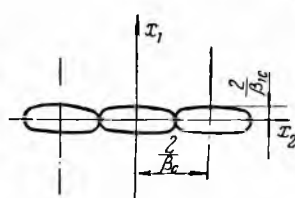
Простые цветовые рецептивные поля коры

По структуре и специфике реакций цветовые рецептивные поля коры отличаются от цветовых полей сетчатки и НКТ [1—4]. Простые цветовые поля коры состоят из полей НКТ и имеют прямоугольную форму. Поле включает в себя узкую центральную часть и более обширную периферийную область. Структура простого цветового рецептивного поля коры представлена в табл. 1.

Центральная область состоит из цветовых рецептивных полей НКТ с оп-центром и off-периферией (поля НКТ идентичны по спектральным свойствам). Периферия состоит из полей НКТ с off-центром и оп-периферией. Спектральные чувствительности центра и периферии простого цветового рецептивного поля коры

противоположны, что указывает на сохранение антагонизма центра и периферии.

Таблица 1

Тип поля коры	Структура рецептивного поля коры	Аппроксимация рецептивного поля коры
Простое		
Сложное		
Сверхсложное		

Функция влияния противоположно-цветовых простых рецептивных полей коры в слое простых цветовых клеток коры определяем из (8) (см. статью в настоящем сборнике: Ю. А. Куманин, Сообщение 1):

$$G_{\gamma\alpha}^{n\alpha}(\vec{x} - \vec{x}^{IV}, \lambda) = \sum_{\gamma\alpha=1R^2} \iint G_{\gamma\alpha}^{n\alpha}(\vec{x} - \vec{x}') G_{\gamma}^{\alpha}(\vec{x}' - \vec{x}^{IV}, \lambda) dx'; \quad (1)$$

$$G_{\gamma}^{\alpha}(\vec{x} - \vec{x}^{IV}, \lambda) = \sum_{j=1}^m \iint_{R^2} G_j^{\alpha}(\vec{x} - \vec{x}') \sum_{i=1}^n \iint_{R^2} G_i^{\alpha}(\vec{x}' - \vec{x}^{III}) \times$$

$$\times \delta(\vec{x}^{III} - \vec{x}^{IV}) f_i(\vec{x}^{IV}, \lambda) d\vec{x}^{III} d\vec{x}^{IV};$$

$$G_{\gamma\alpha}^{na}(x_1 - x_1^{IV}, x_2 - x_2^{IV}, \lambda) = \sum_{\gamma\alpha=1}^r \iint_{R^2} G_{\gamma\alpha}^{na}(x_1 - x_1', x_2 - x_2') \times \\ \times G_j^{\gamma\alpha}(x_1' - x_1^{IV}, x_2' - x_2^{IV}, \lambda) dx_1'; dx_2'; \quad (2)$$

$$G_j^{\gamma\alpha}(x_1' - x_1^{IV}, x_2' - x_2^{IV}, \lambda) \in \{G_j^{\gamma 1}(x_1' - x_1^{IV}, x_2' - x_2^{IV}, \lambda); \\ G_j^{\gamma 2}(x_1' - x_1^{IV}, x_2' - x_2^{IV}, \lambda)\}. \quad (3)$$

На основании формы простого рецептивного поля коры в табл. 1 предлагается его аппроксимация.

Функции влияния простых цветовых рецептивных полей коры определяем из выражений

$$G_{\gamma\alpha}^{na}(x_1 - x_1', x_2 - x_2') \in \{G_{\gamma\alpha}^{n1}(x_1 - x_1', x_2 - x_2'); \\ G_{\gamma\alpha}^{n2}(x_1 - x_1', x_2 - x_2')\}, \quad (4)$$

где $G_{\gamma\alpha}^{n1}(x_1 - x_1', x_2 - x_2')$ — функция влияния центра простого цветового рецептивного поля коры;

$G_{\gamma\alpha}^{n2}(x_1 - x_1', x_2 - x_2')$ — функция влияния периферии простого цветового рецептивного поля коры;

$$G_{\gamma\alpha}^{n1}(x_1 - x_1', x_2 - x_2') = \gamma_{n1} e^{-[\beta_{1n}^2(x_1 - x_1')^2 + \beta_n^2(x_2 - x_2')^2]}; \quad (5)$$

$$G_{\gamma\alpha}^{n2}(x_1 - x_1', x_2 - x_2') = \gamma_{n2} \{e^{-[\beta_{2n}^2(x_1 - x_1')^2 + \beta_n^2(x_2 - x_2')^2]} - \\ - e^{-[\beta_{1n}^2(x_1 - x_1')^2 + \beta_n^2(x_2 - x_2')^2]}\}, \quad (6)$$

где γ_{n1} , γ_{n2} — константы, определяющие соотношение между амплитудами реакций центра γ_{n1} и периферии γ_{n2} простого рецептивного поля коры;

β_{1n} , β_{2n} , β_n — константы, определяющие размеры центра β_{1n} , β_n и периферии β_{2n} , β_n простого поля коры.

Подставляя в (2) соотношения (3) — (6), после ряда промежуточных преобразований находим функции влияния противоположно-цветовых рецептивных полей в слое простых клеток коры с оп-центром, off-периферией $G_{\gamma\alpha}^{n1}(x_1 - x_1^{IV}, x_2 - x_2^{IV}, \lambda)$ и off-центром, оп-периферией $G_{\gamma\alpha}^{n2}(x_1 - x_1^{IV}, x_2 - x_2^{IV}, \lambda)$:

$$G_{\gamma\alpha}^{n1}(x_1 - x_1^{IV}, x_2 - x_2^{IV}, \lambda) = \pi^2 (-1)^{n+1} \sum_{n+1}^9 \{ -a_{(2n1)_n}^2 \times \\ \times e^{-[b_{(2n)_n}^2(x_1 - x_1^{IV})^2 + d_{nn}^2(x_2 - x_2^{IV})^2]} + \\ + [a_{(1n1)_n}^2 + a_{(3n1)_n}^2] e^{-[b_{(1n)_n}^2(x_1 - x_1^{IV})^2 + d_{nn}^2(x_2 - x_2^{IV})^2]} \}, \quad (7)$$

$$\text{где } a_{(1n1)_n}^2 = \frac{\gamma_{n1} a_{(1k)_n}^2}{\sqrt{(b_{kn}^2 + \beta_{1n})(b_{kn}^2 + \beta_n)}}; \quad b_{(1n)_n}^2 = \frac{b_{kn}^2 \beta_{1n}}{b_{kn}^2 + \beta_{1n}};$$

$$a_{(2n1)_n}^2 = \frac{\gamma_{n2} a_{(1k)_n}^2}{\sqrt{(b_{k_n}^2 + \beta_{2n})(b_{k_n}^2 + \beta_n)}}; \quad b_{(2n)_n}^2 = \frac{b_{k_n}^2 \beta_{2n}}{b_{k_n}^2 + \beta_{2n}};$$

$$a_{(3n1)_n}^2 = \frac{\gamma_{n2} a_{(1k)_n}^2}{\sqrt{(b_{k_n}^2 + \beta_{1n})(b_{k_n}^2 + \beta_n)}}; \quad d_{n_n}^2 = \frac{b_{k_n}^2 \beta_n}{b_{k_n}^2 + \beta_n};$$

$$G_{\gamma\alpha}^{n2}(x_1 - x_1^{IV}, x_2 - x_2^{IV}, \lambda) = \pi^2 (-1)^n \sum_{n=1}^9 \left\{ -a_{(1n2)_n}^2 \times \right. \\ \times e^{-[b_{(2n)_n}^2 (x_1 - x_1^{IV})^2 + d_{n_n}^2 (x_2 - x_2^{IV})^2]} + \\ \left. + [a_{(2n2)_n}^2 + a_{(3n2)_n}^2] e^{-[b_{(1n)_n}^2 (x_1 - x_1^{IV})^2 + d_{n_n}^2 (x_2 - x_2^{IV})^2]} \right\}, \quad (8)$$

где

$$a_{(1n2)_n}^2 = \frac{a_{(1k)_n}^2 \gamma_{n2}}{\sqrt{(b_{k_n}^2 + \beta_{2n})(b_{k_n}^2 + \beta_n)}};$$

$$a_{(2n2)_n}^2 = \frac{a_{(2k)_n}^2 \gamma_{n2}}{\sqrt{(b_{k_n}^2 + \beta_{1n})(b_{k_n}^2 + \beta_n)}};$$

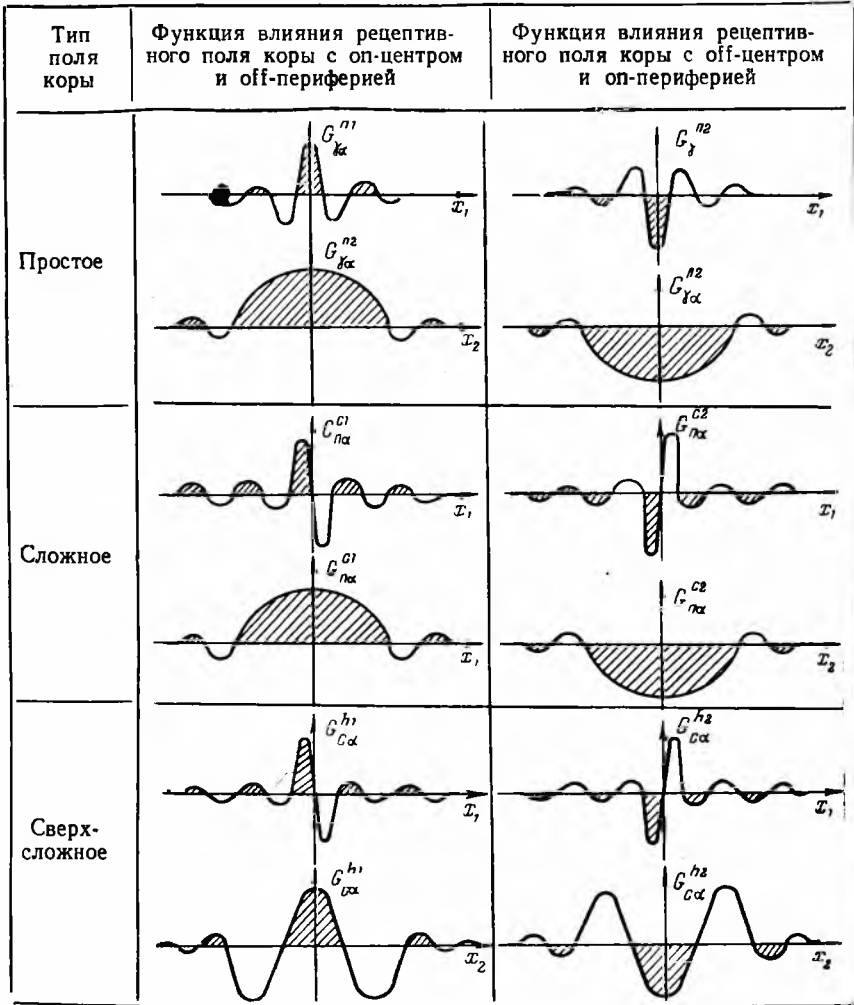
$$a_{(3n2)_n}^2 = \frac{a_{(1k)_n}^2 \gamma_{n1}}{\sqrt{(b_{k_n}^2 + \beta_{1n})(b_{k_n}^2 + \beta_n)}}.$$

В табл. 2 графически представлены функции влияния $G_{\gamma\alpha}^{n1}(x_1 - x_1^{IV}, x_2 - x_2^{IV}, \lambda)$ и $G_{\gamma\alpha}^{n2}(x_1 - x_1^{IV}, x_2 - x_2^{IV}, \lambda)$ простых цветовых полей коры.

Сложные цветовые рецептивные поля коры

Свойства сложных полей коры, построенных из ее простых полей, многообразнее, чем у полей низших уровней [1—4]. Вследствие своей структуры сложные цветовые поля коры могут, кроме цветовых характеристик стимула, выделять определенное направление движения стимула, его форму и ориентацию. Когда стимул определенной формы и цвета движется в предпочтительном для рецептивного поля направлении, реакция поля максимальна; при движении в других направлениях она меньше или совсем отсутствует. Разная реакция сложных полей на стимулы одного цвета, но разной формы свидетельствует о различном строении сложных рецептивных полей коры.

Таблица 2



Рассмотрим сложные цветовые рецептивные поля коры, которые выделяют направление движения цветового стимула. Структура такого поля представлена в табл. 1. При движении стимула вверх реакция поля максимальна, в обратном направлении она слаба. Подобное поле состоит из двух простых цветовых рецептивных полей коры с оп- и off-центрами. Функции влияния слоя таких полей $G_{n\alpha}^{ca}(x_1 - x_1^v, x_2 - x_2^v, \lambda)$ находим из (10) (см. Сообщение I):

$$G_{n\alpha}^{ca}(x_1 - x_1^v, x_2 - x_2^v, \lambda) = \sum_{n\alpha=1}^l \iint_{R^2} G_{n\alpha}^{ca}(x_1 - x_1', x_2 - x_2') \times$$

$$\times G_{\gamma a}^{na} (x_1^v - x_1^v, x_2^v - x_2^v, \lambda) dx_1^v dx_2^v; \quad (9)$$

$$G_{na}^{ca} (x_1 - x_1', x_2 - x_2') \in \{G_{na}^{c1} (x_1 - x_1', x_2 - x_2'); \\ G_{na}^{c2} (x_1 - x_1', x_2 - x_2')\}, \quad (10)$$

где $G_{na}^{c1} (x_1 - x_1', x_2 - x_2')$ — функция влияния оп-полоски сложного цветового поля коры;

$G_{na}^{c2} (x_1 - x_1', x_2 - x_2')$ — функция влияния off-полоски сложного цветового рецептивного поля коры;

$$G_{na}^{c1} (x_1 - x_1', x_2 - x_2') = \gamma_{c1} e^{-[\beta_{1c}^2 (x_1 - x_1' + \beta_{1c})^2 + \beta_c^2 (x_2 - x_2')^2]}; \quad (11)$$

$$G_{na}^{c2} (x_1 - x_1', x_2 - x_2') = \gamma_{c2} e^{-[\beta_{1c}^2 (x_1 - x_1' - \beta_{1c})^2 + \beta_c^2 (x_2 - x_2')^2]}, \quad (12)$$

где β_{1c}, β_c — константы, определяющие размеры оп- и off-зон сложного поля коры;

γ_{c1}, γ_{c2} — константы, определяющие амплитуды реакций оп- γ_{c1} и off- γ_{c2} зон сложного цветового поля коры.

После подстановки в (10) соотношений (7), (8), (11), (12) определим функцию влияния сложного цветового поля коры:

$$G_{na}^{c1} (x_1 - x_1^v, x_2 - x_2^v, \lambda) = \pi^3 (-1)^{n+1} \sum_{n=1}^9 \{a_{(c1)n}^2 \times \\ \times e^{-[b_{(1c)n}^2 (x_1 - x_1^v + \beta_{1c})^2 + d_{cn}^2 (x_2 - x_2^v)^2]} - \\ - a_{(c2)n}^2 e^{-[b_{(c2)n}^2 (x_1 - x_1^v - \beta_{1c})^2 + d_{cn}^2 (x_2 - x_2^v)^2]}\}, \quad (13)$$

$$\text{где } a_{(c1)n}^2 = \frac{\gamma_{c1} (a_{(1n)n}^2 + a_{(3n1)n}^2)}{\sqrt{(b_{(1n)n}^2 + \beta_{1c}^2) (d_{n_n}^2 + \beta_c^2)}}; \quad b_{(c1)n}^2 = \frac{b_{(1n)n}^2 \beta_{1c}^2}{b_{(1n)n}^2 + \beta_{1c}^2};$$

$$a_{(c2)n}^2 = \frac{\gamma_{c2} a_{(2n1)n}^2}{\sqrt{(b_{(2n)n}^2 + \beta_{1c}^2) (d_{n_n}^2 + \beta_c^2)}}; \quad b_{(c2)n}^2 = \frac{b_{(2n)n}^2 \beta_c^2}{b_{(2n)n}^2 + \beta_c^2};$$

$$d_{cn}^2 = \frac{d_{n_n}^2 \beta_c^2}{d_{n_n}^2 + \beta_c^2}.$$

Функция влияния сложного поля коры, выделяющего обратное направление движения стимула противоположного цвета, имеет вид

$$G_{na}^{c2} (x_1 - x_1^v, x_2 - x_2^v, \lambda) = -G_{na}^{c1} (x_1 - x_1^v, x_2 - x_2^v, \lambda). \quad (14)$$

Функции влияния $G_{na}^{c1} (x_1 - x_1^v, x_2 - x_2^v, \lambda)$ и $G_{na}^{c2} (x_1 - x_1^v, x_2 - x_2^v, \lambda)$ сложных цветовых рецептивных полей коры представлены в табл. 2.

Сверхсложные цветовые рецептивные поля коры

Сверхсложные цветовые поля коры, кроме перечисленных свойств, обладают также способностью выделять размеры стимулов. Более длинные стимулы менее эффективны, чем оптимальные [4, 6]. Структура одного из возможных типов сверхсложных полей показана в табл. 1.

Поле условно можно разделить на центр и периферию. Такое поле состоит из двух типов сложных полей коры, описанных выше. На основании (12) (см. Сообщение 1), определяем функцию влияния сверхсложного цветового рецептивного поля коры:

$$G_{ca}^{ha}(x_1 - x_1^{VI}, x_2 - x_2^{VI}, \lambda) = \sum_{ca=1}^n \iint_{R^2} G_{ca}^{ha}(x_1 - x_1', x_2 - x_2') \times \\ \times G_{ca}^{ca}(x_1' - x_1^{VI}, x_2' - x_2^{VI}, \lambda) dx_1' dx_2'; \quad (15)$$

$$G_{ca}^{h1}(x_1 - x_1', x_2 - x_2') \in \{G_{ca}^{h1}(x_1 - x_1', x_2 - x_2'); \\ G_{ca}^{h2}(x_1 - x_1', x_2 - x_2')\}, \quad (16)$$

где $G_{ca}^{h1}(x_1 - x_1', x_2 - x_2')$ — функция влияния центра сверхсложного цветового рецептивного поля коры;

$G_{ca}^{h2}(x_1 - x_1', x_2 - x_2')$ — функция влияния периферии сверхсложного цветового рецептивного поля коры.

Аппроксимация сверхсложного цветового рецептивного поля коры (табл. 1) позволяет записать

$$G_{ca}^{h1}(x_1 - x_1', x_2 - x_2') = \gamma_{h1} e^{-\left[\frac{\beta_{1c}^2}{2}(x_1 - x_1')^2 + \beta_c^2(x_2 - x_2')^2\right]}; \quad (17)$$

$$G_{ca}^{h2}(x_1 - x_1', x_2 - x_2') = \gamma_{h2} \left\{ e^{-\left[\frac{\beta_{1c}^2}{2}(x_1 - x_1')^2 + \beta_c^2\left(x_2 - x_2' - \frac{\beta_c}{2}\right)^2\right]} + \right. \\ \left. + e^{-\left[\frac{\beta_{1c}^2}{4}(x_1 - x_1')^2 + \beta_c^2\left(x_2 - x_2' + \frac{\beta_c}{2}\right)^2\right]} \right\}; \quad (18)$$

где γ_{h1} , γ_{h2} — амплитуды реакций центра γ_{h1} и периферии γ_{h2} сверхсложного цветового рецептивного поля коры.

После подстановки в (15) значений (13), (14), (17), (18) получим функцию влияния сверхсложного цветового рецептивного поля коры:

$$G_{ca}^h(x_1 - x_1^{VI}, x_2 - x_2^{VI}, \lambda) = \pi^4 (-1)^{n+1} \sum_{a=1}^n \left\{ a_{(1h)_n}^2 \times \right. \\ \times e^{-\left[b_{(1h)_n}^2(x_1 - x_1^{VI} + \beta_{1c})^2 + d_{h_n}^2(x_2 - x_2^{VI})^2\right]} - \\ \left. - a_{(2h)_n}^2 e^{-b_{(2h)_n}^2(x_1 - x_1^{VI} - \beta_{1c})^2} \times \right.$$

$$\times \left[e^{-d_{h_n}^2 \left(x_i - x_i^{VI} - \frac{\beta_c}{2} \right)^2} + e^{-d_{h_n}^2 \left(x_i - x_i^{VI} + \frac{\beta_c}{2} \right)^2} \right], \quad (19)$$

$$\text{где } a_{(1h)_n}^2 = \frac{a_{(c1)_n}^2 \gamma_{h1}}{\sqrt{\left(b_{(c1)_n}^2 + \frac{\beta_{1c}^2}{2} \right) \left(d_{ca}^2 + \beta_c \right)}}; \quad b_{(1h)_n}^2 = \frac{b_{(c1)_n}^2 \beta_{1c}^2}{2 \left(b_{(c1)_n}^2 + \frac{\beta_{1c}^2}{2} \right)}$$

$$a_{(2h)_n}^2 = \frac{a_{(c2)_n}^2 \gamma_{h2}}{\sqrt{\left(b_{(c2)_n}^2 + \frac{\beta_{1c}^2}{4} \right) \left(d_{ca}^2 + \beta_c \right)}}; \quad b_{(1h)_n}^2 = \frac{b_{(c1)_n}^2 \beta_c^2}{b_{(c2)_n}^2 + \beta_c^2}$$

$$d_{h_n}^2 = \frac{d_{ca}^2 \beta_c^2}{d_{ca}^2 + \beta_c^2}$$

ВЫВОДЫ

1. Предлагаемая математическая модель позволяет описывать процесс обработки цветовой информации рецептивными полями различных уровней зрительного анализатора.

2. В фоторецепторах цветковые сигналы разделяются на несколько групп (две или три) по длинам волн.

3. В нейронах зрительного анализатора цветковые составляющие сигналов разделяются во времени на две группы (оп- и off-реакции).

4. В рецептивных полях различных уровней зрительного анализатора цветковые сигналы разделяются на несколько разнесенных в пространстве антагонистических групп фоторецепторов с разной чувствительностью и различным типом реакций (оп- и off-).

5. Кодирование цвета во времени осуществляется путем установления соответствия между различными длинами волн и оп- и off-реакциями отдельных областей рецептивных полей.

6. В рецептивном поле сетчатки происходит пространственно-временное кодирование цветковых составляющих сигналов, которое соблюдается на всех высших уровнях зрительного анализатора.

7. При переходе из низшего уровня зрительного анализатора на более высокий структура цветковых рецептивных полей усложняется и пропорционально увеличивается количество признаков стимулов, выделяемых на каждом уровне.

8. Все признаки цветковых сигналов, выделенных на низших уровнях зрительного анализатора, сохраняются, и на каждом последующем уровне к ним добавляются более специфические.

9. Рецептивные поля последующих уровней зрительного анализатора составлены из двух и более видов рецептивных полей предыдущего уровня.

10. Особое значение при построении рецептивных полей высших уровней имеют центры рецептивных полей предыдущих уровней. Центр является наиболее информационной частью рецептивного поля и определяет разрешающую способность системы рецептивных полей. На уровне сетчатки центры рецептивных полей не должны перекрываться.

ЛИТЕРАТУРА

- Hubel D. H., Wiesel T. N. Receptive Fields and Functional Architecture of Monkey Striate Cortex. — *J. Physiol.*, 1968, vol. 195, p. 215—243.

2. Hammond B. P. Chromatic Sensitivity and Spatial Organization of Cat Visual Cortical Cells: Cone-rod Interaction. — «J Physiol.», 1971, vol. 123, p. 475—494.
3. Von Seelen W. Zur Informationsverarbeitung im visuellen System der Wirbeltiere, I. — «Kybernetik», 1970, Bd. VII, N 2, S. 43—60.
4. Von Seelen W. Zur Informationsverarbeitung im visuellen System der Wirbeltiere, II. — «Kybernetik», 1970, Bd. VII, N 3, S. 89—106.
5. Зозуля Ю. И., Червов В. Г., Бугай Ю. П. Непрерывная математическая модель нейронной сети. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 8. Харьков, 1971, с. 93—102.
6. Зозуля Ю. И., Червов В. Г., Бугай Ю. П. Математическая модель простых рецептивных полей зрительной коры. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 7. Харьков, 1971, с. 48—53.
7. Куманин Ю. А., Зозуля Ю. И., Червов В. Г. Модели цветовых рецептивных полей сетчатки суслика. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 11. Харьков, 1973, с. 13—21.
8. Wiesel T. N., Hubel D. H. Spatial and Chromatic Interaction in the Lateral Geniculate Body of the Rhesus Monkey. — «J. Neurophysiol.», 1966, vol. 29, p. 1115—1156.
9. De Valois, Abramov I. A., Jacobs I. H. Analysis of Response Patterns of LGN Cells. — JOSA, 1966, vol. 56, p. 966—977.
10. De Valois R. L. Analysis and Coding of Color Vision in the Primate Visual System. — «Cold Spring Harbor Symp. of Quant. Biol.», 1965, vol. 30, p. 567—579.
11. Hubel D. H., Wiesel T. N. Receptive Fields of Optic Nerve Fibres in the Spider Monkey. — «J. Rhysiol.», 1960, vol. 154, p. 572—580.

УДК 62.506.2

Б. А. МАЛИК, инж.,
В. Г. ЧЕРВОВ, канд. биол. наук

ОПТОЭЛЕКТРОННАЯ МОДЕЛЬ НЕЙРОНА

В настоящее время много внимания уделяется изучению структурно-функциональной организации нейронной сети мозга как наиболее совершенной вычислительной среды. Ведутся поиски возможностей моделирования этой среды и ее отдельного элемента — нейрона. Создание малогабаритного нейроподобного элемента с большим количеством входов, значительным объемом памяти, сочетающего в себе логические и линейные функции, — одна из задач бионики. В данной работе предлагается одно из возможных решений этой задачи, исследуются характеристики нейроподобного оптоэлектронного элемента вычислительной среды.

Физиологические предпосылки и возможности моделирования нейрона

Клетка нервной ткани мозга животных и человека — биологический нейрон — имеет до 10^4 входов (синапсов) и суммирует входные сигналы. Внутри отдельного нейрона преобразуются электрические сигналы, а связь между нейронами осуществляется в синапсах с помощью потоков химических веществ.

Внутренние электрические сигналы трансформируются в потоки химических веществ в пресинаптических участках, а внешние потоки химических веществ преобразуются в электрические сигналы в постсинаптических участках мембраны нейрона. Суммарный электрический сигнал формируется и преобразуется в частоту электрических импульсов в аксонном холмике нейрона. Веса связей между отдельными нейронами зависят от распределения напряженности электрического поля в постсинаптических участках мембраны нейрона. Это распределение определяется активностью всех латерально взаимодействующих синапсов нейрона. Память нейрона формируется в результате изменения эффективности пресинаптических участков мембраны пропорционально интегралу от электрического сигнала, генерируемого в аксонном холмике нейрона [1].

С учетом тенденции разрабатывать методы обработки информации при помощи оптоэлектронных элементов и систем, а также на основании анализа функциональных возможностей этих элементов и систем можно прийти к выводу о возможности моделирования биологического нейрона устройствами, построенными на этих элементах. В соответствие синапсам биологического нейрона можно поставить фотосопротивления. Аналогично синапсам, токовая реакция которых зависит от количества поступающего медиатора и напряженности электрического поля в постсинаптической мембране, ток через фоторезисторы определяется освещенностью и подающимся на них напряжением. Электрические связи между отдельными синапсами в нейроне моделируются с помощью обычных резисторов, соединяющих между собой фоторезисторы. В модели функцию суммирования может выполнять плоская резисторная сетка. К узлам последней подключены резисторы, другие выводы которых соединены в общую точку. К этим же узлам подключены и фоторезисторы, вторые выводы которых соединены в другую общую точку. Преобразование суммарного электрического сигнала в частоту световых импульсов можно осуществить посредством светодиода с S-образной вольтамперной характеристикой, включенного между общими точками сумматора. Светодиод выполняет также функции порогового элемента и элемента аналоговой памяти.

Оптоэлектронным элементам свойственно высокое быстродействие, а согласование их друг с другом не вызывает существенных технических затруднений. Однако моделирование с помощью дискретных радиокомпонент не позволяет обеспечивать необходимую полноту моделирования свойств биологического нейрона: с возрастанием количества входов увеличиваются габариты и повышается трудоемкость монтажа. Поэтому необходимо изучить возможности интегрального исполнения оптоэлектронной модели нейрона, входные сигналы которой задаются средствами волоконной оптики. Такой вариант исполнения дает

возможность создать нейроподобный элемент с количеством входов, соответствующим числу входов биологического нейрона, уменьшить габариты и повысить технологичность изготовления.

Принципиальная электрическая схема модели

Многовходовый токовый сумматор с матрицей фоторезисторов и параллельно включенным светодиодом получает питание от источника постоянного тока (рис. 1). Амплитуда тока источника выбирается таким образом, чтобы нагрузочная характеристика светодиода проходила через участок генерации его вольтамперной характеристики.

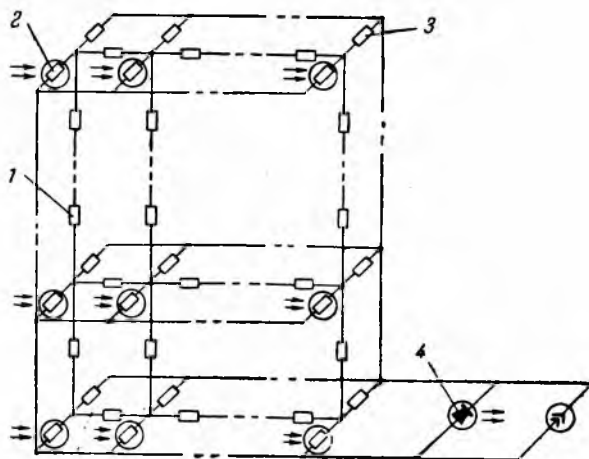


Рис. 1.

Когда фоторезисторы 2 матрицы не освещены, через светодиод 4 в прямом направлении протекает максимальный ток. При освещении фоточувствительной матрицы ее сопротивление становится меньше. Вследствие этого сила тока, проходящего через светодиод 4, также уменьшается, вызывая снижение интенсивности светоизлучения. Когда ток оказывается ниже порогового значения, светоизлучение прекращается. Таким образом, модель осуществляет инверсию входных оптических сигналов. Ток светодиода связан линейной зависимостью с токами отдельных фоторезисторов. В свою очередь, ток каждого фоторезистора определяется его собственной проводимостью, которая зависит от освещенности, а также проводимостью соседних фоторезисторов матрицы, управляемых отдельно световыми сигналами. Подбирая сопротивления резисторов сетки 1, можно изменять величину токов, проходящих через отдельные фоторезисторы 2, и регулировать взаимное влияние входных световых сигналов,

обеспечивая тем самым требуемый закон латерального взаимодействия между ними.

Если ток источника i_0 имеет постоянную величину, то ток светодиода i линейно связан с токами отдельных фотоспротивлений i^{ij} матрицы модели нейрона:

$$i(t) = i_0 - \sum_{i,j=1}^n i^{ij}(t). \quad (1)$$

Здесь $i = 1, 2, \dots, n$ — индекс ряда фотоспротивлений матрицы;
 $j = 1, 2, \dots, n$ — индекс отдельного фотоспротивления в ряде матрицы.

Токи i и i^{ij} связаны со светоотдачей светодиода R и освещенностью фотоспротивлений F^{ij} уравнениями [2]

$$i(t) = \alpha R(t); \quad (2)$$

$$i^{ij}(t) = \beta_{ij} U^{ij}(t) F^{ij}(t), \quad (3)$$

где α, β — коэффициенты пропорциональности;

U^{ij} — падение напряжения на j -м сопротивлении i -го ряда матрицы.

Связь между светоотдачей светодиода и освещенностью фотоспротивлений можно получить из (1) с учетом (2) и (3):

$$R(t) = R_0 - \frac{1}{\alpha} \sum_{i,j=1}^n \beta_{ij} U^{ij}(t) F^{ij}(t). \quad (4)$$

Соотношение (4) показывает, что модель нейрона является адаптивным сумматором-инвертором и моделирует тормозной нейрон.

В результате латерального взаимодействия фотоспротивлений матрицы падение напряжения на отдельном фотоспротивлении можно изменять с помощью оптических управляющих сигналов, поступающих на модель. Это, в свою очередь, дает возможность устанавливать необходимое соответствие между F^{ij} и $R(t)$. В качестве порогового сумматора-инвертора с порогом зажигания $R_n = \text{const}$ модель нейрона может реализовывать логическую функцию Шеффера или функцию Вебба, которые определяют полные системы логических функций.

Вследствие инерционности фоторезисторов модель нейрона преобразовывает частоту входных световых сигналов в токи, протекающие через фоторезисторы, и задерживает входные сигналы на постоянный интервал времени τ . Этим обеспечивается кратковременная динамическая память входных сигналов. Для осуществления долговременной аналоговой памяти в модели можно использовать возвратные необратимые структурные изменения в кристалле светодиода, эффективность α^{-1} которого уменьшается пропорционально заряду, прошедшему через диод в прямом направлении с момента начала его работы t_0 .

Уменьшение светоотдачи диода через величину прошедшего заряда можно определить по уравнению

$$\alpha^{-1}(t) = \alpha_0^{-1} - \gamma \int_{i_0}^{t-\tau} i(t') dt' = \alpha_0^{-1} - \gamma \int_{i_0}^{t-\tau} \alpha(t') R(t') dt', \quad (5)$$

где γ — коэффициент старения.

Тогда выражение для выходного сигнала модели нейрона запишется в виде

$$R(t) = \begin{cases} R(t_0) - \left[\int_{i_0}^{t-\tau} \alpha(t') R(t') dt' + \sum_{i,j=1}^n b_{ij}(t-\tau) F(t-\tau) \right] \text{ при} \\ \int_{i_0}^{t-\tau} \alpha(t') R(t') dt' + \sum_{i,j=1}^n b_{ij}(t-\tau) F(t-\tau) \leq R(t_0) - R_n, \\ 0 \text{ при} \int_{i_0}^{t-\tau} \alpha(t') R(t') dt' + \sum_{i,j=1}^n b_{ij}(t-\tau) F(t-\tau) > \\ > R(t_0) - R_n, \end{cases} \quad (6)$$

где $R(t_0) = \frac{i_0}{\alpha_0}$ — светоотдача диода в момент t_0 при отсутствии входных сигналов;

R_n — порог зажигания светодиода;

$b_{ij}(t) = \frac{\beta_{ij}}{\alpha(t)}$ — коэффициент передачи j -го фотосопротивления i -й линейки матрицы фотосопротивлений;

$\alpha(t) = i_0 \gamma \alpha(t)$ — параметр, характеризующий степень светоотдачи диода в зависимости от прошедшего через него в прямом направлении тока.

Из (6) следует, что нейроподобный оптоэлектронный элемент является адаптивным пороговым сумматором-инвертором с долговременной и кратковременной памятью.

Разновидности нейроподобных элементов

Существует целый класс нейроподобных элементов, отличающихся друг от друга степенью приближения к реальному прототипу, а также схемным или конструктивным решением, осуществляемым с применением разных технических приборов. Все разновидности моделей имеют единую структурную схему (рис. 2), состоящую из блока приема — преобразования сигналов ППОС, блока генерирования оптических сигналов ГОС и блока питания БП.

В ППОС связи между входными фоторезисторами 2 (рис. 1) также могут выполняться из фоторезисторов. Это дает возможность изменять связи между входами нейроподобного элемента, задавая их оптически. Чтобы блок ППОС обрабатывал входные сигналы по заданному закону, достаточно создать определенное освещение фоторезисторов сетки.

Если в блоке ГОС в качестве генератора излучения использовать светодиод с S-образной вольтамперной характеристикой, то выходная информация нейрореподобного элемента будет закодирована в частоте и длительности генерируемых световых импульсов. Нагрузочная характеристика светодиода должна проходить через падающий участок его вольтамперной характеристики. Схема работает в автоколебательном режиме; при увеличении тока через светодиод частота и длительность импульсов увеличиваются.

Блок ГОС может быть выполнен также в виде матрицы газосветных или люминесцентных приборов. В целях получения неинвертированного выходного сигнала (при моделировании возбуждающих нейронов) сумматор и генератор включаются последовательно и питаются от источника ста-

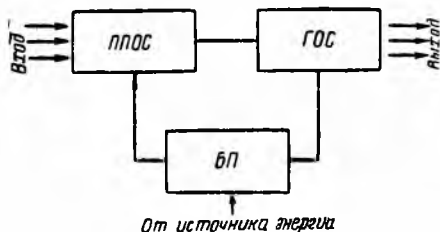


Рис. 2.

бильного напряжения. Применяя такой же источник, можно получить и инвертированный сигнал. Для этого сумматор и генератор необходимо включить параллельно, а напряжение питания подать через балластное сопротивление, величина которого выбирается таким образом, чтобы нагрузочная характеристика светодиода проходила через участок генерации на его вольтамперной характеристике.

Если для питания используется энергия оптического источника (например, квантового генератора или солнечная), то блок питания можно выполнить в виде матрицы параллельно соединенных фотодиодов. В диапазоне светоизлучения напряжение на светодиоде изменяется незначительно. Поэтому ток, генерируемый фотодиодами, тоже можно считать постоянным по амплитуде.

В ы в о д ы

1. Предлагаемая модель обеспечивает высокую достоверность моделирования основных функциональных свойств биологического нейрона. Это достигнуто установлением четкого соответствия отдельных элементов структуры модели морфологическим образованиям биологического нейрона, выполняющим аналогичные функции.

2. Модель является адаптивным пороговым сумматором-инвертором с долговременной и кратковременной памятью.

3. Модель конструктивно может быть выполнена с числом входов, соответствующим числу входов биологического нейрона. Этого можно достигнуть средствами волоконной оптики.

4. Модель имеет простое схемное и конструктивное решение, так как состоит из большого количества однотипных элементов, что позволяет придать ей в интегральном исполнении вид слонстой структуры.

5. Разновидности модели расширяют ее функциональные возможности и упрощают изготовление при построении вычислительных сред.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сб. «Механизмы деятельности центрального нейрона». Под ред. Д. А. Бирюкова. М., «Наука», 1966. 263 с.
2. Свечников С. В. Элементы оптоэлектроники. М., «Сов. радио», 1971. 270 с.

УДК 578.087 + 612.849

Ю. И. НЕФЕДОВ, канд. техн. наук,
А. В. ШАТОХИН, инж.,
В. Г. ЧЕРВОВ, канд. биол. наук

ЭЛЕКТРОННЫЙ СВЕТОВОЙ СТИМУЛЯТОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Всестороннее изучение процессов обработки визуальной информации в зрительной системе — важная задача биологии и бионики. Эффективным методом исследования нейронных функциональных образований зрительной системы — рецептивных полей — является микроэлектродное отведение реакций нервных клеток на различные световые сигналы. Изучаются реакции на движущиеся и мигающие световые сигналы различной конфигурации, на небольшие мигающие стимулы, сканирующие обширную область фоторецепторов сетчатки. Отсутствие многофункциональных световых стимуляторов, позволяющих быстро изменять режимы стимуляции, снижает эффективность нейрофизиологических экспериментов.

В лаборатории бионики Харьковского института радиоэлектроники разработан и изготовлен универсальный электронный световой стимулятор УЭСС-1. Он предназначен для формирования и проектирования на сетчатку разнообразных световых сигналов и может использоваться при нейрофизиологических и психофизиологических исследованиях зрительной системы. Световые сигналы формируются на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) и с помощью оптической приставки проектируются на сетчатку.

Технические параметры УЭСС-1 следующие.

1. Форма световых стимулов и их размеры на экране ЭЛТ:
 - а) светлый круг, диаметр которого регулируется в пределах 0,5—5 мм;
 - б) прямая светлая линия (или полоса толщиной до 5 мм); угол наклона и длина плавно регулируются соответственно от 0 до 180° и от 1 до 20 мм;
 - в) окружность диаметром 1—20 мм;
 - г) эллипс с любыми значениями эксцентриситетов и ориентации.
2. Люминофор ЭЛТ имеет широкую спектральную характеристику; максимуму излучения соответствует длина световой волны 0,5 мкм.
3. Яркость стимулов на экране ЭЛТ регулируется в пределах 26—200 нт.

4. Диапазон частот включения — выключения (мигания) стимулов 0,5—50 кГц. Высокие частоты используются для облегчения процесса совмещения раstra с определенной областью фоторецепторов перед включением медленных разверток.

5. В стимуляторе предусмотрено четыре вида прямолинейных периодических движений световых стимулов. Равномерное, равноускоренное и равнозамедленное движения соответствуют однострочному сканированию стимулов в любом из направлений. Четвертый вид движения — построчное сканирование стимулов. Число строк в растре — 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 — выбирается с помощью переключателя.

6. Диапазон частот строчной развертки 0,08—1000 гц.

7. Диапазон частот кадровой развертки 0,00125—500 гц.

8. Для всех видов движения обеспечивается непрерывная модуляция яркости луча ЭЛТ и дискретное включение — выключение яркости. Количество мигающих стимулов на каждой строке плавно регулируется от 1 до 50.

9. Диапазон скоростей движения световых стимулов 15—30 угл. град/сек.

10. Диапазон ускорений при равнозамедленном движении стимулов 2,5—24 угл. град/сек².

11. Диапазон ускорений при равноускоренном движении стимулов 2,5—1 угл. град/сек².

12. Максимальная длина строки и кадра на экране ЭЛТ 80 мм. Допускается независимая регулировка длин строки и кадра. Последние могут изменяться дискретно (через каждые 15 мм) и плавно.

13. Предусмотрен режим включения — выключения неподвижных световых стимулов. Все световые стимулы (движущиеся и неподвижные) могут смещаться в любую область экрана ЭЛТ.

14. В оптической приставке для уменьшения изображения, проектируемого на сетчатку, применяется объектив «Юпитер-9». Линейные размеры экрана уменьшаются в 10 раз. При необходимости изменения размеров выходного изображения в оптической приставке могут использоваться стандартные фотообъективы с иными фокусными расстояниями.

15. Возможна синхронизация внешних регистрирующих приборов (осциллографы, электроэнцефалографы и др.) со стимулятором. Амплитуда синхронизирующих импульсов, формируемых в стимуляторе, регулируется в пределах 0—15 в.

16. Питание прибора осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 ± 10 в. Потребляемая мощность — 200 вт.

17. Время непрерывной работы стимулятора — 23 часа в сутки.

18. Габариты стимулятора $380 \times 370 \times 500$ мм. Длина оптической приставки 500 мм.

Упрощенная функциональная блок-схема стимулятора

УЭСС-1 приведена на рис. 1. В нее включены электронно-лучевая трубка ЭЛТ, формирователь импульсов модуляции яркости ФИМ, парафазные усилители отклоняющих напряжений $ПФ_x$, $ПФ_y$, блок формирования стимулов БФС, высокочастотный генератор синусоидальных напряжений ВГ, генератор пилообразных напряжений ГПН, формирователь импульсов гашения обратного хода луча ФГ, двоичный шестиразрядный счетчик СЧ, преобразователь двоичного кода в ступенчатое напряжение

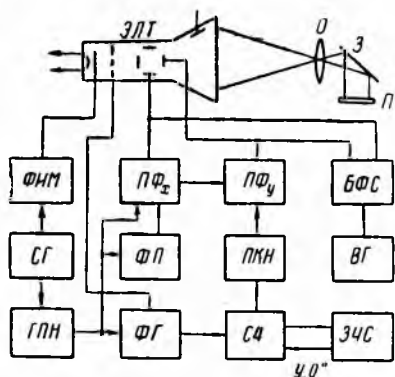


Рис. 1.

ПКН, задатчик числа строк ЗЧС, функциональный преобразователь ФП, объектив О, зеркало З.

Световые стимулы различной конфигурации формируются на экране ЭЛТ. Для этого на отклоняющие пластины ЭЛТ с БФС подаются высокочастотные сигналы, отклоняющие электронный луч по определенному закону. Эти сигналы формируются из высокочастотных синусоидальных напряжений, поступающих на вход БФС с ВГ.

Принцип формирования локальных высокочастотных разверток различной конфигурации рассмотрен в работе [1]. На экране ЭЛТ отдельные сканирования неразличимы, так как время периода высокочастотной развертки (1 мксек) значительно меньше времени послесвечения люминофора ($T_{п} = 0,01$ сек). Поэтому яркость стимулов не изменяется во времени. Импульсы модуляции яркости луча трубки формируются в ФИМ, где также регулируется длительность импульсов модуляции. Частота последних задается синхрогенератором СГ, который обеспечивает синхронный запуск ФИМ и ГПН.

В ГПН формируются пилообразные напряжения строчной развертки. Они поступают на парафазный усилитель $ПФ_y$ и далее на горизонтальные отклоняющие пластины ЭЛТ. Чтобы регулировать направление строчной развертки в режиме однострочного сканирования, пилообразные напряжения подаются также на $ПФ_x$ и затем на вертикальные отклоняющие пластины ЭЛТ. Отклоняющие напряжения, соответствующие равнозамедленному и равноускоренному движениям стимулов, формируются в ФП из пилообразных напряжений ГПН. В ФП формируются импульсы гашения обратного хода луча и подаются на второй электрод модуляции яркости луча ЭЛТ.

При многострочном (растровом) сканировании стимулов, кроме горизонтального (строчного) отклонения осуществляется вертикальное отклонение луча ЭЛТ. Для этого с помощью бло-

ков *СЧ*, *ПКА*, *ЗЧС* формируются ступенчатые напряжения. Прямоугольный импульс гашения обратного хода строчной развертки поступает с *ФГ* на счетный вход шестиразрядного счетчика импульсов, выполненного на стандартных полупроводниковых триггерах.

Число строк выбирается посредством переключателя *ЗЧС*, который коммутирует выход одного из шести триггеров с входом *СЧ* «установка в ноль». Так осуществляется сброс счетчика после определенного числа строк. Двоичный код числа строк в *ПКН* преобразуется в ступенчатое напряжение, которое поступает на *ПФ_У* и далее — на вертикальные отклоняющие пластины.

Изображение экрана *ЭЛТ* проектируется через объектив *О* на зеркало *З*. Уменьшенное отраженное изображение поступает на объект исследования.

Световой стимулятор может использоваться для нейрофизиологических исследований рецептивных полей клеток сетчатки глаза, подкорковых образований и зрительной коры мозга различных животных. Стимулятор может также применяться при изучении функциональной архитектуры нейронных слоистых структур на различных уровнях организации зрительной системы.

На рис. 2 показаны некоторые световые сигналы, которые могут использоваться для стимуляции фоторецепторов сетчатки. Все снимки получены с экрана *ЭЛТ* стимулятора при длительной экспозиции. На рис. 2, *а* изображен растр, образованный последовательно включающимися и выключающимися 544 маленькими пятнами света. Максимальное время формирования растра 13 минут. Аналогичный растр, образованный 140 большими по величине последовательно мигающими линиями, представлен на рис. 2, *б*. Такие световые сигналы используются, например, при изучении функции

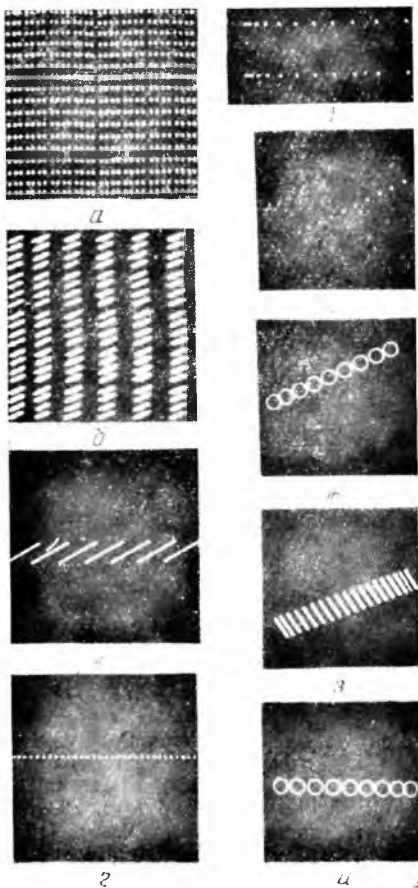


Рис. 2.

На рис. 2, *а* изображен растр, образованный последовательно включающимися и выключающимися 544 маленькими пятнами света. Максимальное время формирования растра 13 минут. Аналогичный растр, образованный 140 большими по величине последовательно мигающими линиями, представлен на рис. 2, *б*. Такие световые сигналы используются, например, при изучении функции

и структуры рецептивных полей нервных клеток сетчатки и зрительной коры кошки [2, 3]. В процессе исследований простых, сложных и сверхсложных рецептивных полей клеток зрительной коры животных и человека применяются световые стимулы в виде движущихся или неподвижных включающихся и выключающихся прямых линий или полос той или иной ориентации [4—6]. Некоторые из этих стимулов показаны на рис. 2, в, з. Для выявления и изучения рецептивных полей клеток — детекторов кривизны — можно использовать стимулы в виде движущихся и неподвижных мигающих окружностей или эллипсов [5]. Траектории последовательно включающихся и выключающихся движущихся окружностей представлены на рис. 2, ж, и.

При изучении рецептивных полей нейронов, реагирующих на движение, в качестве стимулов часто применяются движущиеся в определенных направлениях с различными скоростями и ускорениями маленькие пятна света [7, 8]. Используются также мигающие пятна света или стимулы другой формы [8]. На рис. 2, е показана траектория движущегося в определенном направлении маленького пятна света, а на рис. 2, г и д — соответственно траектории движения мигающего пятна, движущегося слева направо с постоянной скоростью и равноускоренно.

Стимулятор УЭСС-1 прошел испытания в лаборатории зрительной рецепции АН АрмССР. Он использовался при электро-ретинографических исследованиях изолированных сетчаток земноводных и птиц. Испытания показали, что стимулятор имеет широкие функциональные возможности, обеспечивает быстрое изменение режимов стимуляции, что значительно облегчает проведение экспериментов и повышает эффективность биологических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нефедов Ю. И., Червов В. Г., Бугай Ю. П. Моделирование процессов первичной обработки информации в зрительном анализаторе с помощью телевизионной системы. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 3. Харьков, 1970, с. 142—148.
2. Spinelli D. N. Visual receptive fields in the cat's retina: complications. — «Science», 1966, vol. 152, N 3730, p. 1768—1769.
3. Spinelli D. N., Barret T. W. Visual receptive field organisation of single units in the cat's visual cortex. — «Experimental neurology», 1969, vol. 24, N 1, p. 76—98.
4. Hubel D. H., Wiesel T. N. Receptive fields binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. — «J. Physiol.», 1962, vol. 160, p. 106—154.
5. Hubel D. H., Wiesel T. N. Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. — «J. Physiol.», 1968, vol. 195, p. 215—243.
6. Campbell F. W., Kulikowski J. I. Orientational selectivity of the human visual system. — «J. Physiol.», 1966, vol. 187, p. 437—445.
7. Grüsser O. I., Finkelstein D., Grüsser-Cornehls U. The effect of stimulus velocity on the response of movement sensitive neurons of the frog's retina. — «Pflügers Arch. ges. Physiol.», 1968, vol. 300, fase. 2, p. 49—66.
8. Barlow H. B., Hill R. M., Lewick W. R. Retinal ganglion cells responding selectively to direction and speed of image motion in the rabbit. — «J. Physiol.», 1964, vol. 173, p. 377—407.

ТЕЛЕВИЗИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЕТЕКТОРА ДВИЖЕНИЯ

В процессе исследований зрительного анализатора различных животных установлено, что в сетчатке глаза, в подкорковых образованиях и в зрительной коре мозга имеются нейронные структуры, обладающие повышенной чувствительностью к движущимся стимулам (детекторы движения) [1—3]. Особенно важны следующие свойства этих структур:

- а) отсутствие реакции на неподвижные стимулы;
- б) кратковременность реакции на включение — выключение света (реакции *on — off* типа);
- в) устойчивость реакции лишь на движущиеся границы стимула.

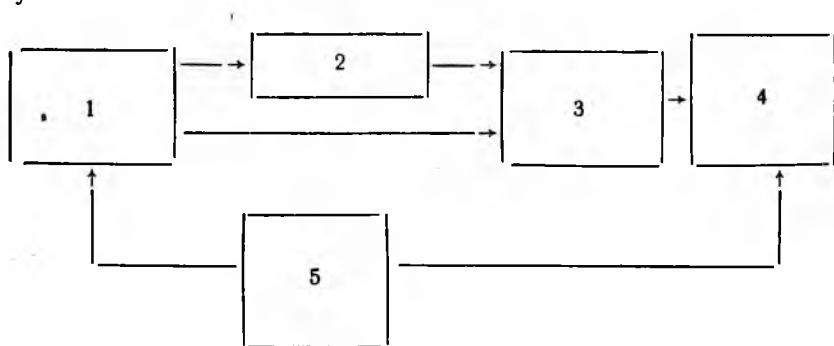


Рис. 1.

Эти свойства целесообразно учитывать при решении аналогичных технических задач выделения движущихся объектов на фоне неподвижных.

Простейшую модель детектора движения можно представить в виде функциональной схемы, состоящей из большого количества элементов *on — off* типа и суммирующего элемента. Рассматриваемое изображение попадает на входы элементов *on — off* типа, выходные сигналы которых суммируются в суммирующем элементе.

Осуществлено моделирование элемента *on — off* типа [4, 5], разработаны некоторые из математических [6] и технических [5, 7, 8] моделей детектора движения. В настоящей работе рассмотрена простейшая техническая (телевизионная) модель, которая по данной функциональной схеме эмитирует поведение структуры, состоящей только из элементов *on — off* типа. Такая модель выполнена на основе промышленной телевизионной установки ПТУ-22М, а ее упрощенная блок-схема представлена на рис 1, где 1 — телевизионная камера, 2 — видеоусилитель-

инвертор, 3 — смеситель видеосигналов, 4 — видеоконтрольное устройство, 5 — блок разверток, включающий синхрогенератор, генераторы строчной и кадровой разверток.

В связи с простотой модели входными стимулами, при которых модель нормально функционирует, могут быть только дву-градационные изображения, т. е. такие, амплитуда видеосигналов которых принимает лишь два фиксированных значения (0 и u_0). Следовательно, для надежной работы необходимо, чтобы

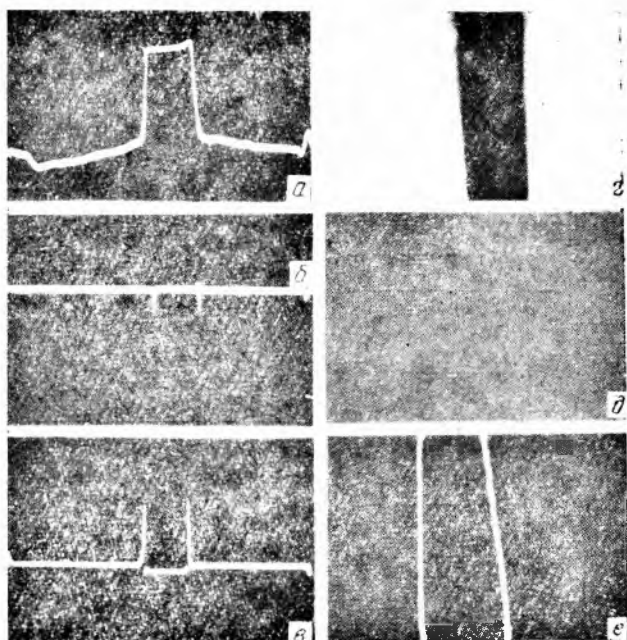


Рис. 2.

телевизионная камера обеспечивала хорошую фокусировку предъявляемого двуградационного изображения. Функционирование данной модели показано на рис. 2, в левой стороне которого помещены осциллограммы видеосигнала, в правой — соответствующие им фотографии экрана видеоконтрольного устройства.

Если в «поле зрения» модели находится черно-белый объект (двуградационное изображение), то на выходе телевизионной камеры ему соответствует видеосигнал, который представлен прямоугольными импульсами фиксированной амплитуды u_0 (рис. 2, а, г).

С телевизионной камеры видеосигнал поступает непосредственно на один из входов смесителя (рис. 1), а на второй

вход — предварительно усиливаясь и инвертируясь. Усиленный видеосигнал в смесителе предварительно ограничивается сверху до u_0 и затем суммируется с исходным. В результате на выходе смесителя амплитуда видеосигнала принимает нулевое значение, поэтому на индикаторе видеоконтрольного устройства исходный черно-белый объект отсутствует (рис. 2, б, д).

Для компенсации временной задержки видеосигнала, проходящего через видеоусилитель-инвертор, к входной цепи смесителя, куда видеосигнал поступает непосредственно с телевизионной камеры, целесообразно соединить интегрирующую цепь с постоянной времени, соизмеримой с длительностью задержки.

В режиме включения — выключение модель функционирует следующим образом. При появлении в «поле зрения» модели двуградационного изображения вследствие инерционности мишени видикона телевизионной камеры амплитуда видеосигнала достигает значения u_0 не мгновенно, а спустя некоторое время. Так как в этом временном интервале амплитуда видеосигнала меньше величины u_0 , в смесителе видеосигналов будет образовываться видеосигнал с отличной от нуля амплитудой, а на экране видеоконтрольного устройства контрастность исходного изображения сначала возрастет, а затем упадет до нуля. При исчезновении с «поля зрения» модели изображения в результате инерционности мишени видикона амплитуда видеосигнала падает до нулевого значения не мгновенно, а спустя некоторый промежуток времени. Следовательно, поведение модели будет аналогичным поведению при появлении изображения. Таким образом, в данном режиме работы модель функционально соответствует элементу on — off типа.

Если в «поле зрения» модели находится движущееся двуградационное изображение, то спроектированное на мишень изображение из-за инерционности мишени видикона будет «размываться» по направлению движения. Амплитуда видеосигнала от «размытых» границ изображения меньше u_0 . Следовательно, в смесителе видеосигналов будет образовываться видеосигнал с отличной от нуля амплитудой, а на экране видеоконтрольного устройства станут заметны границы движущегося изображения (рис. 2, в, е). Таким образом, модель осуществляет анизотропное выделение границ изображения, т. е. наиболее отчетливы те из них, которые расположены перпендикулярно к направлению движения, и совсем не выделены границы, совпадающие с направлением движения. Однако если изображение движется в направлении, перпендикулярном к «полю зрения» модели, т. е. либо приближается к телекамере, либо удаляется от нее, то происходит изотропное выделение границ изображения. Но такое движение вызывает расфокусировку изображения, что приводит к выделению границ неподвижного изображения. Поэтому перемещение изображения в этом направлении должно быть незначительным.

При работе с двуградационными изображениями, движущимися в «поле зрения» модели, необходимо учитывать, что вследствие дискретности телевизионной системы хуже выделяются границы, совпадающие с направлением строк телевизионной системы.

Математическое описание и исследование модели

При математическом описании и исследовании функциональных свойств модели необходимо определить зависимость реакции модели от параметров входных сигналов и модели. Реакцию всей модели можно описать, последовательно определяя реакцию каждого ее элемента и учитывая, что выходной сигнал предыдущего элемента является входным сигналом последующего.

Для упрощения описания модель следует рассматривать как непрерывную среду с двумя пространственными и одной временной координатами, в каждом слое которой осуществляются соответствующие функциональные преобразования, а информация с предыдущего слоя поступает в последующий. Такое упрощение допустимо, если рассматривать идеальную телевизионную систему. Тогда преобразования видеосигнала окажутся тождественными преобразованиям самого изображения. Это означает, что реакция отдельного элемента модели будет соответствовать изображению на экране видеоконтрольного устройства, если на последнее подан видеосигнал с выхода данного элемента.

Когда время накопления заряда на мишени видикона равно времени считывания с мишени и гораздо больше времени одного кадра, реакцию телевизионной камеры на появление в «поле зрения» модели двуградационного изображения можно определить приближенно, пользуясь линейным интегральным преобразованием типа свертки:

$$u_1 = \int_0^t u_0(x, y, t_0) g(t - t_0) dt_0 \quad (1)$$

В уравнении (1) входной сигнал

$$u_0(x, y, t_0) = \begin{cases} u_0, & t_0 \geq 0 \text{ и } x, y \in s, \\ 0, & t_0 < 0 \text{ или } x, y \notin s \end{cases} \quad (2)$$

(s — область существования входного сигнала);

$g(t - t_0)$ весовая функция линейной системы:

$$g(t - t_0) = \beta e^{-\beta(t - t_0)} \quad (3)$$

(β определяет инерционность мишени видикона);

$$u_1 = \int_0^t u_0 \beta e^{-\beta(t - t_0)} dt_0 = u_0 (1 - e^{-\beta t}), \quad t \geq 0. \quad (4)$$

После усиления и инверсии изображению соответствует выражение

$$u_2 = -k u_0 (1 - e^{-\beta t}), \quad t \geq 0. \quad (5)$$

Здесь k — коэффициент усиления видеоусилителя инвертора $k > 1$. Ограничение усиленного видеосигнала сверху приводит к соотношению

$$u_3 = \begin{cases} -k u_0 (1 - e^{-\beta t}), & 0 \leq t \leq \frac{1}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}, \\ -u_0, & t \geq \frac{1}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}. \end{cases} \quad (6)$$

В результате сложения видеосигналов в смесителе можно записать выражение

$$u_4 = \begin{cases} -(k-1) u_0 (1 - e^{-\beta t}), & 0 \leq t \leq \frac{1}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}, \\ -u_0 e^{-\beta t}, & t \geq \frac{1}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}, \end{cases} \quad (7)$$

которое определяет реакцию модели на появление в ее «поле зрения» двуградационного изображения.

Аналогичным образом устанавливается реакция модели на исчезновение с ее «поля зрения» двуградационного изображения:

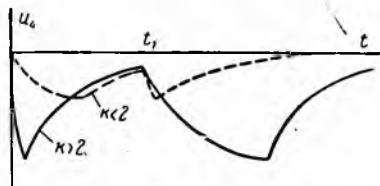


Рис. 3.

$$u_4 = \begin{cases} -u_0 [1 - e^{-\beta(t-t_1)}(1 - e^{-\beta t_1})], & t_1 \leq t \leq t_1 + \frac{1}{\beta} \ln k (1 - e^{-\beta t_1}), \\ -u_0(k-1)e^{-\beta(t-t_1)}(1 - e^{-\beta t_1}), & t \geq t_1 + \frac{1}{\beta} \ln k (1 - e^{-\beta t_1}), \end{cases} \quad (8)$$

где t_1 — временной интервал между появлением и исчезновением двуградационного изображения. Графически соотношения (7), (8) представлены на рис. 3.

В выражении (8) $t_1 \geq \frac{1}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}$.

Если $t_1 \leq \frac{1}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}$, то

$$u_4 = -(k-1) u_0 e^{-\beta(t-t_1)}(1 - e^{-\beta t_1}), \quad t \geq t_1. \quad (9)$$

При больших значениях t_1 формула (8) принимает вид

$$u_4 = \begin{cases} -u_0 [1 - e^{-\beta(t-t_1)}], & t_1 \leq t \leq t_1 + \frac{\ln k}{\beta}, \\ -u_0(k-1) e^{-\beta(t-t_1)}, & t \geq t_1 + \frac{\ln k}{\beta}. \end{cases} \quad (10)$$

Выражения (7), (10) при $k=2$ равны между собой и сдвинуты во времени на t_1 . Значение

$$u_4 = \begin{cases} -u_0 (1 - e^{-\beta t}), & 0 \leq t \leq \frac{\ln 2}{\beta}, \\ -u_0 e^{-\beta t}, & t \geq \frac{\ln 2}{\beta}. \end{cases} \quad (11)$$

Отсчет времени t в (11) ведется от начала каждого переходного процесса. Анализируя (7) и (8), можно найти минимальное значение для u_4 . Если $t_1 \geq \frac{1}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}$, то $u_4 = -\frac{k-1}{k} u_0$ при $t = \frac{1}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}$ и при $t = t_1 + \frac{1}{\beta} \ln k (1 - e^{-\beta t_1})$. Если $t_1 \leq \frac{1}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}$, то $u_4 = -(k-1) u_0 (1 - e^{-\beta t_1})$.

Из соотношения (7) определяется длительность переходного процесса при появлении в «поле зрения» модели двуградационного изображения

$$\tau_1 = \frac{1}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}; \quad \tau_2 = \frac{3}{\beta}, \quad (12)$$

где τ_1 — время нарастания сигнала, τ_2 — время его убывания.

Из выражения (10) определяется длительность переходного процесса при исчезновении с «поля зрения» модели двуградационного изображения:

$$\tau'_1 = \frac{1}{\beta} \ln k; \quad \tau'_2 = \frac{3}{\beta}. \quad (13)$$

Соотношения (12), (13) показывают, что задние фронты переходных процессов всегда равны между собой, а передние — только при $k=2$. Если $k > 2$, то время $\tau'_1 > \tau_1$. При $k < 2$ значения $\tau_1 > \tau'_1$.

Для определения реакции модели на объект, движущийся в ее «поле зрения», целесообразно воспользоваться результатами анализа переходных процессов. В случае прямолинейного равномерного движения объекта реакция модели находится из равенств (7), (8):

$$u_4 = \begin{cases} -(k-1) u_0 \left(1 - e^{-\frac{\beta x}{v}}\right), & 0 \leq x \leq \frac{v}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}, \\ -u_0 e^{-\frac{\beta x}{v}}, & x \geq \frac{v}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}, \\ -u_0 \left[1 - e^{-\frac{\beta (x-x_0)}{v}}\right] \left(1 - e^{-\frac{\beta x_0}{v}}\right) + \frac{v}{\beta} \ln k \left(1 - e^{-\frac{\beta x_0}{v}}\right), & \frac{v}{\beta} \ln \frac{k}{k-1} \leq x_0 \leq x_0 + \\ -u_0 (k-1) e^{-\frac{\beta (x-x_0)}{v}} \left(1 - e^{-\frac{\beta x_0}{v}}\right) + \frac{v}{\beta} \ln k \left(1 - e^{-\frac{\beta x_0}{v}}\right), & x \geq x_0 + \frac{v}{\beta} \ln k \left(1 - e^{-\frac{\beta x_0}{v}}\right), \\ x_0 \geq \frac{v}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}. \end{cases} \quad (14)$$

Здесь x — подвижная ось координат, направление которой противоположно направлению движения, а началом ее может быть любая точка, лежащая на передней границе движущегося изображения;

x_0 — расстояние от передней до задней границ изображения, лежащее на оси x ;

v — скорость движения.

Выражение (14) при $x_0 \leq \frac{v}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}$, т. е. при движении небольших объектов, принимает вид

$$u_4 = \begin{cases} -(k-1) u_0 \left(1 - e^{-\frac{\beta x}{v}}\right), & 0 \leq x \leq x_0, \\ -(k-1) u_0 e^{-\frac{\beta(x-x_0)}{v}} \left(1 - e^{-\frac{\beta x_0}{v}}\right), & x \geq x_0. \end{cases} \quad (15)$$

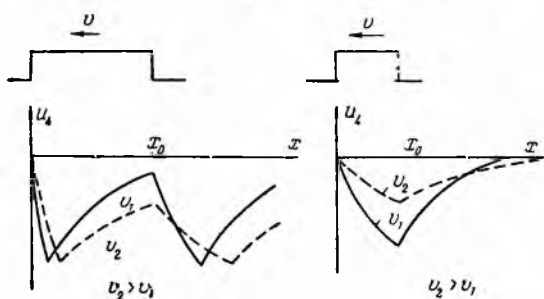


Рис. 4.

Графически уравнения (14), (15) представлены соответственно на рис. 4 а, б.

При большом значении x_0 соотношение (14) несколько упрощается:

$$u_4 = \begin{cases} -(k-1) u_0 \left(1 - e^{-\frac{\beta x}{v}}\right), & 0 \leq x \leq \frac{v}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}, \\ -u_0 e^{-\frac{\beta x}{v}}, & x \geq \frac{v}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}, \\ -u_0 \left[1 - e^{-\frac{\beta(x-x_0)}{v}}\right], & x_0 \leq x \leq x_0 + \frac{v}{\beta} \ln k, \\ -u_0 (k-1) e^{-\frac{\beta(x-x_0)}{v}}, & x \geq x_0 + \frac{v}{\beta} \ln k. \end{cases} \quad (16)$$

Из выражения (16) следует, что при $k=2$ реакции модели на переднюю и заднюю границы движущегося изображения равны и соответствуют

$$u_4 = \begin{cases} -u_0 \left(1 - e^{-\frac{\beta x}{v}}\right), & 0 \leq x \leq \frac{v}{\beta} \ln 2, \\ -u_0 e^{-\frac{\beta x}{v}}, & x \geq \frac{v}{\beta} \ln 2. \end{cases} \quad (17)$$

В равенстве (17) началом координаты оси служит также задняя граница изображения.

Минимальное значение $u_4 = -\frac{k-1}{k} u_0$ реакция модели принимает в точках $x = \frac{v}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}$ и $x = x_0 + \frac{v}{\beta} \ln k \left(1 - e^{-\frac{\beta x_0}{v}}\right)$ при $x_0 \geq \frac{v}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}$. Если $x_0 \leq \frac{v}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}$, то $u_4 = -(k-1) u_0 \left(1 - e^{-\frac{\beta x_0}{v}}\right)$. Таким образом, минимальное значение реакции при движении больших объектов не зависит от скорости движения, а при движении малых объектов ($x_0 \leq \frac{v}{\beta} \ln \frac{k}{k-1}$) реакция возрастает до нулевого значения. Увеличение скорости движения объекта обуславливает усиление «размытия» границ изображения.

Приведенное математическое описание поведения модели согласуется с экспериментальными данными, полученными при работе модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Grüsser O. J. Finkelstein D., Grüsser-Cornehls U. The Effect of Stimulus Velocity on the Response of Movement Sensitive Neurons of the Frog's Retina — «Pflügers Archiv ges Physiol.», Bd 300. H2, S. 49—66.
2. Harutiunian-Kozak B., Kozak W., Dec K., Balcer E. Responses of Single Cells in the Superior Colliculus of the Cat to Diffuse Light and Moving Stimuli. — «Acta biol. exp.», 1968, vol 28, N 4, p. 317—331.
3. Mimura K. Movement Discrimination by the Visual System of Flies. — «Z. für vergl. Physiol.», 1971, Bd 73, N 2, S. 105—138.
4. Кацалап С. Ф., Червов В. Г., Зозуля Ю. И. Математическое моделирование переходных процессов в нейронных структурах сетчатки. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 8. Харьков, 1972, с. 67—74.
5. Миллер Б. Использование модели глаза голубя в радиолокационных системах. — ЭИ «Техническая кибернетика», 1965, № 4, реф. 18, с. 3—15.
6. Зозуля Ю. И., Нефедов Ю. И., Червов В. Г., Бугай Ю. П. Детектирование движения в сетчатке глаза лягушки. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 5. Харьков, 1970, с. 30—37.
7. Нефедов Ю. И., Червов В. Г., Абдула В. Г. Телевизионная модель детектора движения. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 7. Харьков, 1971, с. 85—89.
8. Сутро Л. Л. Электронные модели глаза лягушки. — В сб.: Кибернетические проблемы бионики. М., «Мир», 1972, с. 291—299.

УДК 62.506.2

С. А. УСЕНКО, Н. И. ЧЕРКАШЕНКО, инженеры

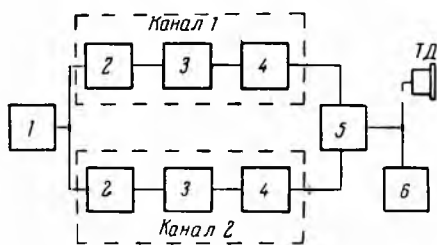
ФОРМИРОВАТЕЛЬ ПОЛОСОВЫХ ШУМОВ

В процессе физиологических и психофизических исследований слухового анализатора человека часто возникает необходимость подачи шумовых сигналов с некоторыми физическими параметрами. В частности, при исследовании зависимости восприятия полосового шума от изменения ширины полосы и оги-

бающей частотного спектра следует использовать приборы, позволяющие реализовывать определенные характеристики полосового шума — ширину полосы, амплитуду, огибающую частотного спектра.

Некоторые схемы электрических фильтров дают возможность вырезать полосы шума определенной ширины и амплитуды [1, 2], а также плавно изменять полосу пропускания в широких пределах [3]. Однако в этих устройствах не предусмотрено изменение формы огибающей частотного спектра по какому-либо заданному закону.

В настоящей работе предлагается устройство, которое позволяет получать полосовые шумы с дискретно меняющейся шириной полосы и плавно регулируемой огибающей частотного спектра. Блок-схема устройства (рисунок) состоит из генератора 1 белого шума Г2-12, двух идентичных формирователей полосовых шумов, работающих поочередно, коммутатора 5, низкочастотного анализатора спектра 6 и динамического телефона. Каждый из двух формирователей включает в себя электронный анализатор 2, суммирующее устройство 3, широкополосный усилитель мощности 4, ТД — телефон динамический.



Основным блоком устройства является электронный анализатор, состоящий из набора активных фильтров и позволяющий вырезать из спектра белого шума различные полосы. Каждый фильтр представляет собой селективный усилитель с двойным Т-образным мостом в цепи обратной связи. Благодаря такой схеме получен фильтр с высокой добротностью. На входе каждого фильтра установлен потенциометр, позволяющий плавно регулировать амплитуду выходного сигнала. Все фильтры имеют резонансную кривую добротностью порядка 20 *дб*. Резонансные частоты, на которые настроены фильтры, выбраны таким образом, чтобы характеристики фильтров перекрывали друг друга. Диапазон частот, перекрываемых характеристиками фильтров, составляет 160—10 000 *гц*.

Длительность сигнала, проходящего через анализатор, определяется временем нажатия кнопки в коммутаторе, которая подключает телефон к усилителю. Конструктивно все фильтры выполнены в виде ячеек на печатных платах.

Резонансные частоты фильтров первого и второго анализаторов попарно совпадают. Коэффициенты усиления активных фильтров и выходных усилителей мощности строго одинаковы. Входные потенциометры фильтров отградуированы таким образом, что цена деления потенциометра первого анализатора равна

цене деления потенциометра соответствующего фильтра второго анализатора. Благодаря проведенной градуировке в пределах порога различимости по громкости находится несколько делений.

Осуществление перечисленных требований позволяет подавать испытываемому пары стимулов в виде полосового шума от двух анализаторов. При этом один из них принимается эталонным. Сигнал от второго анализатора сравнивается с эталонным. Последнее требование важно при проведении пороговых экспериментов со слухом.

В качестве сумматора применяется широкополосный усилитель напряжения с высоким входным сопротивлением. Число входов сумматора соответствует количеству фильтров. Сигнал с выхода сумматора поступает на усилитель мощности. Частотная характеристика усилителя мощности линейна в диапазоне 80—18 000 гц.

Первоначальным источником сигнала в данном устройстве служит генератор белого шума Г2-12. Сигнал от генератора поступает на систему фильтров электронного анализатора. Проходя через тракт анализатора, сигнал преобразуется из белого шума в полосовой. Верхний предел ширины полосы определяется общим количеством фильтров анализатора, нижний — добротностью одного фильтра. Подключая фильтры в разных комбинациях, можно вырезать полосы шума в разных областях частотного спектра. Выходные сигналы с фильтров поступают на смеситель, где суммируются. Суммарный сигнал, усиливаясь по мощности, поступает на анализатор спектра и на динамический телефон. При подключении нескольких фильтров регулировка усиления каждого фильтра входными потенциометрами дает возможность плавно изменять форму огибающей частотного спектра на выходе анализатора.

Таким образом, данное устройство позволяет получать различные пары сигналов полосового шума, дискретно изменять полосу шума, плавно менять огибающую частотного спектра в каждой полосе; принимая один из сигналов эталонным, сравнивать с ним второй сигнал, а также сопоставлять объективно видимый спектр полосового шума с субъективным восприятием его слуховым анализатором человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. Славский Г. Н. Активные RC- и RLC-фильтры и избирательные усилители. М., «Связь», 1966. 215 с.
2. Коначинский Д. А. Частотные электрические фильтры. М., Госэнергоиздат, 1959. 128 с.
3. Лейкин Б. Д. Фильтр с плавно регулируемой полосой пропускания. Авт. свид. № 125849 от 27 марта 1959 г.— «Бюллетень изобретений», 1960, № 3, с. 20.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СУЖЕННОЙ ПАРАДИГМЫ ГЛАГОЛА

В настоящей работе исследуется и моделируется поведение испытуемого при классификации суженной парадигмы глагола по признакам времени (задача 1), числа (задача 2), лица (задача 3) и рода (задача 4). Человек способен решать вышеназванные задачи морфологической классификации глаголов русского языка. Опишем математические модели такой способности идеально грамотного человека.

Суженную парадигму глагола необходимо автоматически анализировать потому, что к ней относится большинство глаголов, встречающихся в различных текстах (технических, литературных, газетных) и в разговорной речи, а алгоритмы морфологической классификации этих глаголов (и составление алгоритмов) сравнительно просты. В суженную парадигму глагола входят синтетические (простые) формы изъявительного наклонения, выражающие основные категориальные значения слов, т. е. формы настоящего, настоящего — будущего (для глаголов совершенного вида) и прошедшего времени [1].

Математическая модель решения каждой из вышеназванных задач анализа суженной парадигмы глагола в виде алгоритма A_k ($k = \overline{1,4}$) показана на рис. 1. Множество $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ входных сигналов алгоритма A_k составляют формы всех глаголов русского языка (для определенности взятых из словаря [2] на 104 тыс. слов), входящих в суженную парадигму. Множество выходных сигналов $Y_k = \{y_{k1}, \dots, y_{km}\}$ — это набор признаков, определяемых в конкретной задаче классификации (K — номер задачи). Подавая на вход B алгоритма A_k какую-либо глагольную форму $x_i \in X$, на его выходе \mathcal{P} получаем признак $y_{kj} \in Y_k$, соответствующий входному слову x_i .

Рассмотрим более подробно выходные множества $Y_1 - Y_4$, содержательное описание которых приведено в таблице Y_{kj} .

k	j			
	1	2	3	4
1	Непрошедшее время	Прошедшее время	—	—
2	Единственное число	Множественное число	—	—
3	1-е лицо	2-е лицо	3-е лицо	Нет лица
4	Мужской род	Женский род	Средний род	Нет рода

Сигналы $Y_{34} \in Y_3$ или $Y_{44} \in Y_4$ означают соответственно отсутствие признаков лица или рода у входного слова. Эти сигналы необходимы потому, что частные грамматические значения лица или рода имеет лишь часть глаголов суженной парадигмы. Точнее, все множество X можно разбить на два непересекающихся подмножества таким образом, что глагольные формы, входящие в одно из них, будут иметь значения лица (но не иметь рода), а входящие в другое — значения рода (не имея лица).

В задаче 1 будем различать два выходных сигнала: y_{11} (непрошедшее время) и y_{12} (прошедшее время). Формы непрошедшего времени объединяют глаголы настоящего (несовершенный вид) и будущего (совершенный вид) времени, временные значения которых обусловлены видом глагола. Такое объединение необходимо, потому что категорию вида нецелесообразно классифицировать автоматически на морфологическом уровне (это удастся лишь на смысловом уровне), так как потребуются очень большие словари исключений. В принципе можно задавать

дополнительный признак вида, но это снижает автоматизированность модели и поэтому не проводилось в данной работе.

Составные блоки 1, 2, 3 (рис. 1) состоят из элементарных блоков — распознавателей и операторов. Распознаватель Φ_i проверяет, удовлетворяет ли слово, поданное на его вход, какому-либо условию. В случае выполнения этого условия слово выходит из распознавателя по стрелке, отмеченной знаком плюс, при невыполнении — по стрелке со знаком минус. Блок U_p , который каким-то образом изменяет поступающий на его вход сигнал, т. е. выполняет над этим сигналом

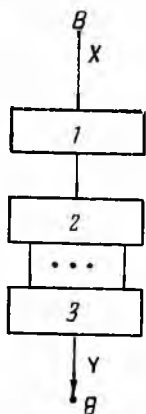


Рис. 1.

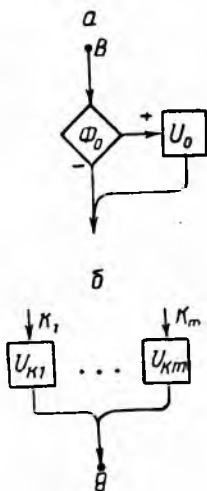


Рис. 2.

сигналом определенную операцию, является оператором.

Опишем функционирование составных блоков алгоритмов на уровне их элементарных распознавателей и операторов. Блок нормализации 1 (рис. 2, а) не является обязательным и введен для упрощения решения. Он состоит из распознавателя Φ_0 , проверяющего конец слова на *ся* или *сь*, и оператора U_0 , отбрасывающего две последние буквы слова. Если входная глагольная форма имеет постфикс *ся* или *сь*, то блок 1 его отбрасывает. Блок классификации 2 (рис. 3) является основным блоком

алгоритма A_k . Он состоит только из распознавателей, поэтому не изменяет поступающий с выхода блока 1 сигнал, а лишь направляет его на один из m пронумерованных выходов, каждый из которых соединен с соответствующим (и таким же образом пронумерованным) входом блока 3. Выходной блок 3 (рис. 2, б) состоит из m параллельно соединенных операторов замены слова на выходной сигнал-признак. Каждому сигналу y_{kj} (см. таблицу y_{kj}) соответствует оператор U_{kj} , который формирует этот выходной сигнал.

Рассмотрим подробнее блоки классификации, входящие в состав алгоритмов $A_1 - A_4$.

Блок 2 алгоритма A_1 (рис. 3, а) состоит из распознавателя Φ_{11} , который проверяет конец слова на одну из букв *е, м, т, в, у* или *ю*. Блок классификации алгоритма A_2 (рис. 3, б) также можно получить из одного распознавателя Φ_{21} , проверяющего конец слова на *ем, им, ут, ют, те*. Распознаватели Φ_{22} и Φ_{23} вводятся для получения точного решения. Блок Φ_{22} проверяет слово на совпадение с глаголами *есть* и *надоест* (и их производными),

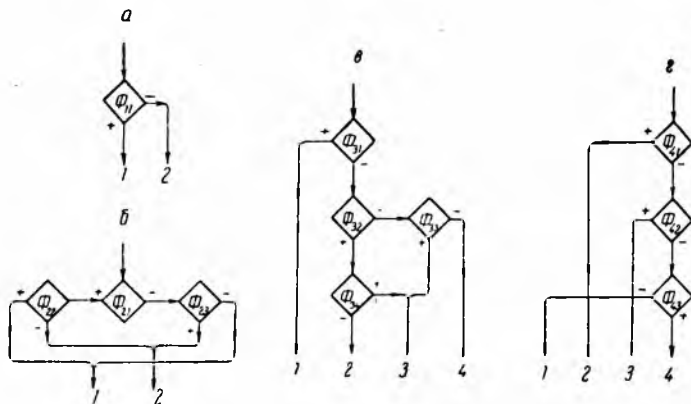


Рис. 3.

стоящими в первом лице единственного числа, а Φ_{23} — с глаголом *суть*. Введение в блок классификации алгоритма A_3 (рис. 3, в) распознавателя Φ_{34} , сравнивающего слово на совпадение с глагольной формой *есть* или *суть*, позволяет получить точное решение задачи 3. Распознаватели, обязательные для ее решения, проверяют последнюю букву слова на одну из букв *м, у, ю* (Φ_{31}); *е, в* (Φ_{32}); *т* (Φ_{33}). На рис. 3, в показан блок 2 алгоритма A_4 , в состав которого входят три элементарных распознавателя. Блоки Φ_{41} и Φ_{42} проверяют конец слова соответственно на *ла* и *ло*; Φ_{43} и распознаватель Φ_{11} , описанный выше, однотипны. Алгоритм A_4 аналогичен модели определения рода глаголов русского языка, описанной в работе [3], и немного проще этой модели.

Алгоритмы автоматического морфологического анализа категорий лица и числа глаголов суженной парадигмы значительно проще, чем алгоритмы анализа тех же категорий всего множества глагольных форм. В качестве примера можно сослаться на алгоритм морфологической классификации глаголов по признаку лица [4]. Если множество входных слов расширить глаголами в инфинитиве, то предлагаемые алгоритмы изменятся совсем незначительно. Алгоритм различения неопределенной и личной формы глагола аналогичен модели [5], но менее сложен.

Если необходимо одновременно решать все четыре задачи, желательно располагать обобщенным алгоритмом анализа, так как он получается более компактным, чем простое объединение алгоритмов $A_1 - A_4$. Обобщенный алгоритм определения грамматических категорий времени, числа, лица и рода глаголом суженной парадигмы можно представить в виде рис. 1. Математические модели нахождения значений лица и числа глаголов повелительного наклонения и некоторые другие также получены в виде, показанном на рис. 1. Это подчеркивает целесообразность подобного представления моделей.

Предложенные алгоритмы реализованы на ЭЦВМ. Проводятся машинные эксперименты в целях исследования уровня достоверности предсказания моделей для различных текстов. Эти исследования основаны на применении техники статистических вычислений [6]. Полученные значения вероятностей достоверного предсказания моделей практически не отличаются от единицы.

Описанные алгоритмические модели могут использоваться для дальнейших исследований, а также играть самостоятельную роль как математические описания некоторых психических функций человека. Модели могут найти применение в различных системах автоматического морфологического анализа текстов русского языка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грамматика современного русского литературного языка. М., «Наука» 1970. 767 с.
2. Орфографический словарь русского языка, изд. 11-е. М., «Сов. энциклопедия», 1971. 520 с.
3. Шабанов-Кушнаренко Ю. П., Бондаренко М. Ф., Соловьева Е. А. Математическая модель определения грамматической категории рода глаголов русского языка.— В сб.: Проблемы бионики. Вып. 11. Харьков, 1973, с. 3—5.
4. Шабанов-Кушнаренко Ю. П., Соловьева Е. А. Математическая модель принятия решений при классификации глаголов по признаку лица.— В сб.: Проблемы бионики. Вып. 11. Харьков, 1973, с. 139—142.
5. Бондаренко М. Ф., Соловьева Е. А. Методы решения задач морфологической и субморфологической классификации.— В сб.: Проблемы бионики. Вып. 10. Харьков, 1972, с. 145—150.
6. Миропольский А. К. Техника статистических вычислений, изд. 2-е. М., «Наука», 1971. 576 с.

АЛГОРИТМ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОРЯДКОВЫХ ЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РУССКОГО ЯЗЫКА

Целью данной работы является моделирование психической деятельности человека при выделении из последовательности словоформ русского языка в письменной речи простых и сложных порядковых числительных и при установлении их характеристик. Предлагаемая ниже модель справедлива для всего множества словоформ русского языка, причем эти словоформы могут быть образованы от слов, помещенных в какой-либо словарь, и от «псевдослов».

Несколько слов о понятии «порядковые числительные». В лингвистике отсутствует единое мнение о том, относить ли слова типа «пятый», «семидесятый», «двадцатипятимиллионный» к порядковым числительным или к относительным прилагательным [1, 2]. Все зависит от признаков, которые положены в основу той или иной классификации слов по частям речи.

При построении алгоритмов автоматического распознавания частей речи по формальным признакам было решено отнести слова данного типа к числительным, так как в качестве формальных признаков числительных принимались не только окончания, но и основы, число которых ограничено. Такой выбор формальных признаков позволяет: а) однозначно выделить все числительные, в том числе порядковые; б) при определении числительных и установлении их характеристик избегать присвоения входному слову какой-либо сопроводительной информации; в) основы числительных рассматривать как носители элементарных единиц смысла, что дает необходимую информацию для семантического анализа («понимания» значения числительного); г) информацию об основах и окончаниях числительных, хранимую в памяти ЭВМ для анализа числительных, применять в целях их синтеза.

В процессе исследования порядковых числительных были выделены их основы (табл. 1.) Они разбиты на 13 групп-списков. Основа числительного включалась в тот или иной список на основании следующих признаков: 1) обозначение одних и тех же разрядов чисел (единицы, десятки, сотни, тысячи и больше); 2) сочетаемость с одними и теми же основами из других списков. В некоторые списки вошло только по одной основе из-за особенностей сочетаемости этих основ. В графе j табл. 1 помещены номера основ ($j=1, \dots, 43$), в графе Z_j — основы порядковых числительных, в r_j — длины в буквах j -х основ, в графе θ_{jt} — номера типов склонений для j -х основ ($j=1, \dots, 22$; $t=1, \dots, 6$), которые могут стоять в простых порядковых числительных или в конце сложного порядкового числительного. Для

основ, которые всегда стоят в начале или в середине сложных порядковых числительных, номера типов склонения не приводятся.

Таблица 1

i	Z_i	r_i	θ_{ij}					
1	2	3	4					
1	<i>девяност</i>	8	4	6	7	8	17	
2	<i>сороков</i>	7	1	5	6	7	8	
3	<i>четверт</i>	7	4	6	7	8	17	
4	<i>восьм</i>	5	1	5	6	7	8	
5	<i>девят</i>	5	4	6	7	8	17	
6	<i>десят</i>	5	4	6	7	8	17	
7	<i>сдьм</i>	5	1	5	6	7	8	
8	<i>втор</i>	4	1	5	6	7	8	
9	<i>перв</i>	4	4	6	7	8	17	
10	<i>трет</i>	4	2	9	10	11	12	
11	<i>шест</i>	4	1	5	6	7	8	
12	<i>пят</i>	3	4	6		8	17	
13	<i>сот</i>	3	4	6	7	8	17	
14	<i>сот</i>	3	4	6	7	8	17	18
15	<i>дцат</i>	4	4	6	7	8	17	19
16	<i>десят</i>	5	4	6	7	8	17	19
17	<i>надцат</i>	7	4	6	7	8	17	19
18	<i>миллиард</i>	8	3	13	14	15	16	18
19	<i>триллион</i>	8	3	13	14	15	16	18
20	<i>биллион</i>	7	3	13	14	15	16	18
21	<i>миллион</i>	7	3	13	14	15	16	18
22	<i>тысяч</i>	5	3	13	14	15	16	20
23	<i>восем</i>	5						
24	<i>девят</i>	5						
25	<i>четыр</i>	5						
26	<i>шест</i>	4						
27	<i>две</i>	3						
28	<i>пят</i>	3						
29	<i>сем</i>	3						
30	<i>три</i>	3						
31	<i>два</i>	3						
32	<i>четыреx</i>	7						
33	<i>девяти</i>	6						
34	<i>восьми</i>	6						
35	<i>шести</i>	5						
36	<i>пяти</i>	4						
37	<i>семи</i>	4						
38	<i>двух</i>	4						
39	<i>трех</i>	4						
40	<i>одно</i>	4						
41	<i>сто</i>	3						
42	<i>девяносто</i>	9						
43	<i>сорока</i>	6						

Проанализируем значение термина «основа порядкового числительного» в данной работе. В список 8 (табл. 1) помещены основы *двух*, *трех*, *четыреx* и т. д. Они представляют собой фор-

му родительного падежа простых количественных числительных, которые можно было бы членить и дальше. Но целью нашего исследования является модель распознавания порядковых числительных в письменной речи. Эта модель положена в основу программы для ЭВМ, в связи с чем немаловажное значение имеет объем машинной памяти и машинного времени.

В письменной речи в сложных порядковых числительных при обозначении количества сотен или единиц всегда употребляется *двух, трех, четырех* и т. д. Дальнейшее членение этих составных частей порядковых числительных в процессе помещения их в словари может значительно усложнить алгоритм распознавания порядковых числительных и увеличить объем машинной памяти и машинного времени. При этом результат на выходе будет тем же.

В табл. 1 основы Z_j сгруппированы по спискам. Информация о том, в какой список входит данная основа, содержится в табл. 2. В графе m помещены номера списков ($m = 1, \dots, 13$), в

графе γ_m — номера строк j (табл. 1), с которых начинаются списки m , в графе φ_m — номера строк (табл. 1), которые являются последними в списках m . Некоторые основы из табл. 1 входят в два списка. Это сделано для сокращения объема хранимой информации.

При исследовании окончаний порядковых числительных было выделено 17 типов их склонения. Окончания выделенных типов склонения порядковых числительных приведены в табл. 3. Окончания 18-го, 19-го, 20-го типов склонения в табл. 3 принадлежат количественным числительным. Они используются для проверки правильности падежных форм основ *-сот-, -десять-, -надцать-, -дцать-*, когда эти основы стоят в середине слова. В графе S табл. 3 помещены номера типов склонений ($S = 1, \dots, 20$). В графе O_{sv} ($S = 1, \dots, 20$; $v = 1, \dots, 6$) даются окончания именительного, родительного, дательного, винительного, творительного и предложного падежей S -х типов склонения числительных. В графе J_s представлены некоторые сведения о существительных, с которыми сочетается порядковое числительное, если оно изменяется по S -му типу склонения.

На вход алгоритма могут подаваться словоформы не только слов, помещенных в какой-либо словарь, но и псевдослов, например, *двухсемидесятисотый*. Поэтому простое вычленение и

Таблица 2

m	γ_m	φ_m
1	1	13
2	14	14
3	15	15
4	16	16
5	17	17
6	18	22
7	23	30
8	32	39
9	40	40
10	41	41
11	30	31
12	34	37
13	42	43

распознавание правильных основ и окончаний порядковых числительных еще не свидетельствует о том, что анализируемое слово является порядковым числительным. В связи с этим для правильной идентификации порядковых числительных необходимо иметь набор составных элементов (основ и окончаний) и описание допустимого порядка их следования в слове. Такое описание в виде графа показано на рис. 1.

Таблица 3

S	O _{sv}						J _s
	Им.	Род.	Дат.	Вин.	Твор.	Пред.	
1	ой	ого	ому	ого	ым	ом	м. р. одуш.
2	ий	ьего	ьему	ьего	ьим	ьем	м. р. одуш.
3	ный	ного	ному	ного	ным	ном	м. р. одуш.
4	ый	ого	ому	ого	ым	ом	м. р. одуш.
5	ой	ого	ому	ой	ым	ом	м. р. неодуш.
6	ая	ой	ой	ую	ой	ой	ж. р. неодуш.
7	ое	ого	ому	ое	ым	ом	ср. р. неодуш.
8	ые	ых	ым	ые	ыми	ых	pl. t. неодуш.
9	ий	ьего	ьему	ий	ьим	ьем	м. р. неодуш.
10	ья	ьей	ьей	ью	ьей	ьей	ж. р. неодуш.
11	ье	ьего	ьему	ье	ьим	ьем	ср. р. неодуш.
12	ие	ых	ьим	ие	ьими	ьих	pl. t. неодуш.
13	ный	ного	ному	ный	ным	ном	м. р. неодуш.
14	ная	ной	ной	ную	ной	ной	ж. р. неодуш.
15	ное	ного	ному	ное	ным	ном	ср. р. неодуш.
16	ные	ных	ным	ные	ными	ных	pl. t. неодуш.
17	ный	ного	ному	ый	ым	ом	м. р. неодуш.
18	#	#	—	#	—	—	—
19	ь	и	и	ь	ью	и	—
20	а	и	е	у	ей	е	—

При построении графа, описывающего структуру любого порядкового числительного, которое записывается (или может быть записано) одним словом, мы исходили из следующих условий: 1) сложные и составные порядковые числительные пишутся аналогично соответствующим количественным числительным: *семнадцатый, семьдесят девятый* [3]; 2) порядковые числительные, оканчивающиеся на *-сотый, -тысячный, -миллионный* и т. п., пишутся слитно [4]; 3) порядковые числительные, имеющие семь и более основ, не принято обозначать буквами. В таких порядковых числительных пишется лишь последний элемент [5], например: *1375-миллионный*. Узел данного графа представляет собой основу, входящую в список, номер которого стоит в узле. Так, ветвь графа на рис. 2 моделирует 1280 различных шести основных порядковых числительных, которые в тексте могут быть представлены 14 080 различными словоформами, например: *двухсотдвадцатипятимиллионный*.

Данный граф, описывающий порядок следования основ в простых и сложных порядковых числительных, был положен в основу блок-схемы алгоритма определения однословных порядковых числительных русского языка в письменной речи (см. рис. 1). Слово X,

поступающее на вход алгоритма, рассматривается как последовательность длиной n из элементов a_k :

$$X = a_1, a_2, \dots, a_n.$$

Под a_k понимается любая буква русского алфавита, стоящая на k -м месте в слове X .

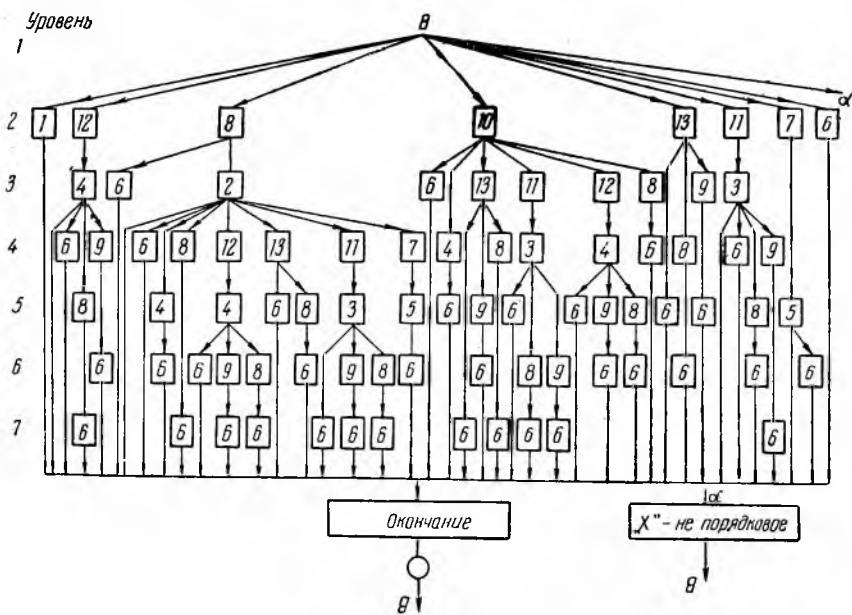


Рис. 1.

Блок-схема алгоритма представляет собой граф, узлы которого расположены на девяти уровнях и представляют собой операторы пяти видов. Оператор ввода B записывает исходное слово X в рабочую ячейку W . Анализ начинается по крайней слева, направленной вниз стрелке; B — оператор выхода. Алгоритм имеет два

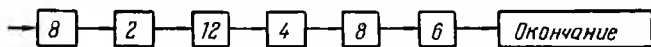


Рис. 2.

выхода: один для слов — порядковых числительных, второй — для слов, которые не являются порядковыми числительными. Оператор в виде квадрата проверяет совпадение первой части содержимого рабочей ячейки W с одной из основ числительных, помещенных в списке, номер которого стоит в середине квадрата. В случае совпадения из содержимого W удаляется выделенная основа числительного, и анализ продолжается по крайней слева, направленной вниз из данного оператора стрелке. В случае несовпадения

первой части содержимого W ни с одной из основ в списке следует возвратиться к предыдущему оператору и продолжать анализ по следующей справа стрелке, исходящей из того же оператора. Если при анализе на предыдущем этапе уже была использована крайняя справа стрелка, исходящая из данного оператора, то необходимо проверить, находится ли данный оператор на втором уровне графа. Если «нет», то перейти к выходу, обозначенному буквой α , если «да», то перейти к оператору ввода и анализ продолжать по следующей справа, идущей вниз стрелке.

Оператор в виде прямоугольника проверяет совпадение содержимого ячейки W с окончаниями порядковых числительных, приведенными в табл. 3. Такому сравнению подвергаются все окончания тех типов склонения, которые указаны в первых пяти графах табл. 1 для основы, выделенной предыдущим оператором.

При совпадении содержимого W хотя бы с одним из окончаний анализ продолжать по стрелке, идущей вниз. Если совпадения не произошло, то следует: а) проверить, является ли предыдущая выделенная основа основой *десять* из списка 4, *надцат* из списка 5 или *дцат* из списка 3; если «нет», то перейти к пункту г); б) если «да», то проверить, является ли первая буква содержимого W буквой u ; если «нет», то перейти к пункту г); в) если «да», то из содержимого W удалить первую букву u , затем перейти к пункту г); г) вернуться к предыдущему оператору и продолжать анализ по следующей справа стрелке, исходящей из оператора.

Если при анализе на предыдущем этапе уже была использована крайняя справа стрелка, исходящая из данного оператора, то необходимо проверить, находится ли данный оператор на втором уровне графа. Если «нет», то перейти к выходу, обозначенному буквой α . Если «да», то перейти к оператору ввода и анализ продолжать по следующей справа идущей вниз стрелке.

Оператор в виде кружка формирует информацию об анализируемом порядковом числительном. Информация о падеже выдается в виде цепочек по шесть знаков, состоящих из нулей и единиц. Одна цепочка соответствует окончаниям (см. табл. 3) какого-то одного типа склонения S порядковых числительных, номер которого указан в табл. 1 для последней выделенной основы. Нуль ставится в соответствие окончанию, которое проверялось на совпадение с содержимым W и не совпало. Единица ставится в соответствие окончанию, которое совпало с содержимым W . Цепочки, состоящие из одних нулей, исключаются. Цепочки, соответствующие окончаниям S -го типа склонения, дополняются данными строки S , графы J , табл. 3, т. е. сведениями о роде и числе, и сведениями об одушевленности и неодушевленности существительных, с которыми может сочетаться данное числительное.

По данной блок-схеме алгоритма составлена программа для ЭВМ «Минск-32». Данный алгоритм может быть использован для некоторых задач анализа и синтеза фраз и предложений русского языка, в целях обнаружения и исправления ошибок в написании порядковых числительных и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грамматика русского языка, т. I. М., Изд-во АН СССР, 1960. 719 с.
2. Гвоздев А. Н. Современный русский литературный язык. М., «Просвещение», 1967. 432 с.
3. Розенталь Д. Э. Русский язык. Пособие для поступающих в вузы. М., Изд-во Моск. ун-та, 1967. 303 с.
4. Орфографический словарь русского языка. М., Гос. изд-во иностр. и нац. словарей, 1959. 1259 с.
5. Добромыслов В. А., Розенталь Д. Э. Трудные вопросы грамматики и правописания. М., Учпедгиз, 1955. 288 с.
6. Шабанов-Кушнаренко Ю. П., Якименко Л. И. Об одной тематической модели морфологической классификации множества имен существительных русского языка.— В сб.: Проблемы бионики. Вып. 6. Харьков, 1970, с. 104—107.

УДК 62. 506. 2

М. Ф. БОНДАРЕНКО, канд. техн. наук,
Э. М. БУЗНИЦКАЯ, инж.

АЛГОРИТМ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИМЕН ПРИЛАГАТЕЛЬНЫХ РУССКОГО ЯЗЫКА

Рассмотрим моделирование речевого поведения человека при решении задач морфологического анализа имен прилагательных.

Задача 1. Выделение классов имен прилагательных в соответствии с наличием противопоставлений по различным грамматическим категориям.

Требуется произвести разбиение исходного множества M имен прилагательных русского языка на непересекающиеся подмножества (классы) M_1, M_2, M_3 по некоторому грамматическому показателю Π , формирующемуся на основании сведений об окончании и характере основы. Каждое такое разбиение определяет между элементами этого множества отношение R типа эквивалентности, т. е. R является одновременно рефлексивным, симметричным и транзитивным.

Лингвистическими предпосылками организации формальных классов M_1, M_2, M_3 могут служить следующие соображения. В парадигме формального класса необходимо учитывать все противопоставления вариантов, свойственные членам этого класса. Поэтому парадигма может быть построена лишь на основании сопоставления парадигм отдельных лексем и выявления таким образом всех противопоставлений, встречающихся между элементами внутри данных частных парадигм.

У имен прилагательных парадигма легко выделяется по категориям рода, числа и падежа. Можно сказать, что все другие категории, приписываемые обычно прилагательному, не входят в состав парадигмы данного класса слов. Прежде всего это относится к полным кратким формам. Употребление этих форм там, где обе они возможны (т. е. в позиции именной части сказуемого), является свободным. Выбор в указанной позиции одной из двух форм факультативен и не определяется согласовательными связями. Можно равно сказать «он красив» и «он красивый». Обе данные формы, таким образом, следует рассматривать как разные слова, а не как члены одной парадигмы. В равной степени сказанное относится и к степеням сравнения прилагательных.

Классы M_1 , M_2 , M_3 — характеризуются: M_1 — противопоставлениями по роду, числу и падежу (это соответствует полным именам прилагательным); M_2 — противопоставлениями по роду и числу (соответствует кратким формам имен прилагательных и превосходной степени сравнения — аналитической); M_3 — нулевой парадигмой (сюда войдут неизменяемые прилагательные — слова иностранного происхождения и компаратив). Общую парадигму имени прилагательного можно представить в виде

$$D = (x_1 \vee \bar{x}_1) \cdot (x_2 \vee \bar{x}_2) \cdot (x_3 \vee \bar{x}_3) \cdot \\ \cdot (x_4 \vee \bar{x}_4) \wedge (x_5 \vee \bar{x}_5) \wedge (x_6 \vee \bar{x}_6), \\ (y_1 \vee \bar{y}_1) \wedge (y_2 \vee \bar{y}_2), (z_1 \vee \bar{z}_1) \wedge (z_2 \vee \bar{z}_2) \wedge (z_3 \wedge \bar{z}_3); \\ D = D_1 \cup D_2 \cup D_3,$$

где $x_1 - x_6$ — набор бинарных признаков, характеризующих противопоставления соответственно по именительному, родительному, дательному, винительному, творительному, предложному падежам;

y_1, y_2 — противопоставления по числу (единственное, множественное);

z_1, z_2, z_3 — противопоставления по роду (мужской, женский, средний).

Грамматическая информация для элементов M_1 получается как объединение грамматических признаков из D_1, D_2, D_3 ; для M_2 — из D_2, D_3 . Для элементов M_3 цепочку грамматических признаков можно записать в виде

$$f = \{x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6, y_1 y_2, z_1 z_2 z_3\}.$$

Работа алгоритма

1. Проверить, входит ли анализируемое слово в словарь 1 (неизменяемые слова). Если ответ «да», то слово — элемент из M_3 .

2. Сравнить окончание слова * с нулевым окончанием; если они совпадают, перейти к 3, если нет — к 5.

3. Сравнить две последние буквы основы с *ин, ын, ов, ев*; если ответ «да», то перейти к 4, если «нет», — слово из M_2 .

4. Проверить анализируемое слово на принадлежность словарю 2**; если вхождение имеет место, то слово из M_2 , если нет — из M_1 .

5. Сравнить окончание входного слова с однобуквенными окончаниями *-а, -о, -и*; если они совпадают, перейти к 6, если нет — к 7.

6. Отбросить окончание входного слова, перейти к 3.

7. Сравнить окончание входного слова с однобуквенными окончаниями *-я, -и*; если ответ «да», то перейти к 8, если «нет» — к 9.

8. Сравнить предпоследнюю букву основы с *ь*; если имеет место совпадение, то слово — элемент из M_1 , если нет — из M_2 .

9. Проверить на совпадение окончание основы с *ь*; если они совпадают, то слово из M_2 , если нет — перейти к 10.

10. Сравнить окончание анализируемого слова с однобуквенным окончанием *е*; если ответ «да», то перейти к 11, если «нет» — к 16.

11. Сравнить предпоследнюю букву слова с *ц*; если это *ц*, то перейти к 12, если нет — к 13.

12. Проверить слово на вхождение в словарь 3; если слово принадлежит словарю, то это элемент из M_3 , если нет — из M_2 .

13. Сравнить предпоследнюю букву слова с *ж*; если они совпадают, то перейти к 14, если нет — к 15.

14. Проверить, входит ли анализируемое слово в словарь 4; если ответ «да», то оно принадлежит M_2 , если «нет» — M_3 .

15. Сравнить предпоследнюю букву основы с *н*; если совпадение имеет место, то входное слово — элемент из M_2 , если нет — из M_3 .

16. Сравнить окончание анализируемого слова с двухбуквенными окончаниями *-еа, -ей*; если оно совпадает, то перейти к 17, если нет — к 19.

17. Отбросить окончание слова, перейти к 18.

18. Проверить три последние буквы основы на совпадение с *айш* и *ейш*; если ответ «да», то слово из M_2 , если «нет» — из M_1 или M_3 .

19. Проверить, совпадает ли окончание входного слова с *-ий, -ая, -ие*; если ответ «да», то перейти к 17, если «нет» — анализируемое слово — элемент из M_1 .

* Алгоритм выделения окончания слова в работе не приводится.

** 2,3,4 — словари исключений.

Окончание работы алгоритма.

	<i>Словарь 1</i>			<i>Словарь 2</i>
ампир	демисезон	минимум	перманент	нов
апаш	декольте	маренго	реглан	здоров
апплике	дезабилые	массака	рондо	суров
беж	длез	мокко	сомон	готов
бемоль	ин-кварто	мажор	соте	
бордо	ин-октава	минор	трико	<i>Словарь 3</i>
брутто	ин-фолио	модерн	томат	гуще
буфф	клез	моль		проще
валансьен	комильфо	неглиже		слаще
волан	коми	пикколо		толще
галифе	фантази	плаке		чаще
гала	люкс	пике		чище
гротеск	майонез	плиссе		
гольф	максимум	пик		<i>Словарь 4</i>
				свеже
				несвеже

Пункт 18 данного алгоритма предполагает неоднозначный ответ: M_1 или M_3 . Данную дизъюнкцию можно определить из контекста. Критерием для установления степени имени прилагательного может служить слово, следующее за определяемым. Если это существительное, то прилагательное получает признак положительной степени. Следовательно, ответом будет «элемент из M_1 ». При отсутствии глагола в личной форме или любого другого сказуемого в предложении прилагательное получает признак «сравнительная степень, элемент из M_3 ».

Решение данной задачи позволяет в дальнейшем анализировать имена прилагательные отдельно для каждого класса.

Задача 2. *Приведение имени прилагательного к словарной форме (лемме слова).*

Требуется определить вид отображения F , устанавливающего соответствие между множеством словоформ одной и той же парадигмы словоизменения из M_1 , которые обладают различными наборами грамматических признаков и исходной словоформой той же парадигмы.

Отображение F ищется в виде следующего алгоритма.

1. Сравнить окончание анализируемого слова с нулевым окончанием; если ответ «да», то исходное слово совпадает с его словарной формой (обозначим словарную форму через СФ), если «нет», то перейти к 2.

2. Сравнить окончания входного слова с однобуквенными окончаниями *-а*, *-о*, *-у*, *-ы*; если они совпадают, то перейти к 3, если нет — к 4.

3. Отбросить окончание слова на выходе СФ.

4. Сравнить окончание анализируемого слова с однобуквенными окончаниями *-я*, *-ю*, *-и*; если ответ «да», то перейти к 5, если «нет» — к 7.

5. Отбросить окончание слова, перейти к 6.

6. Заменить *ь* на *ий*, на выходе СФ.

7. Сравнить окончание входного слова с двубуквенными окончаниями *-ый, -ий*; если ответ «да», то на выходе СФ, если «нет» — перейти к 8.

8. Сравнить окончание анализируемого слова с двубуквенными окончаниями *-ой, -ом, -ое, -ых, -их, -ым*; если они совпадают, то перейти к 9, если нет — к 20.

9. Отбросить окончание слова, перейти к 10.

10. Сравнить две последние буквы слова с *ов, ев*; если ответ «да», то перейти к 11, если «нет» — к 13.

11. Проверить, входит ли анализируемое слово в словарь 1*; если оно входит, то на выходе — СФ, если нет — перейти к 12.

12. Присоединить окончания *-ый* или *-ой*; на выходе — СФ.

13. Сравнить две последние буквы основы с *ин, ын*; если они совпадают, то перейти к 14, если нет — к 18.

14. Проверить слово на вхождение в словарь 2; если оно входит, то это — СФ, если нет — перейти к 15.

15. Сравнить входное слово со словом из словаря 3; если они совпадают, то перейти к 16, если нет — к 17.

16. Присоединить окончание *-ой*; на выходе — СФ.

17. Присоединить окончание *-ый*; на выходе — также СФ.

18. Сравнить последнюю букву основы с *г, к, х*; если это *г, к, х*, то перейти к 19, если нет — к 12.

19. Присоединить окончания *-ий* или *-ой*; на выходе — СФ.

20. Сравнить окончание анализируемого слова с двубуквенными окончаниями *-их, -им, -ие*, если ответ «да», то перейти к 21, если «нет» — перейти к 25.

21. Отбросить окончание слова и перейти к 22.

22. Сравнить последнюю букву основы с *ь*; если это *ь*, то перейти к 6, если нет — к 23.

23. Сравнить последнюю букву основы с *г, к, х, ж, ш*; если они совпадают, то перейти к 19, если нет — к 24.

24. Присоединить окончание *-ий*; на выходе — СФ.

25. Проверить на совпадение окончание анализируемого слова с двубуквенными окончаниями *-ем, -ей*; если они совпадают, то перейти к 26, если нет — 29.

26. Отбросить окончание слова, перейти к 27.

27. Сравнить последнюю букву основы с *ц*; если это *ц*, то перейти к 17, если нет — к 28.

28. Сравнить последнюю букву основы с *ь*; если ответ «да», то переход к 6, если «нет» — к 24.

29. Сравнить окончание анализируемого слова с двубуквенными окончаниями *-ее, -яя, -юю*; если они совпадают, то перейти к 30, если нет — к 31.

30. Отбросить окончание слова, перейти к 27.

* Словари 1, 2, 3 — исключения, связанные с нерегулярностью русского языка.

31. Установить, совпадает ли окончание входного слова с окончанием *-ые*; если ответ «да», то перейти к 32, если «нет» — к 33.

32. Отбросить окончание *-ые*, перейти к 12.

33. Сравнить окончание анализируемого слова с трехбуквенными окончаниями *-ого*, *-ому*; если они совпадают, то перейти к 34, если нет — к 35.

34. Отбросить окончание слова, перейти к 18.

35. Проверить, совпадает ли окончание входного слова с трехбуквенными окончаниями *-его*, *-ему*; если ответ «да», то перейти к 36, если «нет» — к 37.

36. Отбросить окончание входного слова, перейти к 27.

37. Установить, является ли окончание анализируемого слова окончанием *-ыми*; если ответ «да», то перейти к 38, если «нет» — к 39.

38. Отбросить окончание *-ыми*, перейти к 10.

39. Проверить, совпадает ли окончание входного слова с трехбуквенным окончанием *-ими*; если совпадает, то перейти к 40, если нет, то следует проверить входное слово.

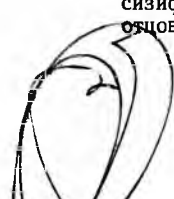
40. Отбросить окончание *-ими*, перейти к 22*.

Окончание работы алгоритма.

Словарь 1

кесарев
царев
дедов
крокодилов
буйволов
фараонов
драконов
воронов
петров
чертов

христов
сизифов
отцов



Словарь 2

сердечкин
ласточкин
бабушкин
батюшкин
филькин
маменькин
мамин
женин
мужнин
дочернин

братнин
папин
дочерин
курицын

Словарь 3
свиной

В некоторых случаях формирования именительного падежа серьезные затруднения вызывают блоки 12, 19 приведенного выше алгоритма. Это случаи, когда вопрос о выборе необходимого окончания нельзя решить однозначно. Однако дальнейший анализ имен прилагательных, создание специальных словарей и отыскание новых формальных признаков, на наш взгляд, поможет разрешить эту задачу.

Результатом решения предыдущей задачи явилось формирование элементов \underline{a}_i , обладающих набором признаков $\underline{f}_i = \{x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3, x_4 x_5 x_6, y_1 y_2, z_1 z_2 z_3\}$, из которых может быть образовано некоторое множество M' . Требуется произвести разбиение множества $M' = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ на классы по отношению подобия системы падежных окончаний.

* Словари 1,2,3 — исключения, связанные с нерегулярностью русского языка.

На выходе вырабатывается алгоритмический признак p , принимающий значения 1—15. Это соответствует номеру класса, в который будут включены прилагательные одного типа склонения. В результате непосредственного склонения слов, относящихся к множеству M^1 , было установлено 16 типов склонения полных имен прилагательных, которые вместе с определяющими их формальными признаками приведены в таблице.

Тип склонения	Формальные признаки слов
1	Окончание <i>-ый</i> , основа, оканчивающаяся не на <i>ц</i>
2	« <i>-ый</i> , основа на <i>ц</i>
3	« <i>-ий</i> , « <i>г, к, х</i>
4	« <i>-ий</i> , « <i>б, в, з, л, ж, с</i>
5	Слова, входящие в словарь 1
6	Окончание <i>-ий</i> , основа на <i>ж</i>
7	Слова, входящие в словарь 2
8	Окончание <i>-ий</i> , основа на <i>н</i>
9	Слова, входящие в словарь 3
10	Окончание <i>-ий</i> , основа на <i>ч</i>
11	Слова, входящие в словарь 4
12	Окончание <i>-ий</i> , основа на <i>ш</i>
13	« <i>-ой</i> , « <i>г, к, х, ж, ш</i>
14	Окончание <i>-ой</i>
15	«Нулевое» окончание, основа на <i>ов, ев</i>
16	» » » » <i>ин, ын</i>

Работа алгоритма

1. Сравнить окончание анализируемого слова с нулевым окончанием; если они совпадают, то перейти к 2, если нет — к 3.

2. Сравнить две последние буквы с *ов, ев*, если ответ «да», то на выходе $p = 15$, если «нет» — $p = 16$.

3. Сравнить окончание входного слова с двубуквенным окончанием *-ий*; если совпадение имеет место, то перейти к 4, если нет — к 14.

4. Отбросить окончание *-ий*, перейти к 5.

5. Проверить на совпадение последнюю букву основы с *г, к, х*; если ответ «да», то на выходе $p = 3$, если «нет» — перейти к 6

6. Сравнить последнюю букву основы с *ж*; если они совпадают, то перейти к 7, если нет — к 8.

7. Проверить анализируемое слово на вхождение в словарь 1; если ответ «да», то $p = 5$, если «нет» — $p = 6$.

8. Сравнить последнюю букву основы с *н*; если они совпадают, то перейти к 9, если нет — к 10.

9. Проверить принадлежность входного слова словарю 2; если слово из словаря, то $p = 7$, если нет — $p = 8$.

10. Проверить, совпадает ли последняя буква основы с *ч*; если ответ «да», то обратиться к 11, если «нет» — к 12.

11. Проверить, принадлежит ли слово словарю 3; если ответ «да», то $p = 9$, если «нет» — $p = 10$.

12. Сравнить последнюю букву основы с *ш*; если это *ш*, то перейти к 13, если нет, то значение признака p на выходе равно 4.

13. Проверить, входит ли анализируемое слово в словарь 4; если входит, то $p = 11$, если нет — $p = 12$.

14. Сравнить окончание входного слова с двубуквенным окончанием *-ой*; если это *-ой*, то перейти к 15, если нет — к 17.

15. Отбросить окончание *-ой*, перейти к 16.

16. Проверить, совпадает ли последняя буква основы с *г*, *к*, *х*, *ж*, *ш*; если ответ «да», то $p = 13$, если «нет» — $p = 14$.

17. Сравнить окончание анализируемого слова с *ый*; если они совпадают, то перейти к 18, если нет, то проверить входное слово.

18. Отбросить окончание *-ый*, перейти к 19.

19. Проверить совпадение последней буквы основы с *ц*; если это *ц*, то $p = 2$, если нет — $p = 1$.

Окончание работы алгоритма.

Словарь 1

наважий
медвежий
божий
бульдожий
белужий
верблюжий
севрюжий
лебяжий
стерляжий
кряжжий

Словарь 2

кабаний
фазаний
сазаний
тараканий
бараний
олений
селезенный
тюлений
павлиный
бизоний
вороний
обезьяний

Словарь 3

зодчий
лежащий
широкоплечий
печный
равноплечий
рабочий
прочий
охочий
неохочий
писчий
зыбучий
певучий

живучий
сидячий
бродячий
ходячий
стоячий
зрячий
горячий
висячий
колючий
взбучий
горючий

Словарь 4

росомаший
черепаший
пастуший
старуший
мыший

7 ЛИТЕРАТУРА

1. Грамматика современного русского языка. М., «Наука», 1970. 726 с.
2. Bielfeldt. H. H. Rückläufiges Wörterbuch der russischen Sprache der gegenwart. Berlin, Akademie Verlag, 1965. 392S.

СОДЕРЖАНИЕ

Зозуля Ю. И. Надежные вычисления при наличии шумов в зрительном анализаторе	3
Клевцов В. П. Моделирование статистических форм перцептивной деятельности зрительной системы. <i>Сообщение I</i>	11
Клевцов В. П. Моделирование статистических форм перцептивной деятельности зрительной системы. <i>Сообщение II</i>	20
Бугай Ю. П. Свойства отображения и бионическое моделирование нервной системы. <i>Сообщение I</i>	28
Бахтигозин В. А., Бугай Ю. П. Применение принципов обобщенной голографии к проблеме синтеза образов	38
Шабанов-Кушнаренко Ю. П., Соловьева Е. А. К вопросу об автоматическом морфологическом анализе причастий русского языка	46
Колесников О. А., Марченко С. Ф. К моделированию электрического поля в нервной ткани. <i>Сообщение I</i>	51
Колесников О. А., Марченко С. Ф. К моделированию электрического поля в нервной ткани. <i>Сообщение II</i>	57
Бахтигозин В. А. Обработка зрительных сигналов в биологических и технических системах	64
Шатохин А. В., Зозуля Ю. И. Математическая модель контурных и сводимых к ним изображений (критический обзор)	74
Путятин Е. П., Трепетин М. С. Теоретические предпосылки нормализации изображений. <i>Сообщение II</i>	78
Путятин Е. П., Трепетин М. С. Теоретические предпосылки нормализации изображений. <i>Сообщение III</i>	85
Шульгин И. В., Лепатченко Б. К., Пильщиков Б. В. Математическое моделирование некоторых механизмов зрительной рецепции	94
Куманин Ю. А. Обработка цветowych сигналов противоположноцветовыми рецептивными полями на различных уровнях зрительного анализатора. <i>Сообщение I</i>	102
Куманин Ю. А. Обработка цветowych сигналов противоположноцветовыми рецептивными полями на различных уровнях зрительного анализатора. <i>Сообщение II</i>	110
Малик Б. А., Червов В. Г. Оптоэлектронная модель нейрона	118
Нефедов Ю. И., Шатохин А. В., Червов В. Г. Электронный световой стимулятор для исследований зрительной системы	124
Кацалап С. Ф. Телевизионная модель детектора движения	129
Усенико С. А., Черкашенко Н. И. Формирователь полосовых шумов	136
Соловьева Е. А. Автоматический морфологический анализ суженной парадигмы глагола	139
Бондаренко М. Ф., Осыка А. Ф. Алгоритм морфологического анализа порядковых числительных русского языка	143
Бондаренко М. Ф., Бузницкая Э. М. Алгоритм морфологического анализа имен прилагательных русского языка	149

УДК 62.506.2

Надежные вычисления при наличии шумов в зрительном анализаторе. Зозуля Ю. И.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 3—11.

Изучена проблема надежных вычислений при наличии шумов в многослойной сети зрительного анализатора. Исследованы операции функционального кодирования зрительных сигналов. Оценена эффективность функционального кодирования сигналов при использовании шумоподобных голографических кодов с переменной структурой.

Рисунков 3. Библиографических ссылок 16.

УДК 62.506.2

Моделирование статистических форм перцептивной деятельности зрительной системы. Сообщение I. Клевцов В. П.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 11—19.

Рассмотрены общие вопросы моделирования познавательной деятельности зрения на его низших уровнях. Показана функциональная структура процесса управления простейшими сенсорными элементами зрения и его перспективных моделей. С позиций развиваемых положений интерпретируются известные закономерности работы рецепторов и рецептивных полей сетчатки.

Таблиц 1. Рисунков 3. Библиографических ссылок 11.

УДК 62.506.2

Моделирование статистических форм перцептивной деятельности зрительной системы. Сообщение II. Клевцов В. П.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 20—27.

Рассмотрены статистические принципы эфферентного управления рецептивными полями сетчатки и коры. Описаны функциональные характеристики операторов, формирующих рецептивные поля коры и оперативное поле наблюдения в процессе селекции.

Рисунков 3. Библиографических ссылок 6.

УДК 62.506.2

Свойства отображения и бионическое моделирование нервной системы. Сообщение I. Бугай Ю. П.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 28—38.

Рассмотрены особенности элементарного отображения и условия его адекватности, существенные для бионического моделирования нервной системы. На основании анализа общих особенностей реальных объектов и отношений показано, что процесс элементарного отображения в форме непосредственного отношения является необходимой частью неэлементарных и высших форм отображения в обучающихся системах.

Библиографических ссылок 13.

УДК 62.506.2

Применение принципов обобщенной голографии к проблеме синтеза образов. Бахтигозин В. А., Бугай Ю. П.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 38—46.

Обсуждена возможность применения принципов обобщенной голографии при построении функциональных моделей анализаторов нервной системы. Предпринята попытка ввести количественные критерии целостности систем различной природы, в том числе психических образов, рассматриваемых как целостные образования в отображенном. На примере представления информа-

ции в голографических системах показано использование распределенных шумоподобных пространственно-временных кодов для синтеза зрительных образов.

Библиографических ссылок 16.

УДК 62.506.2

К вопросу об автоматическом морфологическом анализе причастий русского языка. Шабанов-Кушнаренко Ю. П., Соловьева Е. А.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 46—50.

Предложены алгоритмические модели словесного поведения человека, которые позволяют автоматически получать морфологическую информацию о глагольных формах.

Табл. 1. Рисунков 2. Библиографических ссылок 7.

УДК 62.506.2

К моделированию электрического поля в нервной ткани. Сообщение I. Колесников О. А., Марченко С. Ф.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 51—57.

Рассмотрена возможность применения уравнений Максвелла к моделированию электрического поля в нервной ткани. Предложена математическая модель, отражающая пассивные электрические свойства среды и учитывающая геометрию клетки. Модель может быть расширена введением источников токов сторонних сил, свидетельствующих об активных электрических свойствах нервной ткани.

Библиографических ссылок 6.

УДК 62.506.2

К моделированию электрического поля в нервной ткани. Сообщение II. Колесников О. А., Марченко С. Ф.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 57—64.

Рассмотрено представление активных электрических свойств нервной ткани математическими моделями источников ионных токов. Предложена общая интегральная форма описания динамики анализируемых источников. Рассчитаны параметры модели для источника, описанного А. Л. Ходжкиным.

Рисунков 3. Библиографических ссылок 9.

УДК 62.506.2

Обработка зрительных сигналов в биологических и технических системах. Бахтигозин В. А.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 64—74.

Рассмотрена математическая модель оптимальной фильтрации пространственно-временных сигналов в многослойных сетях зрительного анализатора и в оптических системах анализа изображений, аналогичных биологическим системам зрительного анализатора.

Рисунков 1. Библиографических ссылок 3.

УДК 62.506.2

Математическая модель контурных и сводимых к ним изображений (критический обзор). Шатохин А. В., Зозуля Ю. И.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 74—78.

Описана математическая модель контурных изображений. Поставлена задача о классификации объектов по сводимости их к контурным изображениям. Приведены уравнения контурных изображений и операторы преобразования черно-белых изображений, описываемых обобщенными функциями.

Библиографических ссылок 22.

УДК 62.506.2

Теоретические предпосылки нормализации изображений. *Сообщение II.* Путьягин Е. П., Трепетин М. С.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12. 1974, с. 78—85.

Строится общая теория нормализации изображений, использующая суперпозицию нормализаторов. Доказано, что нормализатор произвольного множества изображений тогда и только тогда представляется в виде суперпозиции частичных нормализаторов, когда группа, действующая на множестве изображений, разлагается в произведение некоторых своих подгрупп.

Рисунков 2. Библиографических ссылок 4.

УДК 62.506.2

Теоретические предпосылки нормализации изображений. *Сообщение III.* Путьягин Е. П., Трепетин М. С.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12. 1974, с. 85—94.

Строится теория нормализации изображений. Доказано, что нормализатор произвольного множества изображений тогда и только тогда представляется в виде суперпозиции частичных нормализаторов, когда группа, действующая на множестве изображений, является прямым произведением некоторых своих подгрупп.

Библиографических ссылок 4.

УДК 62.506.2

Математическое моделирование некоторых механизмов зрительной рецепции. Шутьгин И. В., Лопатченко Б. К., Пильщиков Б. В.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12. 1974, с. 94—102.

Описано аксиоматическое построение математических моделей функций зрительного анализатора, связанных с нормализацией образов в поле зрения.

Рисунков 2. Библиографических ссылок 6.

УДК 62.506.2

Обработка цветowych сигналов противоположно-цветовыми рецептивными полями на различных уровнях зрительного анализатора. *Сообщение I.* Ку-манин Ю. А.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 102—110.

Рассмотрен принцип построения рецептивных полей различных уровней зрительного анализатора. С помощью аппарата интегральных преобразований построена математическая модель обработки сигналов на различных уровнях зрительного анализатора, проанализирована обработка цветowych сигналов противоположно-цветовыми рецептивными полями наружного коленчатого тела.

Рисунков 2.

УДК 62.506.2

Обработка цветowych сигналов противоположно-цветовыми рецептивными полями на различных уровнях зрительного анализатора. *Сообщение II.* Ку-манин Ю. А.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 110—118.

Рассмотрены вопросы обработки сигналов о цвете на различных уровнях коры головного мозга, описана структура рецептивных полей этих уровней. С помощью аппарата интегральных преобразований построена математическая модель обработки цветowych сигналов на различных уровнях коры головного мозга.

Таблиц. 2. Библиографических ссылок 11.

УДК 62.506.2

Оптоэлектронная модель нейрона. Малик Б. А., Червов В. Г.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 118—124.

Исследованы функциональные характеристики нейроподобного элемента, обладающего большим количеством входов, значительным объемом памяти,

малыми размерами и сочетающего в себе логические и линейные функции. Рассмотрены различные схемные и конструктивные решения модели, расширяющие ее функциональные возможности.

Рисунков 2. Библиографических ссылок 2.

УДК 578.087+612.849

Электронный световой стимулятор для исследований зрительной системы. Нефедов Ю. И., Шатохин А. В., Червов В. Г.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 124—128.

Изложены технические характеристики универсального электронного светового стимулятора УЭСС-1, предназначенного для нейрофизиологических и психофизиологических исследований зрительной системы. Описана блок-схема и даны некоторые рекомендации к применению светового стимулятора.

Рисунков 2. Библиографических ссылок 8.

УДК 62.506.2

Телевизионная модель детектора движения. Кацалап С. Ф.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 129—136.

Предложена телевизионная модель нейронных структур, выделяющих движущиеся стимулы на фоне неподвижных. Проведен математический анализ работы модели. Рассмотрено влияние параметров входных сигналов и модели на работу последней.

Рисунков 4. Библиографических ссылок 8.

УДК 62.506.2

Формирователь полосовых шумов. Усенко С. А., Черкашенко Н. И.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 136—138.

Предложено устройство, позволяющее получать сигналы полосового шума с различной формой спектра и сравнивать их звучание между собой. Отдельные узлы формирователя полосовых шумов выполнены в виде ячеек на печатных платах.

Рисунков 1. Библиографических ссылок 3.

УДК 62.506.2

Автоматический морфологический анализ суженной парадигмы глагола. Соловьева Е. А.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 139—142.

Предложены математические модели способности человека определять категории времени, числа, лица и рода глаголов русского языка. Полученные модели представлены в виде алгоритмов, реализованных на ЭЦВМ.

Таблиц 1. Рисунков 3. Библиографических ссылок 6.

УДК 62.506.2

Алгоритм морфологического анализа порядковых числительных русского языка. Бондаренко М. Ф., Осыка А. Ф.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 143—149.

Предложен алгоритм, который устанавливает, является ли произвольная последовательность букв на его входе порядковым числительным, и указывает на род, число и падеж этих числительных.

Таблиц 3. Рисунков 2. Библиографических ссылок 6.

УДК 62.506.2

Алгоритм морфологического анализа имен прилагательных русского языка. Бондаренко М. Ф., Бузницкая Э. М.— В сб.: «Проблемы бионики», вып. 12, 1974, с. 149—156.

Предложены алгоритмы выделения классов имен прилагательных русского языка в соответствии с наличием противопоставлений по различным грамматическим категориям. Описано приведение имени прилагательного к словарной форме (лемме слова), а также классификация полных имен прилагательных по типам склонения.

Таблиц 1. Библиографических ссылок 5.