

ИЗДАТЕЛЬСТВО ХАРЬКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

выпуск 5

Проблемы
бионики



007573.6
17 78

71

В настоящий сборник включены статьи проблемного и дискуссионного характера, посвященные различным проблемам бионики.

Рассматриваются вопросы математического моделирования функциональных свойств зрения, кожной чувствительности и вкуса человека, зрительного восприятия пространства, распознавания образов, функционирования нейронов, применения биологических принципов в телевизионных системах.

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

Редакционная коллегия:

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

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

Ответственный за выпуск *Ю. С. Марченко*.

007.573.6

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ
МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

ВЫПУСК 5

ЧИТАЛЬНИЙ ЗАЛ
вітчизняної періодики
бібліотеки ХНУРЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ХАРЬКОВСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА имени А. М. ГОРЬКОГО
Харьков 1971

ОПТИМИЗАЦИЯ В ЯВЛЕНИЯХ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ГЛАЗА *

Р. А. Сапожников

По словам Нильса Бора, «невозможно придумать прибор, который был бы эффективнее глаза для той цели, для которой он предназначен» [1]. Изучение глаза представляет особый интерес для целей бионики. Под глазом здесь подразумевается зрительный анализатор человека. Существует много аспектов его изучения. Рассмотрим спектральную чувствительность глаза.

Конструируя фотоприемник, т. е. прибор, так или иначе реагирующий на свет, целесообразно соблюдать по крайней мере два условия относительно его спектральной чувствительности:

- 1) чувствительность приемника необходимо обеспечить лишь в том диапазоне спектра, волны которого будут воздействовать на него;
- 2) использование энергии этих волн для получения требуемой реакции приемника должно быть максимально эффективным.

Первое условие означает, что приемник не должен обладать свойствами, усложняющими его устройство; второе — что он должен быть энергетически наиболее выгодным. При соблюдении этих условий приемник будет оптимизирован по важнейшим требованиям к его спектральной чувствительности.

Первое условие не требует пояснений. Второе рассмотрим подробнее, предполагая, что приемник является линейным и что к нему применимо понятие относительной спектральной чувствительности [2].

Реакция этого обширного класса фотоприемников, встречающихся в природе, физике и технике, пропорциональна редуцированному потоку, отношение которого к падающему в приемник лучистому потоку характеризует энергетическую эффективность прибора. Это отношение представляет собой коэффициент полезного действия приемника. Оптимизация требует, чтобы к. п. д. был близок к единице.

Вычисление к. п. д. приемника необходимо производить, пользуясь той или иной спектральной шкалой, определяемой выбором спектральной координаты [3]. Чаще всего в качестве спектральной координаты берут длину волны λ , но ею может быть и какая-либо другая величина, например, волновое число $\frac{1}{\lambda}$.

Пусть x — выбранная спектральная координата. Распределение энергии в спектре падающего на приемник лучистого потока описывается функцией $p(x)$, представляющей собой спектральную плотность этого потока. Тогда, если $\sigma(x)$ — относительная спектральная чувствительность приемника, его к. п. д. равно

$$\eta = \frac{\int \sigma(x) p(x) dx}{\int p(x) dx}, \quad (1)$$

* Доклад на заседании светотехнической секции Ученого совета Всесоюзного научно-исследовательского института охраны труда 24 декабря 1969 г.

причем интегрирование выполняется по всей спектральной шкале. К. п. д. приемника инвариантен преобразованию спектральной шкалы [3], поэтому его можно вычислять, пользуясь любой спектральной координатой x .

Наряду с к. п. д. η удобно рассматривать величину $(1 - \eta)$, минимизация которой обеспечивает оптимизацию приемника.

При этом второе условие оптимизации получает вид

$$\int p(x) |1 - \sigma(x)| dx < \varepsilon, \quad (2)$$

где ε — достаточно малое положительное число.

При построении приемника спектральная плотность $p(x)$ является заданной функцией, а относительная чувствительность $\sigma(x)$ — искомой. В идеальном случае (теоретически) неравенство (2) заменяется равенством при $\varepsilon = 0$, т. е. спектральная чувствительность определяется из уравнения

$$\int p(x) |1 - \sigma(x)| dx = 0. \quad (3)$$

Очевидное тривиальное решение этого уравнения

$$\sigma(x) \equiv 1 \quad (4)$$

не может быть реализовано по физическим причинам из-за постоянных побочных явлений (нагревание и т. п.), на которые расходуется часть падающего на приемник лучистого потока. Иначе говоря, редуцированный поток всегда меньше падающего, вследствие чего тождество (4) не осуществимо и к. п. д. $\eta < 1$. Необходимо уменьшить влияние побочных явлений и достичь соблюдения неравенства (2) при достаточно малом ε или, что одно и то же, получить близкий к единице к. п. д. (1).

Доказательством того, что такая задача разрешима, является наблюдаемая в природе высокая эффективность использования собственного излучения светящимися организмами. У *Photinus pyralis*, например, к. п. д. $\eta = 0,996$ [4]. Это достигается тем, что спектральная чувствительность $\sigma(\lambda)$ имеет значения, близкие к значениям плотности $p(\lambda)$, выраженным их отношениями к максимальному.

Пусть функция $p(x)$ нормирована так, что ее значения, как и значения функции $\sigma(x)$, изменяются лишь от нуля до единицы. Для обобщения изложенного примем в качестве математической модели

$$\sigma(x) = p^n(x), \quad (5)$$

где n — любое положительное число. При этом соблюдение первого условия оптимизации очевидно. Подставляя (5) в (2) и обозначая подынтегральную функцию через $\delta(x)$, получаем

$$\int \delta(x) dx < \varepsilon, \quad (6)$$

где

$$\delta(x) = p(x) |1 - p^n(x)|. \quad (7)$$

Если, как в случае *Photinus pyralis*, $p(x)$ отличается от нуля лишь в интервале x_1, x_2 спектральной шкалы и имеет максимум при $x = x_2$, т. е. $p(x_1) = p(x_2) = 0$ и $p(x_2) = 1$, то $\delta(x_1) = \delta(x_2) = \delta(x_2) = 0$. В интервалах x_1, x_2 и x_2, x_2 функция $\delta(x)$ имеет максимумы. Из (7) следует, что

$$\frac{\partial \delta}{\partial p} = 1 - (n + 1) p^n(x).$$

Приравнивая эту производную нулю, находим, что при

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt[n]{n+1}} \quad (8)$$

$\delta(x)$ имеет максимум

$$\delta_{\max}(x) = \frac{n}{(n+1)^{1+\frac{1}{n}}} \quad (9)$$

Из этого выражения следует, что при $n = 0$, когда (5) совпадает с (4), $\delta_{\max}(x) = 0$. В этом идеальном случае неравенство (6) превращается в равенство (3). При $n = 1$, т. е. в случае, близком к *Photinus pyralis*, из (9) получаем $\delta_{\max}(x) = \frac{1}{4}$. Наконец, при $n \rightarrow \infty$, $\delta_{\max}(x) = 1$.

Значение $\delta_{\max}(x)$, полученное при $n = 1$, позволяет ожидать, что в этом случае неравенство (3) удовлетворяется, когда ϵ невелико, т. е. к. п. д. (1) достаточно близок к единице. Данные *Photinus pyralis* подтверждают это. На рисунке показаны соотношения, имеющие место в этом случае. Сплошной линией показан график функции $p(x)$, пунктиром — график $\delta(x)$. Согласно (8), последний имеет уже найденные максимумы при $p(x) = \frac{1}{2}$. Соотношение

площадей, ограниченных пунктирной и сплошной кривыми, дает представление о порядке значения $(1 - \eta)$.

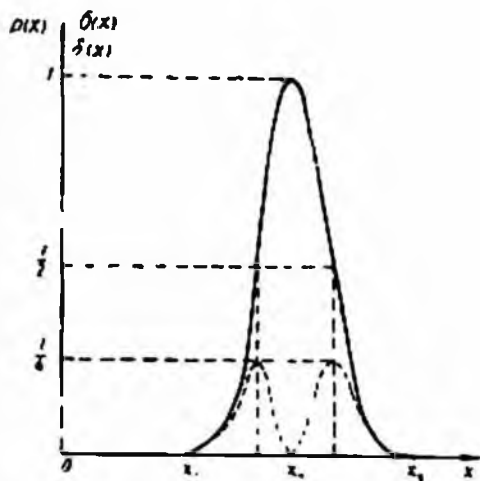
Модель (5) можно обобщить на случай $n = \text{var}$. Тогда лучшее, чем на рисунке, приближение к данным *Photinus pyralis* можно получить, полагая, например,

$$n = 1 - kp(x)[1 - p(x)], \quad (10)$$

где k — некоторая постоянная.

Справедливость выводов, полученных из описанной модели, подтверждает эволюция глаза. Жизнь возникла в океане, когда горячая Земля была окутана атмосферой из водяного пара. Спектральная чувствительность глаз животных, живших в океане, должна была развиваться применительно к спектру солнечного света, пропущенного паром и водой. На глубине 40 м в океане распределение энергии в таком спектре при $x = \lambda$ приближается к $\sigma(\lambda)$ человеческого глаза, т. е. к кривой относительной видности в дневных условиях [5]. По некоторым данным, глаза рыб имеют такую же спектральную чувствительность [6]. Надо думать, что кривая относительной видности сформировалась под влиянием указанного спектра [7]. Высокое значение к. п. д. (1), которое находится при этом в шкале длин волн, остается таким же и в любой другой спектральной шкале. Эволюция глаза в океане привела, таким образом, к спектральной чувствительности, близкой к рассмотренной выше модели при $n = 1$, точнее — при n по (10). Этим осуществились оба условия оптимизации.

В океане развивались и растения. Несомненно, что и они должны были приспособиться к тому же спектру солнечного света, пропущенного паром и водой. Поэтому спектральная чувствительность растений, развивавшихся в океане, вероятно, приближалась к той же модели при $n = 1$. Поскольку растения в значительной мере воспринимают ими же рассеянный свет, спектр последнего эволюционировал таким образом, чтобы спектральная чувствительность, сформировавшаяся под действием



солнечного света в океане, была оптимальной и для рассеянного растением света, подобно тому как спектральная чувствительность *Photinus pyralis* оптимальна для собственного спектра. Поэтому распределение энергии в спектре рассеянного растением солнечного света должно было стать таким же, как и в самом солнечном спектре в океане. Это распределение сохранилось и на суше [8], хотя здесь спектральная чувствительность растений изменилась, и им стали доступны другие части солнечного спектра [9]. По-видимому, в этих новых условиях использование собственного рассеянного света стало для растений менее важным.

Благодаря такому спектру света, рассеянного растением, глаз человека, эволюция которого происходила в условиях зеленой растительности на суше, оказался к нему приспособленным, так как уже обладал спектральной чувствительностью, сформировавшейся в океане. Сходство кривой относительной видности с графиком спектральной плотности солнечного света, рассеянного листьями, отмечалось давно [10]. Изложенное выше — попытка объяснения этого факта. Важно отметить, что функции, описывающие спектральную плотность солнечного света в океане, спектральную плотность солнечного света, рассеянного зелеными растениями, и относительную видность при $\lambda = \lambda_c$, близки к совпадению, причем первая из них — причина появления двух других. Существенно и то, что приспособление к солнечному свету в условиях развития глаза и растений привело к оптимизации, близкой получаемой на описанной выше модели. Приспособление шло в направлении получения, близкого к единице к. п. д. η [3, 4], а не совпадения максимумов функций плотности и чувствительности, как считалось прежде [11]. Это должно стать принципом конструирования фотоприемников.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Бор. Свет и жизнь. Сб. «Атомная физика и человеческое познание». Изд-во инстр. лит., 1961.
2. В. К. Каган. О спектральной чувствительности приемника радиации. Труды Высогогорного геофиз. ин-та, вып. 8. Л., 1968.
3. Р. А. Сапожников. Теоретическая фотометрия, изд. 2-е. Изд-во «Энергия», 1967.
4. Р. А. Сапожников. Спектральная чувствительность и спектры. «Светотехника», 1964, № 3.
5. E. O. Hulburt. Transparency of ocean water and the visibility curve of the eye. JOSA, vol. 3, N 5, 1926.
6. W. Nagel. Handbuch der Physiologie. Braunschweig, 1904.
7. E. Schrödinger. Über den Ursprung der Empfindlichkeitskurven des Auges. Naturwissenschaften, Bd. 12, N. 45, 1924.
8. G. J. Pokrowski. Über die Ursachen, welche die Lichtempfindlichkeit des Auges als Funktion der Wellenlänge des Lichtes bestimmen. Phys. Z., Bd. 29, N. 9, 1928.
9. А. Ф. Клешиин. Растение и свет. Изд-во АН СССР, М., 1954.
10. F. Hauser. Über die Gründe für die Erhaltung des Stäbchenapparates im Auge. Naturwissenschaften, Bd. 13, N. 10, 1925.
11. С. Н. Вавилов. Глаз и солнце. Собр. соч., т. IV. Изд-во АН СССР, 1956.

ВВОД ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЦИФРОВУЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНУЮ МАШИНУ

Г. Г. Гога

Введение

Задача автоматического распознавания зрительных объектов решается в основном с помощью цифровых вычислительных машин. Это требует разработки устройств ввода визуальной информации в ЦВМ. Под термином «визуальная информация» в дальнейшем будет подразумеваться информация, содержащаяся в распределении интенсивностей и спектрального состава световых потоков, излучаемых (отражаемых) различными участками поля наблюдения.



Рис. 1. Блок-схема ввода визуальной информации:

1 — объект; 2 — оптическая система; 3 — датчик видеосигнала; 4 — первичный преобразователь; 5 — канал связи; 6 — ЦВМ.

Общая блок-схема устройства ввода визуальной информации в ЦВМ представлена на рис. 1.

При вводе в ЦВМ информация, поступающая автоматически, должна сначала подвергаться первичной обработке (выделение полезного сигнала на фоне шумов, дискретизация, сортировка, перевод в машинный код, присвоение машинных адресов для отправки в ЗУ и т. д.). Это нашло свое отражение в блок-схеме, где наряду с датчиком видеосигнала представлен первичный преобразователь (блок 4).

Датчики видеосигнала

Устройства ввода визуальной информации (УВВИ) могут быть построены на основе различных датчиков видеосигнала. Тип датчика зависит от вида исходного объекта, необходимой разрешающей способности системы, задачи сохранения информации о цвете, полутонах в изображении и т. п. При оценке определяющими являются следующие факторы: разрешающая способность; отношение сигнал — шум; чувствительность; скорость получения информации; надежность работы и простота конструкции.

На рис. 2 представлена классификация датчиков видеосигнала. Их можно разбить на два класса в зависимости от того, как осуществляется разделение выходных сигналов, соответствующих элементарным участкам поля наблюдения.

При пространственном разделении датчик видеосигнала представляет собой сетчатку из фоточувствительных элементов (фототриоды, фотоэлементы и т. п.), на которую с помощью оптической системы проецируется изображение объекта. Выходной сигнал, соответствующий каждому элементу, одновременно передается по отдельному проводу (или волокну, если применяется волоконная оптика). Количество элементов сетчатки определяет разрешающую способность системы. Поэтому ввод визуальной информации в ЦВМ с высокой разрешающей способностью может быть реализован в случае применения датчиков

с временным разделением видеосигналов, соответствующих элементарным участкам поля наблюдения.

В зависимости от способов осуществления сканирования различают фотозлектронные и оптико-механические датчики.



Рис. 2. Классификация датчиков видеосигналов.

Оптико-механические методы развертки отличаются ограниченным быстродействием и постепенно вытесняются. Из фотозлектронных лучше всего разработаны и широко применяются телевизионные датчики видеосигнала. Остальные пока уступают телевизионным датчикам в разрешающей способности, чувствительности [1].

В силу этого для построения УВВИ с высокой разрешающей способностью можно рекомендовать телевизионные датчики видеосигнала. По мере необходимости в системе ввода могут использоваться безынерционные датчики (без накопления) или инерционные (передающие трубки с накоплением зарядов). Возможность дальнейшей обработки полученного видеосигнала зависит от получаемого отношения сигнал — шум, особенно в мелких деталях.

До недавнего времени в системах автоматического анализа изображений были распространены устройства бегущего луча с высокой разрешающей способностью (≈ 1000 строк), применение которых позволяет осуществлять простое регулирование параметров развертки. Однако недостаток их заключается в сложности получения изображений натуральных объектов. В этом отношении среди безынерционных датчиков более перспективен диссектор, но он обладает чувствительностью. Из передающих трубок с накоплением зарядов приемлемы суперорбитон, супериконоскоп и видикон. Использование видикона, диссектора очень выгодно из-за малых габаритов, простоты оптической системы и освещения, небольших напряжений питания.

Развертка

В датчиках видеосигналов могут применяться различные типы разверток.

Развертка преобразует функцию двух переменных (случай неподвижного изображения) в функцию одной переменной. Так как она

определяет порядок просмотра элементов изображения, то между последними и сигналами развертки устанавливается взаимоднозначное соответствие, что позволяет анализировать изображение по сигналам, полученным при развертке.

Развертка дает геометрическое описание изображения. Вид описания для данного изображения будет изменяться в зависимости от применяемого типа развертки. Выбор последней может производиться некоторым оптимальным образом, если сигнал развертки используется в качестве описания изображения. Так, для получения контурного изображения можно использовать несколько типов разверток:

а) строчная (линейная) развертка с попеременной сменой направления строчного разложения с горизонтального на вертикальное через кадр;

б) спиральная развертка;

в) развертка, в которой синхронное качение луча перпендикулярно направлению строк разложения и др.

Различают пассивное и активное развертывание.

Пассивное развертывание ведется по заранее заданной неизменной программе. При этом траектория развертки аналитически задана в некоторой системе координат, связанной с полем изображения. В простейших случаях линия развертки воспроизводит координатную сетку: обычная телевизионная развертка связана с прямоугольной системой координат, спиральная — с полярной системой и т. д.

При активном развертывании программа меняется в течение процесса сканирования в зависимости от конкретной картины поля наблюдения. Так, при описании контура изображения можно отказаться от описания в системах координат, связанных с полем наблюдения, и перейти к так называемым «естественным координатам», когда в качестве координатной оси используется сама кривая.

Этот метод описания реализуется с помощью следящей развертки [2—5], в которой луч, управляемый специальной следящей системой, следует вдоль контура изображения.

Выбор типа развертки позволяет ограничить влияние некоторых линейных преобразований изображения, как поворот, сдвиг и т. п. Так, если строчная развертка дает различное геометрическое описание при всех линейных преобразованиях (перенос, сдвиг, растяжение, поворот), то следящая развертка дает описание, не зависящее от переноса и поворота. То же наблюдается для спиральной развертки, если центр развертки помещать в центре «тяжести» изображения.

Кодирование

Ввод визуальной информации в ЦВМ требует дискретизация видеосигнала, которая позволяет кодировать информацию, содержащуюся в исходном непрерывном сигнале.

При вводе изображений дискретизация осуществляется по несколькими аргументам.

Для телевизионного сигнала яркость изображения, являющаяся функцией трех непрерывных аргументов x , y и t — координат на плоскости изображения и времени, преобразуется в функцию двух дискретных аргументов y' и t' (число строк и частота кадров) и непрерывного аргумента x , отсчитываемого вдоль строки. Таким образом, кодирование телевизионного сигнала требует дискретизации видеосигнала, соответствующего строке.

Путем кодирования в соответствии исходному изображению приводится точечный растр с дискретными значениями яркости точек. Согласно рис. 1, задача кодирования ложится на блок 4. Сам процесс кодирования яркостей элементов изображения представляет собой кодирование амплитуды видеосигнала. В соответствии каждой точке растра приводится двоичное число с числом разрядов $l = \log_2 b$, где b — число уровней яркости. Кодирование местоположения элемента растра может быть сведено к кодированию амплитуды. В этом случае количество двоичных разрядов адреса элементов $j = \log_2 N$.

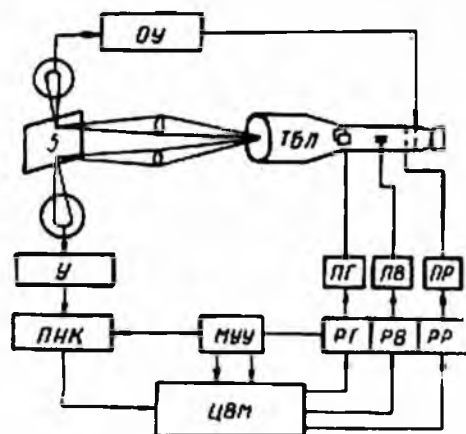


Рис. 3. Блок-схема УВВИ при адресном вводе.

Возможен ряд способов ввода в ЦВМ информации после кодирования: полный ввод; адресный ввод; признаковый ввод.

При полном вводе кодированные значения яркости всех элементов поля наблюдения независимо от конкретного содержания вводятся в память машины. При этом используется пассивное развертывание. В память можно не вносить координаты каждой точки поля. Для этого в память машины необходимо записывать информацию об элементах изображения в порядке возрастания адресов. Тогда относительный адрес будет однозначно определять положение элемента относительно начала развертки. Например, в случае черно-белого изображения разряд K в ячейке с относительным адресом $l = 1$ будет соответствовать k -му элементу изображения при развертке.

Полный ввод с большой разрешающей способностью требует большого объема памяти. При ограниченной памяти неизбежно размещение визуальной информации во внешней памяти. В этом случае обработка будет вестись на ограниченных участках поля наблюдения. При этом ввод визуальной информации логично осуществлять не со всего поля наблюдения, а по частям. Тогда само изображение будет представлять собой внешнюю память, что имеет смысл при неподвижном изображении.

В этом случае приходим к адресному вводу, при котором возможен ввод информации о любой точке изображения с ее координатами, заданными машиной. Примером такого подхода к проблеме ввода является универсальная установка для исследования алгоритмов распознавания изображений, созданная в Институте кибернетики АН УССР [6].

Блок-схема (рис. 3) показывает, что применена цифровая развертка: луч устанавливается в любую точку изображения по команде из ЦВМ. Включая таким образом ЦВМ в контур управления бегущим лучом, можно реализовать как пассивную развертку, так и активную, работающую по любому закону.

При признаковом вводе в ЦВМ вводятся только характерные особенности (признаки) изображения, полученные при активном развертывании изображения в результате какой-то первичной обработки поля наблюдения.

Выбор разрешающей способности и числа градаций яркости

Как правило, анализ изображений осуществляется без различения цвета; кодируется только значение яркости элемента поля наблюдения. Предполагается, что поле наблюдения разбивается на множество элементов в виде прямоугольного раstra $m \times n$, где m — число элементов по горизонтали; n — число элементов по вертикали.

В каждом элементе определяется уровень яркости. Число градаций яркости — b . Общий объем информации, характеризующей поля наблюдения, составляет тогда $Q = imn$ дв. разрядов, где $i = \log_2 b$.

Таким образом, объем вводимой информации находится в прямой зависимости от разрешающей способности системы. Это соотношение применимо при полном вводе. В этом случае независимо от конкретного содержания поля наблюдения необходимо, во-первых, для каждого элемента разложения отводить i разрядов при вводе и, во-вторых, вводить информацию со всего поля наблюдения. Рациональный выбор разрешающей способности системы ввода очень важен с точки зрения экономии памяти и уменьшения времени ввода. В общем случае минимальная разрешающая способность системы определяется алгоритмом обработки информации, реализуемым на ЦВМ.

С целью возможности выбора разрешающей способности для данного алгоритма в УВВИ желательно предусмотреть работу с неодинаковой разрешающей способностью.

Учитывая, что телевизионные датчики не в состоянии превысить свою разрешающую способность (1000 линий), можно считать, что верхним пределом разрешающей способности ввода является разложение 1000×1000 элементов. Для телевизионного стандарта (625 строк разложения) промышленная аппаратура обеспечивает разрешающую способность 500 линий в центре кадра. В настоящее время предельная разрешающая способность в используемых УВВИ составляет 256×256 элементов в кадре.

Можно показать, что такая разрешающая способность является технически предельной при использовании промышленной телевизионной аппаратуры.

Стандарт телевизионного разложения предусматривает 64 мксек на развертку одной строки, из них прямой ход, в процессе которого должно происходить квантование видеосигнала при вводе в ЦВМ, составляет ~ 55 мксек.

Чтобы обеспечить одинаковую разрешающую способность по горизонтали и вертикали, растр должен быть квадратным, а так как в телевидении отношение высоты кадра к ширине принято 3 : 4, то зона квантования по строке будет равна $t_{\text{стр}} \frac{3}{4} \approx 0,75 \times 55 \approx 40$ мксек, т. е. минимальная частота кодирования должна составлять

$$f_{\text{код}} = \frac{1}{40} \approx 6,4 \text{ мГц.}$$

Это довольно трудная техническая задача.

Временные соотношения при полном вводе

При длине машинного слова l разрядов $\frac{lm}{T}$ составляет количество ячеек памяти в одной строке раstra.

Тогда вся вводимая информация займет в памяти машины N ячеек

$$N = n \frac{m}{T}.$$

Исходя из этого равенства, получаем верхний предел той памяти, которая должна соответствовать вводимой информации. На этом основании происходит выбор машины и вычисляется время ввода.

Рассмотрим ограничения, накладываемые быстрым действием устройства ввода визуальной информации и самой машины.

Пусть задано $t_{обр}$ — время обращения, соответствующее полному циклу записи одного числа в ОЗУ машины. Тогда при использовании строчной развертки поля изображения должно выполняться соотношение

$$t_{обр} \frac{im}{T} < t_{пр. х}, \quad (1)$$

где $t_{пр. х}$ — время, соответствующее прямому ходу строчной развертки. Введем коэффициент

$$\eta = \frac{t_{стр}}{t_{пр. х}} = \frac{t_{пр. х} + t_{об. х}}{t_{пр. х}} = 1 + \frac{t_{об. х}}{t_{пр. х}},$$

где $t_{стр}$ — период строчной развертки;

$t_{об. х}$ — время обратного хода развертки.

Тогда

$$t_{пр. х} = \frac{1}{f_{стр} \eta},$$

где $f_{стр}$ — частота строчной развертки;

$$t_{обр} = \frac{1}{f_{обр}},$$

где $f_{обр}$ — максимальная частота обращения к ОЗУ при записи.

В результате (1) примет вид

$$f_{обр} > \eta f_{стр} \frac{im}{T}. \quad (2)$$

Это соотношение имеет смысл, если время кодирования яркости одного элемента поля наблюдения (т. е. время получения разрядов кода, соответствующего одному элементу) с учетом времени сдвига при преобразовании последовательного кода в параллельный для выдачи

в ОЗУ меньше $\frac{t_{пр. х}}{m}$.

Учитывая, что при кодировании по методу считывания время кодирования достаточно мало, основное внимание должно уделяться методам преобразования параллельно-последовательного кода, поступающего от устройства кодирования, в параллельный код.

Если применять сдвиговый регистр с поразрядным сдвигом для получения параллельного кода, то должно выполняться условие, что

$$f_{сдв} > \eta f_{стр} m i.$$

В случае, если тактовая частота машины больше или равна $f_{сдв}$, допустимо применение сдвиговых регистров машины для получения параллельного кода.

Возможно снижение частоты $f_{сдв}$ в i раз, если применить сдвиговый регистр со сдвигом на i разрядов за один период тактовой частоты.

При этом сдвиг из первого триггера производится в $(i + 1)$, из второго — в $(i + 2)$, из i -го — в триггер $2i$ и т. д.

В этом случае должно выполняться соотношение

$$f_{\text{сдв}} \geq \eta f_{\text{стр}m}.$$

Формула (2) при заданной предельной частоте обращения к ОЗУ машины позволяет выбрать частоту строчной развертки устройства ввода визуальной информации. Если же $f_{\text{обр}}$ и $f_{\text{стр}}$ заданы (например, устройство ввода строится на базе промышленной телевизионной установки для определенной машины) и соотношение (2) не выполняется, то необходимо применить согласующее устройство для снижения скорости ввода в машину. Это может быть быстродействующая буферная память, у которой

$$f_{\text{обр}} > \eta f_{\text{стр}} \frac{m}{l}.$$

Выбор схемы связи УВВИ с ЦВМ при полном вводе

В настоящее время устройства ввода с разрешающей способностью не менее 100×100 нашли воплощение только на основе телевизионных и фототелеграфных датчиков видеосигнала. Лучше всего разработаны и наиболее перспективны телевизионные методы. Особенно проста система ввода визуальной информации по методу полного ввода.

Если разрешающая способность достаточна, программным путем можно реализовать любой вид обработки, имитацию любого типа развертки и т. д. Так как при полном вводе в принципе можно применить любой тип развертки, то определяющими будут простота и надежность схемы.

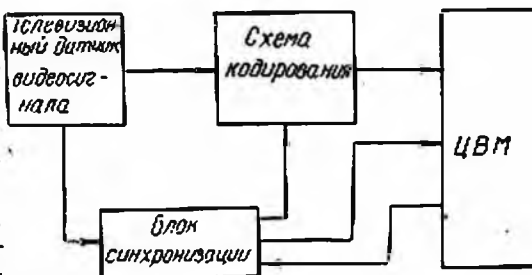


Рис. 4. Блок-схема УВВИ при полном вводе.

С этой точки зрения наиболее подходящей является обычная строчная развертка, и УВВИ может быть построено на базе промышленной телевизионной установки (ПТУ).

Блок-схема УВВИ при полном вводе на базе ПТУ представлена на рис. 4. Чтобы реализовать УВВИ с разрешающей способностью 256×256 на базе ПТУ, необходимо провести согласование скорости поступления информации от УВВИ с допустимой скоростью ввода в ЦВМ.

В проблемной лаборатории МАИ разработан и реализован метод, исключающий применение буферной памяти, что значительно упрощает устройство ввода.

Метод состоит в следующем.

1. По заданной разрешающей способности определяется частота квантования $f_{\text{кв}}$ видеосигнала по строке

$$f_{\text{кв}} = \eta f_{\text{стр}m}.$$

2. Задаются приемлемой частотой $f_{\text{сдв}}$ работы сдвигового регистра, на котором происходит получение параллельного кода, для выдачи в ОЗУ машины:

$$f_{\text{сдв}} \frac{l}{l} \leq f_{\text{обр}}.$$

В этом случае предлагалось, что код после квантования поступает параллельно по i разрядов на сдвиговый регистр; сдвиг осуществляется сразу на i разрядов, как показано выше.

3. Находится отношение $\frac{f_{kv}}{f_{сдв}}$.

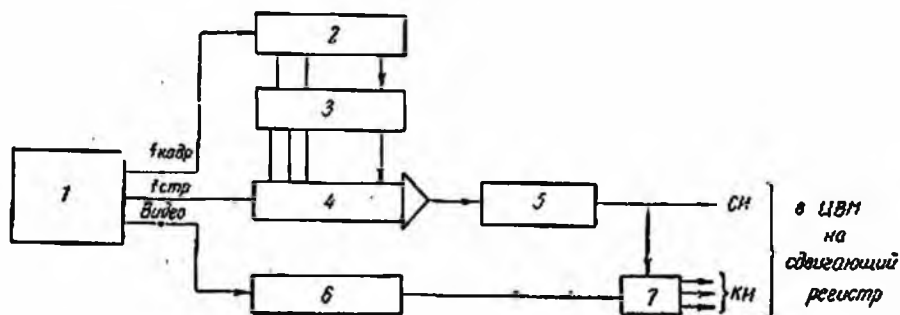


Рис. 5. Блок-схема УВВИ на основе ПТУ.

4. Полученное отношение округляют до целого, соответственно корректируя $f_{сдв}$, т. е. уменьшая или увеличивая ее величину. Отношение $\frac{f_{kv}}{f_{сдв}} = k$, где k — целое, определяет количество периодов кадровой

развертки, необходимое для ввода изображения с заданной разрешающей способностью m по строке. Ввод происходит не за один период кадровой развертки, а за k периодов. За каждый из периодов квантование осуществляется не в m точках каждой строки, а в $\frac{m}{k}$ точках.

В следующем кадре квантование видеосигнала происходит в $\frac{m}{k}$ точках каждой строки, сдвинутых относительно точек в предыдущем кадре на $\Delta t = \frac{1}{f_{kv}}$. В j -м кадре квантование видеосигнала осуществляется в точках, сдвинутых по отношению к первому кадру на $\Delta t j$, ($j = 0, 1, \dots, k-1$). В этом случае частота сдвигов снижается в k раз и в k раз увеличивается время ввода. Если $f_{сдв}$ меньше или равна тактовой частоте работы машины, отпадает необходимость в буферном регистре, а сдвиги могут производиться на сдвиговых регистрах машины.

На рис. 5 приведена блок-схема данного способа. В состав ее входят: 1 — промышленная телевизионная установка ПТУ; 2 — двоичный счетчик; 3 — дешифратор; 4 — схема задержки; 5 — генератор импульсов; 6 — формирователь видеосигнала; 7 — квантующее устройство. 4 представляет собой схему, в которой длительность задержки импульсного сигнала при прохождении с входа на выход зависит от того, какой выход дешифратора 3 возбужден, т. е. от значения кода, записанного в счетчике 2. При изменении кода счетчика на единицу длительность задержки в схеме 4 изменяется на Δt . Величина $\Delta t = \frac{1}{f_{kv}}$. При нулевом состоянии счетчика 2 задержка равна нулю. Счетчик 2 производит подсчет от 0 до $(k-1)$. Соответственно дешифратор 3 имеет K выходов.

Работу устройства начнем рассматривать с кадра при нулевом состоянии счетчика.

От ПТУ 1 на выход схемы задержки 4 поступают строчные синхронизирующие импульсы частоты $f_{стр}$, соответствующие началу прямого

хода строчной развертки. Поскольку в данном кадре счетчик 2 находится в положении 0, строчные импульсы без задержки будут осуществлять запуск генератора 5, вырабатывающего импульсы частоты $\frac{f_{\text{кв}}}{k}$

в виде серий по $\frac{m}{k}$ импульсов. Начало каждой серии синхронизировано запускающими импульсами от схемы 4. Таким образом, серии импульсов от генератора 5 приходятся на прямой ход строчной развертки, осуществляют квантование видеосигнала в квантующем устройстве 7 и производят сдвиги кода, поступающего с выхода квантующего устройства на буферный регистр. Видеосигнал, соответствующий прямому ходу строчной развертки, от ПТУ 1 поступает на вход квантующего устройства 7 через формирователь видеосигнала 6, который позволяет задать уровень квантования по яркости.

В момент начала развертки следующего кадра состояние счетчика 2 изменится на единицу синхронизирующим импульсом частоты $f_{\text{кадр}}$, поступающим от ПТУ 1 и соответствующим началу кадровой развертки. Изменение показания счетчика 2 приведет к тому, что строчные синхроимпульсы $f_{\text{стр}}$, поступающие на схему 4, будут задерживаться в данном кадре развертки на Δt . Здесь произойдет сдвиг серий импульсов, вырабатываемых генератором 5. Квантование изображения будет происходить в точках, сдвинутых по строке на Δl относительно предыдущего кадра. При развертке j -го кадра ($j = 0, 1, \dots, k - 1$) задержка составит $\Delta l j$. После k -го кадра счетчик возвратится в ноль, и можно будет осуществлять ввод следующего изображения.

Характер информации, поступающей с буферного регистра в ЦВМ, — следующий.

Пусть в памяти информация расположена в ячейках от K до $K + (N - 1)$. Первый кадр будет тогда занимать ячейки от K до $K + (n - 1) \frac{ml}{kl} - 1$; второй — от

$$K + (n - 1) \frac{ml}{kl} \text{ до } K + 2(n - 1) \frac{ml}{kl} - 1$$

и т. д.

Информация, соответствующая одной строке, будет расположена в $\frac{ml}{l}$ ячейках памяти, в каждом кадре по $\frac{ml}{kl}$ ячеек.

Если необходимо, чтобы коды, соответствующие одной строке разложения, располагались в порядке следования элементов по строке, это можно осуществить программным путем. Программа осуществляет простую переадресацию ячеек и перестановку кадров внутри ячеек, относящихся к одной строке.

Функциональная схема УВВИ

На рис. 6 представлена функционально-логическая схема УВВИ, построенного по блок-схеме (рис. 5).

Работу схемы будем рассматривать после подачи импульса У «О» (см. временную диаграмму, рис. 7).

По сигналу *Пуск* происходит установка начального состояния триггеров $T1, T2, T4, T5$ и $T6$.

При этом триггер $T1$ открывает схему совпадения H_1 . Импульс частоты кадров $f_{\text{к}}$, полученный при делении на два частоты полукадров $f_{\text{ж}}$, с помощью триггера $T3$ запустит кпп-реле $KP2$. Через время задержки кпп-реле $KP2$ произойдет переброс триггера $T2$, откроется

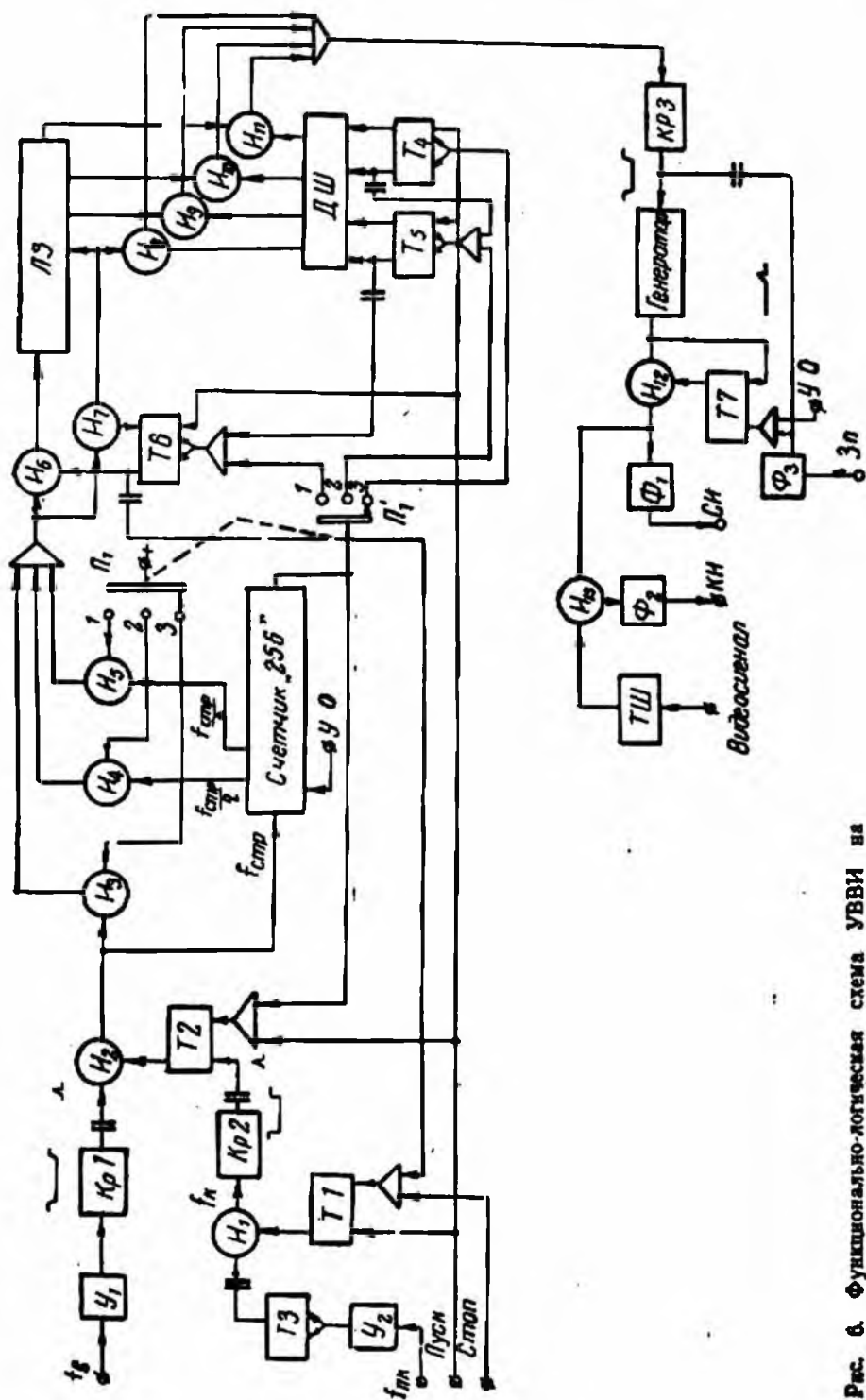


Рис. 6. Функционально-логическая схема УВВИ на основе ППУ.

схема совпадения H_2 , импульсы частоты строк $f_{стр}$, соответствующие началу прямого хода строчной развертки, начнут поступать на Счетчик 256 и схему H_3 . Импульсы частоты $f_{стр}$ проходят через $KP1$, что позволяет осуществлять задержку относительно начала строк.

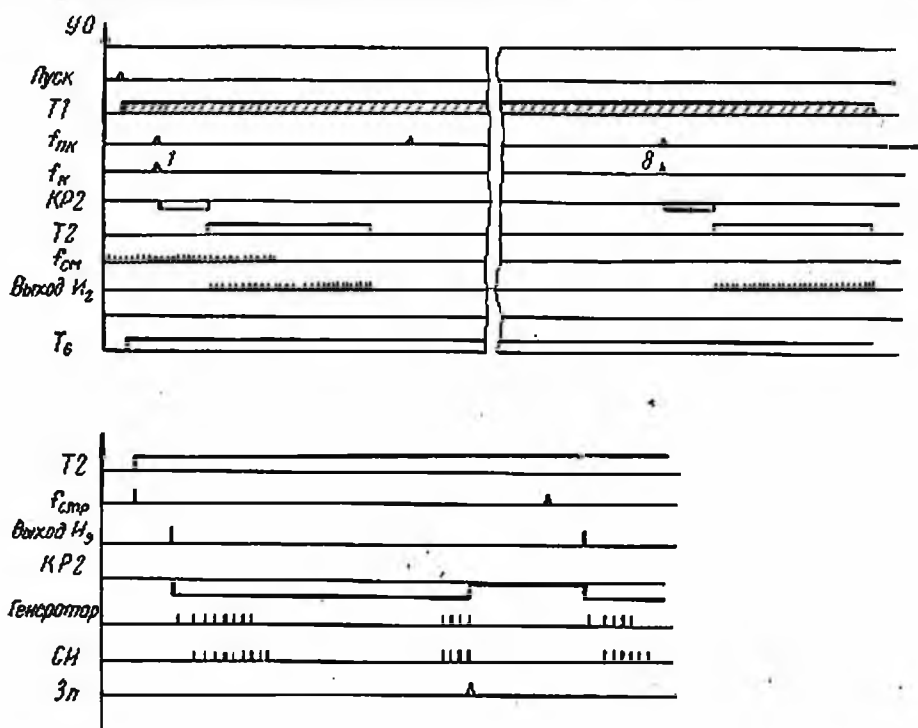


Рис. 7. Временная диаграмма.

При положении переключателей P_1 и P_1' в положении 3 импульсы $f_{стр}$ через схему H_3 и открытые схемы H_7 и H_8 будут запускать кипп-реле $KP3$, которое, в свою очередь, запускает Генератор. На выходе Генератора появится серия импульсов частоты $f_{нод}$, количество которых в серии определяется длительностью импульса на выходе $KP3$.

Ввиду того, что частота $f_{нод}$ устанавливается, начиная со второго импульса, первый импульс задерживается с помощью $T7$ и схемы совпадения H_{12} .

Видеосигнал поступает на триггер Шмидта $TШ$, с помощью которого получаем сигнал «черного» и «белого». Квантование «черного» с частотой $f_{нод}$ происходит в схеме H_{13} . В ЦВМ импульсы кода $KИ$, импульсы сдвига $СИ$ и импульсы $Зл$, необходимые для определения момента записи числа в МОЗУ, выдаются через формирователи Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 , обеспечивающие согласование с элементами ЦВМ.

После процесса квантования в 256 строках первого полукадра импульс с выхода счетчика Счетчик 256 перебросит $T2$, схема H_2 закроется, одновременно произойдет прибавление «1» к счетчику, образуемому из $T4$, $T5$ и $T6$. При этом будут открыты схемы H_7 и H_8 .

Следующий импульс f_k снова перебросит триггер $T2$, и начнется процесс выработки $f_{нод}$. При этом серия $f_{нод}$ с выхода Генератора задержится на Δt относительно первого полукадра, так как импульсы будут проходить через H_7 и H_8 .

После восьмого цикла счетчик $T4$, $T5$, $T6$ придет в исходное состояние и импульс переполнения сбросит триггер $T1$. Процесс ввода будет закончен.

С помощью переключателя Π_1 и Π_2 можно изменять разрешающую способность УВВИ. При положении 3 разрешающая способность равна 256×256 . В положении 2 — 128×128 . В положении 1 — 64×64 .

Растр можно смещать по вертикали с помощью кпп-реле $KP2$, по строкам — с помощью кпп-реле $KP1$.

Стыковка УВВИ с БЭСМ-2М

Как видно из рассмотрения функциональной схемы в предыдущем разделе, был принят вариант последовательного ввода в машину. Такой способ ввода не требует сложной аппаратуры и легко осуществим ввиду того, что в машине БЭСМ-2М, в которую предусматривался ввод визуальной информации, используется последовательный метод передачи кодов при обмене кодами между МОЗУ и внешним магнитным запоминающим устройством (МЗУ) на барабанах и лентах.

При обращении к МЗУ машина переходит на синхронизацию от синхронизирующих импульсов (СИ), вырабатываемых в МЗУ.

Схема стыковки УВВИ с БЭСМ-2М строилась так, чтобы возможно было обращение к УВВИ по команде считывания с магнитного барабана.

При считывании с барабана из МЗУ (рис. 8) [7] коды поступают на АУ через вентиль-формирователь ВФ 1/2. Сдвиги последовательно поступающих разрядов кода осуществляют импульсы *Сдвиг на АУ* с ВФ 1/28. После того, как код одного числа полностью разместится на регистрах АУ, выдается импульс *У «О» МОЗУ* с ВФ 1/26. По этому импульсу число будет принято в МОЗУ, и станет возможно осуществлять сдвиги разрядов следующего числа. После того, как завершится передача последнего числа (окончание массива фиксирует счетчик местного управления), происходит сброс триггера $T6$, который был установлен в «1» при начале обмена. Для введения в МОЗУ информации от УВВИ необходимо, чтобы *У «О» МОЗУ*, *Сдвиг на АУ* и *Код из МЗУ* вырабатывались по сериям $3n$, $СИ$ и $КН$ от УВВИ (рис. 6). При этом должны быть заблокированы серии, вырабатываемые от барабана. Это осуществляется с помощью подачи запрещающего уровня на шину *Отключение выходов* (этот режим используется при автономной наладке МЗУ).

В схему МЗУ БЭСМ-2М были внесены небольшие добавления, показанные на рис. 8 штриховыми линиями.

При подаче разрешающего уровня на шину *Включение УВВИ* серии *У «О» МОЗУ*, *Сдвиг на АУ*, *Код из МЗУ* вырабатываются по $3n$, $СИ$ и $КН$ от УВВИ. *Пуск на УВВИ* подается с вентиля $V163$ в момент выдачи сигнала совпадения ($TСп$ переходит в положение «1»). Признаком обращения к УВВИ являются указанные в команде считывания с барабана 6 или 7 группы. Этих групп нет на барабане, поэтому с него ничего не будет считано.

Установка УВВИ в положение «О» перед вводом осуществляется от импульса *У «О» МОЗУ*, вырабатываемого в МЗУ перед началом обмена кодами с МОЗУ.

Изложенное выше свидетельствует о простоте схемы связи УВВИ с БЭСМ-2М. Время ввода следующее. При разрешающей способности 256×256 требуется 16 периодов полукадровой развертки. При стандар-

те 50 полукадров в секунду это составляет $\frac{16}{50} = 0,32 \text{ сек.}$ При этом МОЗУ будет заполнено полностью.

По описанной схеме реализовано устройство ввода, используемое для решения задач, связанных с распознаванием объектов.

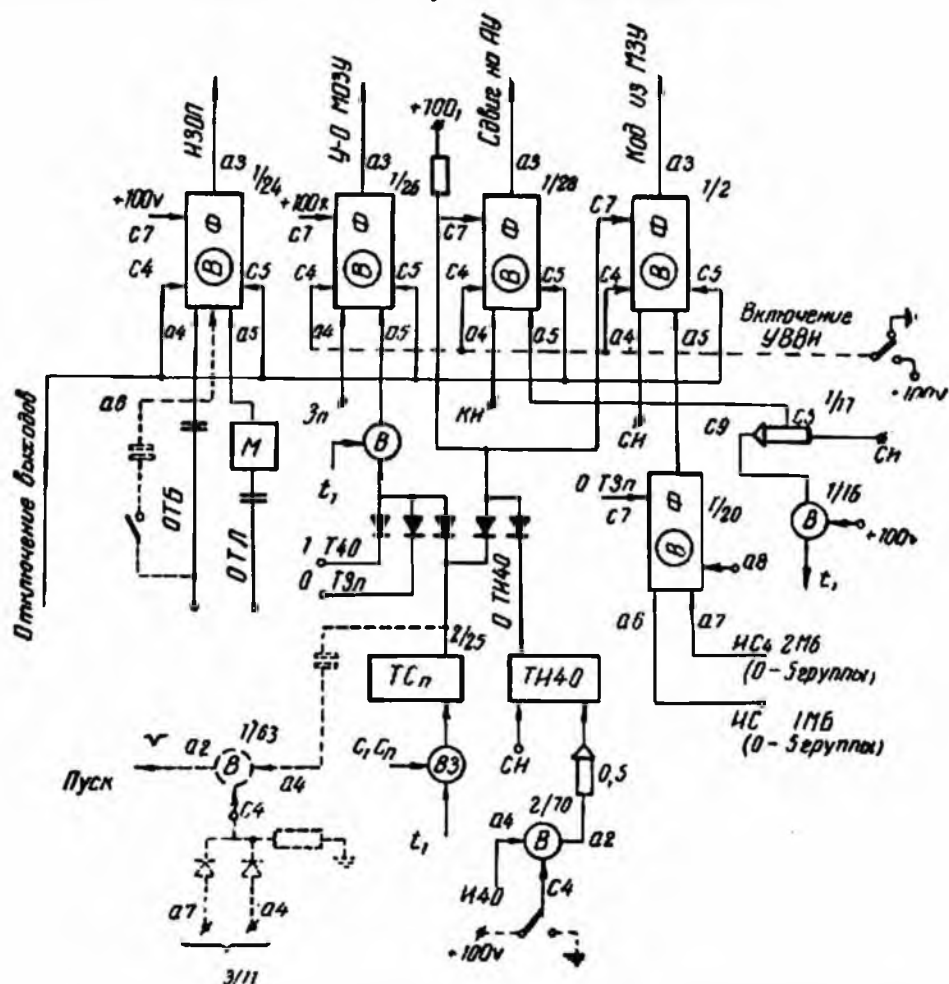


Рис. 8. Схема выработки кодовых импульсов и узел управления обменом кодов МЗУ БЭСМ-2М.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. П. Катус. Сканирующие фотозлектронные устройства поиска и слежения. Изд-во «Наука», 1964.
2. В. А. Гармаш. О минимальном описании с помощью условной программной развертки. «Радиотехника», 1960, № 10.
3. В. А. Ковалевский, А. Г. Семенов. Цифровая следящая система чигающего автомата СБ «Автоматика и приборостроение», ч. 1. Киев, ИТИ, 1962.
4. В. С. Перевертеев-Орлов. Экстраполирующая следящая развертка, Сб. «Опознавание образов. Теория информации», АН СССР, ИППИ. Изд-во «Наука», 1963.
5. В. Г. Подьяков. О цифровой технике скитывания и анализа контуров, Сб. «Опознавание образов. Теория передачи информации», АН СССР, ИППИ. Изд-во «Наука», 1965.
6. В. М. Глушков, В. А. Ковалевский, В. И. Рыбки. Универсальная установка для исследования алгоритмов распознавания изображений. Сб. «Принципы построения самообучающихся систем», Гостехиздат УССР, 1962.

7. Н. И. Меркулов, А. А. Павляков, А. С. Федоров. Запоминающие устройства ВЭСМ-2. Физматгиз, 1963.

8. В. И. Рыбак. Аппаратура для обработки оптической информации с помощью универсальных вычислительных машин. Сб. «Кибернетика и вычислительная техника». Изд-во «Наукова думка», Киев, 1964.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВКУСОВОГО АНАЛИЗАТОРА ЧЕЛОВЕКА

**Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, Ю. С. Марченко,
М. Ф. Бондаренко**

Цель работы — математическое описание преобразования органом вкуса человека вкусового стимула во вкусовое ощущение.

Приведем некоторые математические сведения. Пусть R^n — n -мерное евклидово пространство; M — некоторое множество; F — однозначное отображение R^n на M , удовлетворяющее следующим условиям:

а) если $Fx_1 = Fu_1$ и $Fx_2 = Fu_2$, то $F(x_1 + x_2) = F(u_1 + u_2)$ ($x_1, u_1, x_2, u_2 \in R^n$);

б) существуют векторы $a_i \in R^n$ ($1 \leq i \leq m \leq n$) такие, что для любого $x \in R^n$ найдется единственный набор вещественных чисел $a_i \equiv a_i(x)$ ($1 \leq i \leq m$) такой, что $Fx = F\left(\sum_{i=1}^m a_i a_i\right)$;

с) функционалы $a_i(x)$ непрерывны.

Рассмотрим отображения $L: R^n \rightarrow R^m$ и $f: R^m \rightarrow M$, причем f — биективно, а L — эпиморфизм линейных пространств.

Теорема. Условиям а) — с) удовлетворяют отображения вида

$$F = f \circ L \quad (1)$$

и только они.

Доказательство. Пусть выполняются условия а) — с). Поставим в соответствие каждому $x \in R^n$ вектор $Lx \in R^m$, положив $Lx = (a_1(x), a_2(x), \dots, a_m(x))$. Условие в) устанавливает взаимно-однозначное соответствие между Lx и Fx . Обозначим его через f .

Осталось показать, что L — эпиморфизм. Из условия б) для любых $x, y \in R^n$ имеем

$$Fx = F\left(\sum_{i=1}^m a_i(x) a_i\right), \quad Fy = F\left(\sum_{i=1}^m a_i(y) a_i\right), \quad (2)$$

$$F(x + y) = F\left(\sum_{i=1}^m a_i(x + y) a_i\right). \quad (3)$$

Из условия а) и равенств (2) следует, что

$$F(x + y) = F\left(\sum_{i=1}^m (a_i(x) + a_i(y)) a_i\right). \quad (4)$$

Сравнивая (3) и (4), в силу условия б) имеем

$$a_i(x + y) = a_i(x) + a_i(y) \quad (1 \leq i \leq m).$$

Отсюда и из условия с) вытекает линейность оператора L .

Предположим, что вопреки доказываемому $\text{Im} L \neq R^m$. Тогда найдется отличный от нуля вектор $\bar{z} \in R^m$ такой, что $(Lx, \bar{z}) = 0$ тождественно по x , т. е.

$$\sum_{i=1}^m a_i(x) \bar{z}_i \equiv 0 \quad (\bar{z} = (\bar{z}_1, \bar{z}_2, \dots, \bar{z}_n))$$

и система функционалов $\{a_i(x)\}_{i=1}^m$ линейно зависима. Но из условия б) вытекает биортогональность систем $\{a_i\}_{i=1}^m$ и $\{z_i\}_{i=1}^m$, а следовательно, и линейная независимость каждой из них. Полученное противоречие доказывает, что $\text{Im} L = R^m$. Следовательно, L — эпиморфизм линейных пространств $R^n \rightarrow R^m$.

Пусть теперь $F = fL$. Выполнение условия а) очевидно. Для доказательства условий б) и с) выберем линейно независимую систему векторов $\{a_i\}_{i=1}^m$ в ортогональном дополнении к ядру оператора L . Величины $a_i(x)$ однозначно определяются равенством (тождественным относительно x)

$$Lx = \sum_{i=1}^m a_i(x) La_i, \quad (5)$$

причем функционалы $a_i(x)$ непрерывны. Но в силу (1) равенство (5) эквивалентно равенству

$$Fx = F\left(\sum_{i=1}^m a_i(x) a_i\right).$$

Теорема доказана.

Опираясь на приведенную теорему, покажем, что функционирование вкусового анализатора человека может быть описано отображением вида (1).

Точки $A_1, A_2, \dots, A_n$ пространства R^n будем интерпретировать как вкусовые стимулы в виде водных растворов порознь взятых различных веществ $a_1, a_2, \dots, a_n$ с весовыми концентрациями соответственно $p_1, p_2, \dots, p_n$. Линейную комбинацию $A \in R^n$ вкусовых стимулов $A_1, A_2, \dots, A_n$, $A = \sum_{i=1}^n \lambda_i A_i$ будем интерпретировать как вкусовой стимул в

виде совместного водного раствора веществ $a_1, a_2, \dots, a_n$, взятых с весовыми концентрациями $\lambda_1 p_1, \lambda_2 p_2, \dots, \lambda_n p_n$. Всевозможные вкусовые стимулы представлены множеством точек, образующим ограниченную часть положительного конуса в пространстве R^n . Символ n означает общее число различных веществ, водные растворы которых могут быть использованы в качестве вкусовых стимулов.

Элементы множества M интерпретируем как различные вкусовые ощущения, возникающие у испытуемого в ответ на действие того или иного вкусового стимула. При этом имеется в виду собственно вкусовое ощущение, в состав которого не включаются температурные и тактильные ощущения, возникающие у испытуемого одновременно со вкусовыми ощущениями в ответ на действие вкусового стимула.

Под отображением F будем понимать математическое описание преобразования вкусового стимула во вкусовое ощущение, которое осуществляется вкусовым анализатором человека.

Требование однозначности отображения F означает, что вкусовой анализатор должен реагировать всегда одним и тем же ощущением на одинаковые вкусовые стимулы, т. е. если $A' = A''$, то $FA' = FA''$.

Условие а) применительно к органу вкуса означает следующее. Пусть подобраны две пары вкусовых стимулов A'_1, A'_2 и A''_1, A''_2 таким образом, что стимулы каждой пары имеют одинаковый вкус, т. е. $FA'_1 = FA'_2$ и $FA''_1 = FA''_2$. В этом случае суммарные стимулы $A'_1 + A'_2$ и $A''_1 + A''_2$ также должны иметь одинаковый вкус, т. е. $F(A'_1 + A'_2) = F(A''_1 + A''_2)$. Принимаем $m = 4$. В этом случае условие б) означает: должны существовать такие четыре вкусовых стимула $A^0_1, A^0_2, A^0_3, A^0_4$, что для произвольного стимула A найдется единственная их линейная комбинация $\alpha_1 A^0_1 + \alpha_2 A^0_2 + \alpha_3 A^0_3 + \alpha_4 A^0_4$, имеющая тот же вкус, что и стимул A , т. е.

$$FA = F(\alpha_1 A^0_1 + \alpha_2 A^0_2 + \alpha_3 A^0_3 + \alpha_4 A^0_4).$$

Условие с) означает, что при малых изменениях стимула A должны наблюдаться малые изменения коэффициентов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, фигурирующих в условии б).

Смысл теоремы применительно к проблеме вкуса состоит в том, что в случае выполнения трех вышеприведенных условий есть основание изображать вкусовые ощущения в виде точек четырехмерного пространства $R^m = R^4$, причем одинаковым ощущениям будут соответствовать одинаковые точки пространства, а различным — различные. Совокупность точек, изображающих всевозможные вкусовые ощущения, образует ограниченную часть пространства R^4 , которую будем называть вкусовым телом. Согласно теореме, должно существовать линейное отображение $L: R^4 \rightarrow R_4$, которое позволительно рассматривать в качестве математического описания функционирования вкусового анализатора человека.

Ниже на экспериментальном материале демонстрируется справедливость условий а) — с), обосновывающих использование формулы (1) для целей математического описания работы органа вкуса человека.

Опыт показывает, что для обеспечения однозначности отображения F достаточно выполнения следующих условий.

1. Перед началом эксперимента проверить сенсорную восприимчивость вкусового анализатора испытуемого (по одному дифференциальному порогу для A^0_1, A^0_2, A^0_3 и A^0_4) и сравнить со средними значениями дифференциальных порогов практически здоровых испытуемых.

2. Методику проведения опытов строить таким образом, чтобы исключить или значительно понизить обонятельные, тактильные, болевые и температурные ощущения, тесно связанные с вкусовыми.

3. Эксперимент начинать по парному методу, а затем перейти к треугольному методу сравнения, дающему более высокую точность.

4. В эксперименте предъявлять испытуемым пробы в объеме $V = 10 \div 15$ мл, всегда одинаковые для данного испытуемого, и рекомендовать выдерживать пробу во рту $t = 5 \div 10$ сек; после каждой пробы прополаскивать рот водой.

5. Промежутки времени между сравниваемыми стимулами выдерживать $t = 20 \div 30$ сек, между соседними предъявлениями $\tau = 2 \div 3$ мин.

6. В экспериментах уделять большое внимание явлению адаптации, строго соблюдать интервалы времени между пробами, представлять пробы для оценки по мере возрастания интенсивности.

7. Число проб при проведении эксперимента ограничить до $k = 40 \div 50$, чтобы предупредить физиологическую утомляемость.

8. При проведении экспериментов исключить неадекватные раздражители (шум, запахи, мигание света, вибрации и пр.), оказывающие весьма отрицательное влияние.

Вопрос о необходимых условиях, обеспечивающих однозначность отображения F , в работе не рассматривается.

Эксперименты для демонстрации однозначности отображения проводились с вкусовыми стимулами (табл. 1) и их различными линейными комбинациями. Все растворы химических веществ — водные, указанные в таблице концентрации — весовые (число граммов растворенного вещества в 1000 г раствора).

Таблица 1

Наименование вкусового стимула	Обозначение стимула
1%-ный раствор сахарозы	A_1^0
0,1%-ный раствор винной кислоты	A_2^0
0,1%-ный раствор хлористого натрия	A_3^0
10^{-4} %-ный раствор солянокислого хинина	A_4^0
1%-ный раствор сорбита	A_5
1%-ный раствор маннита	A_6
1%-ный раствор дульцита	A_7
0,1%-ный раствор лимонной кислоты	A_8
0,1%-ный раствор яблочной кислоты	A_9
0,1%-ный раствор щавелевой кислоты	A_{10}
10^{-1} %-ный раствор сернокислого хинина	A_{11}
10^{-4} %-ный раствор пикриновой кислоты	A_{12}
10^{-2} %-ный раствор кофеина	A_{13}
Вино Портвейн белый южнобережный марочный, выдержанный 3 года, виномбинат «Золотая балка»	A_1'
Пиво «Рижское», Харьковский пивзавод № 2, РТУ УССР 979—65	A_2'
Квас «Московский», Харьковский облищепром, РТУ УССР 82—66	A_3'
Виноградный сок Сорт марочный Ркацители, консервный завод имени В. И. Ленина, Одесса, МРТУ 18/79—65	A_4'
Яблочный сок Виноградский консервный зав. г. МРТУ 18/34—65	A_5'
Томатный сок Херсонский консервный комбинат, МРТУ 18/20—65	A_6'
Морковный сок Консервный завод имени 1 Мая, Симферополь, МРТУ 18/23—65	A_7'
Вишневый сок Консервный завод имени В. И. Ленина, Одесса, МРТУ 18/13—65	A_8'
Сок манго Изготовлен в Индии	A_9'
Абрикосовый сок Октябрьский консервный завод, АрмССР, МРТУ 18/13—65	A_{10}'

Во время проведения опытов было принято $V = 10$ мл, $\theta = 6$ сек, $\tau = 2$ мин, $t_{\text{дет}} = 30^\circ\text{C}$, $\Delta t = 30$ сек. Эти опыты, как и все последующие, выполнялись с десятью испытуемыми. Каждый опыт состоял в предъявлении в случайном порядке пары вкусовых стимулов с одинаковыми или различными стимулами в паре. Испытуемый должен был установить, одинаков вкус стимулов или нет. Во всех случаях испыту-

емые указывали, что вкус одного и того же стимула одинаков. Предъявлялись следующие одинаковые в паре стимулы: 1,2 A_1^0 ; 2,3 A_8 ; 2,7 A_6 ; 2,8 A_7 ; 0,64 A_2^0 ; 0,7 A_4 ; 0,7 A_5 ; 0,5 A_{10} ; 4,2 A_4^0 ; 4 A_{11} ; 3,8 A_{12} ; A_2' ; A_3' ; A_4' ; A_5' ; A_7' ; A_{10}' . Предъявление каждой пары перечисленных стимулов повторялось пять раз. Подобные опыты выполнялись и при других значениях параметров V , 0 , τ , t , Δt , назначаемых в пределах, указанных в условиях 1)–8). Во всех без исключения случаях одинаковые стимулы имели одинаковый вкус.

Таблица 2

A	a_1	a_2	a_3	a_4
A_1	0,5 (0,45 $\div$ 0,54)	0	0	0
A_2	0,445 (0,41 $\div$ 0,48)	0	0	0
A_3	0,42 (0,39 $\div$ 0,46)	0	0	0
A_4	0	0,92 (0,87 $\div$ 0,95)	0	0
A_5	0	1,033 (0,94 $\div$ 1,09)	0	0
A_{10}	0	1,276 (1,2 $\div$ 1,32)	0	0
A_{11}	0	0	0	1 (0,92 $\div$ 1,11)
A_{12}	0	0	0	1,143 (1,03 $\div$ 1,2)
A_{13}	0	0	0	0,0025 (0,0021 $\div$ 0,0028)
A_1'	3,0 (2,6 $\div$ 3,38)	0,5 (0,46 $\div$ 0,53)	0,6 (0,53 $\div$ 0,66)	10,0 (9,1 $\div$ 11,3)
A_2'	1,33 (1,17 $\div$ 1,41)	0,667 (0,59 $\div$ 0,73)	1,33 (1,25 $\div$ 1,44)	28,7 (25 $\div$ 31)
A_3'	3,0 (2,57 $\div$ 3,42)	1,34 (1,2 $\div$ 1,47)	1,0 (0,93 $\div$ 1,11)	0
A_4'	8,34 (7,15 $\div$ 9,2)	2,27 (1,86 $\div$ 2,59)	1,67 (1,4 $\div$ 1,94)	0
A_5'	5,67 (4,79 $\div$ 6,38)	2,33 (1,94 $\div$ 2,6)	1,3 (1,18 $\div$ 1,43)	2,16 (1,8 $\div$ 2,41)
A_6'	0,4 (0,35 $\div$ 0,44)	1,0 (0,93 $\div$ 1,09)	1,66 (1,43 $\div$ 1,82)	0
A_7'	5,0 (4,31 $\div$ 5,87)	0	1,0 (0,96 $\div$ 1,09)	1,33 (1,15 $\div$ 1,47)
A_8'	4,67 (4,08 $\div$ 5,2)	2,1 (1,83 $\div$ 2,39)	0	1,67 (1,4 $\div$ 1,88)
A_9'	15,33 (12,87 $\div$ 18,44)	1,43 (1,2 $\div$ 1,58)	0	0
A_{10}'	18,0 (15,3 $\div$ 21,1)	1,67 (1,43 $\div$ 1,91)	0	1,68 (1,4 $\div$ 1,95)

Опыт также показывает, что при соблюдении условий 1)–8) имеет место выполнение условия а), которое будем именовать законом аддитивности. Для демонстрации справедливости этого закона выбирались следующие пары стимулов, имеющие для всех испытуемых одинаковый вкус в каждой паре: 2,88 A_1^0 и 2,76 A_{12} ; 1,06 A_1^0 и 2,14 A_2 ; 0,366 A_3 и 0,274 A_{10} ; 0,884 A_1^0 и 1,87 A_5 ; 0,411 A_4 и 0,308 A_{10} ; 1,24 A_4^0 и 1,18 A_{12} . Попарные суммы этих стимулов 2,88 A_1^0 + 1,06 A_1^0 и 2,76 A_{12} + 2,14 A_2 ; 0,366 A_3 + 0,884 A_1^0 и 0,274 A_{10} + 1,87 A_5 ; 0,411 A_4 + 1,24 A_4^0 и

0,308 $A_{10} + 1,18 A_{12}$ также не различаются всеми испытуемыми по вкусу.

Если соблюдаются условия 1—8, при $m = 4$ выполняется условие б), которое назовем законом четырехмерности. В качестве базисных вкусовых стимулов будем использовать растворы $A_1^0, A_2^0, A_3^0, A_4^0$. Опыт показывает, что для произвольно взятого вкусового стимула A всегда можно так подобрать числа $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, что стимул $\alpha_1 A_1^0 + \alpha_2 A_2^0 + \alpha_3 A_3^0 + \alpha_4 A_4^0$ будет иметь вкус стимула A . В табл. 2 для различных вкусовых стимулов указаны численные значения $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, обеспечивающие вкусовые равенства для всех десяти испытуемых.

Опытная проверка требования единственности выбора чисел $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ показала, что с точностью до порога различения вкусовых ощущений такая единственность существует. Величина порога различения, определяемая по вариации чисел $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, в среднем может быть оценена величиной в 15—17%.

В табл. 2 в скобках приведены найденные опытным путем для одного испытуемого предельные значения чисел α_i , при которых стимулы A и $\sum_{i=1}^m \alpha_i A_i^0$ еще воспринимаются как равные по вкусу. Имеется в виду, что изменению подвергается лишь одно из чисел α_i , остальные же сохраняют значения, указанные в табл. 2.

Таблица 3

A	α_1	α_2	α_3	α_4
A_6	6,1	2,4	1,26	1,97
A_3	5,84	2,13	1,38	2,24
A_5	4,79	2,6	1,18	2,31
A_6	5,13	2,48	1,27	2,13
A_5	6,38	2,15	1,34	2,41
A_5	5,93	1,94	1,29	2,33
A_5	5,71	2,18	1,32	2,15
A_5	4,9	2,41	1,43	2,3
A_5	5,98	2,37	1,31	2,22
A_5	5,65	2,51	1,40	1,8

В табл. 3 приведены результаты многократного уравнивания по вкусу стимула A_5 смесью $\sum_{i=1}^m \alpha_i A_i^0$, выполненного одним и тем же испытуемым. Эти данные также свидетельствуют о справедливости закона четырехмерности (с точностью до порога различения).

В табл. 4 в виде примера показано, как изменяются числа α_i в подравниваемой смеси при плавном изменении вкусового стимула. Эксперименты проводились с одним испытуемым. В каждом опыте взяты средние значения α_i из десяти уравнений.

Как видно из табл. 4, малым изменениям стимула соответствуют незначительные по величине колебания чисел $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, что доказывает справедливость закона непрерывности.

Таблица 4

А			α_1	α_2	α_3	α_4
1,18	$A_{12} + 0,3$	A_{10}	0	0,383	0	1,26
1,35	$A_{12} + 0,3$	A_{10}	0	0,46	0	1,5
1,53	$A_{12} + 0,3$	A_{10}	0	0,38	0	1,54
1,7	$A_{12} + 0,3$	A_{10}	0	0,40	0	2,1
1,7	$A_{12} + 0,37$	A_{10}	0	0,46	0	1,9
2,1	$A_{12} + 0,45$	A_{10}	0	0,58	0	2,15
2,6	$A_{12} + 0,5$	A_{10}	0	0,69	0	2,75
2,6	$A_{12} + 0,55$	A_{10}	0	0,65	0	2,6
2,9	$A_{12} + 0,55$	A_{10}	0	0,72	0	3,3
3,3	$A_{12} + 0,6$	A_{10}	0	0,77	0	3,58

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЗРИТЕЛЬНО-ГО ВОСПРИЯТИЯ ПРОСТРАНСТВА ПРИ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖУЩИМИСЯ СИСТЕМАМИ РАЗЛИЧНОГО ВИДА

Я. Я. Белик

При управлении быстро движущимися системами одним из основных признаков восприятия удаленности, а также положения управляемого аппарата является видимая скорость точек земной поверхности и отдельных предметов.

Видимая скорость точек Земли зависит от нескольких факторов: направления движения управляемой системы, ее линейной скорости, направления линии взора, высоты глаза оператора до Земли. Между всеми перечисленными параметрами существует связь, на основе которой работает прижизненно формирующаяся функциональная система восприятия удаленности. В качестве входных сигналов ее могут выступать все непосредственно измеряемые величины (угловые величины) либо известные из опыта линейные эталоны, запечатленные в блоке памяти.

Прежде чем рассматривать вопрос о конкретных математических моделях, выясним, какого вида комбинация линейной скорости может служить входным сигналом функциональной системы.

Расчеты показывают, что конкретный вид комбинации зависит от режимов движения.

Самый простой по форме вид получается для случая вращения аппарата вокруг своей оси без значительного смещения (например, вращение вертолета при посадке на площадку и опускании груза). Для этого случая

$$\frac{1}{2} \operatorname{rot} \vec{U} = \vec{\Psi}. \quad (1)$$

где $\vec{\Psi}$ — угловая скорость точек земной поверхности относительно вертолета;

$\operatorname{rot} \vec{U}$ — ротор линейных скоростей точек Земли относительно центра вращения.

Следовательно, здесь видимую скорость определяет $\text{rot } \vec{U}$. В случае вертикального движения за величину видимой скорости точек Земли ответственно выражение

$$\frac{|\text{rot } \vec{U}|}{|\vec{i} + 2 \sin^2 \gamma \vec{j}|} = \dot{\Psi}, \quad (2)$$

где $\vec{U}_1$ — составляющая линейной скорости, ортогональная линия зрения;

$\vec{i}, \vec{j}$ — единичные орты в направлении декартовых координат X и Y .

Выражения (1) и (2) указывают на вихревую природу угловой скорости точек земной поверхности.

Рассмотрим модели функциональной системы восприятия удаленности при управлении конкретными движущимися системами (самолет, вертолет, автомобиль, локомотив, судно и т. д.).

Нами получена единая для такого рода управляемых систем модель восприятия удаленности, согласно которой видимая скорость определяется как

$$\dot{\Psi} = \frac{v}{h} \sin \gamma \sin \alpha, \quad (3)$$

где $\dot{\Psi}$ — видимая скорость наблюдаемой точки Земли;

v — линейная скорость движения;

h — высота глаза оператора до поверхности Земли;

γ — угол визирования угол между линией зрения и поверхностью Земли);

α — угол между направлением движения и линией зрения.

Из модели (3) следует, что входными сигналами функциональной системы восприятия высоты являются: видимая скорость $\dot{\Psi}$, видимый угол визирования γ , видимый угол α — сигналы первого рода (величины, непосредственно измеряемые в силу строения зрительного анализатора), а также линейная скорость движения v — сигнал второго рода, связанный, к примеру, с показаниями соответствующего прибора.

В случае летательного аппарата выходным сигналом функциональной системы является оцененная высота. В случае систем, движущихся по Земле или воде, для которых $h = \text{const}$ и при управлении которыми важно восприятие удаленности до ориентиров, расположенных впереди, модель (3) переходит в (3а):

$$\dot{\Psi} = \frac{v}{l} \sin \alpha. \quad (3a)$$

В этой модели выходным сигналом функциональной системы восприятия удаленности является l .

Поскольку распределение видимых скоростей зависит от направления движения управляемого аппарата, отсутствие в модели (3) угла, характеризующего направление движения, на первый взгляд может показаться не вполне ясным.

На самом деле зависимость видимой скорости от направления движения в модели (3) существует в неявном виде. Различные направления движения определяют возможные области изменения видимых углов α и γ .

Из области значения видимых углов α и γ , определенных из модели (4), для каждого конкретного направления движения должны выбираться не противоречащие этому направлению углы α и γ .

Все указанное важно лишь для понимания целой картины распределения видимых скоростей. Если же касаться основного вопроса — собственно восприятия удаленности, то его определяют входящие в модель (3) видимые углы α и γ , видимая скорость ψ и линейная скорость v .

Как было указано, распределение видимых скоростей в поле зрения позволяет не только воспринимать высоту в случае летательных аппаратов, но и указывает на положение управляемого аппарата. Это связано с изменением в поле зрения фиксируемой области, а следовательно, и видимой скорости при изменении положения управляемого аппарата (положение оператора относительно аппарата считается достаточно фиксированным).

Для систем вертикального движения в модели (3) видимый угол

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \gamma.$$

Очень интересны для восприятия линии одинаковой видимой скорости. Из модели (3) следует, что для вертикального движения оператора (вертолет, самолет вертикального взлета и посадки) эти линии представляют концентрические окружности, так как точки их видны под одинаковым углом визирования γ .

Распределение видимых скоростей в данный момент времени полностью определяется углом визирования ($\psi \sim \sin 2\gamma$).

Взлет вертолета в среднем осуществляется со скоростью 0,2 м/сек, посадка до высот 1—2 м — со скоростью 0,1 м/сек.

В качестве примера в табл. 1 приведем характерное для реальных условий распределение видимых скоростей при $v = 0,2$ м/сек, $h = 8$ м и некоторых выбранных углах визирования γ . Поскольку распределение видимых скоростей при взлете и посадке вертолета отличается лишь направлением видимых скоростей, данные величин видимых скоростей в равной степени относятся как к посадке, так и к взлету.

Таблица 1

γ°	90°	80°	70°	60°	50°	45°	40°	30°	20°	10°
$\psi \text{ сек}^{-1} 10^{-3}$	0	8,3	16	21,5	24,6	25	24,6	21,5	16	8,3

Осуществленное нами моделирование процессов восприятия удаленности способом скольжения и прослеживания, эксперименты на стереокинеперцентометре, а также проведенные в реальных условиях совместно с В. П. Тапасьевым на вертолетах Ка-26, Ми-4 эксперименты бесконтактной регистрации движения глаз с помощью японского прибора пас еге таре recorder показали, что способ скольжения отличается преимуществами перед способом прослеживания и что в реальных условиях восприятие удаленности ведется именно этим способом.

Эксперименты на вертолете Ми-4, Ка-26 показали также, что скольжение линии взора при вертикальном взлете (на высоту 30 м) и посадке осуществляется при небольших индивидуальных разбросах под углом визирования $\gamma = 25^\circ$.

Такой относительно небольшой угол не совсем удобен для восприятия абсолютной и относительной высоты, поскольку при малых углах скрадывается удаленность. На это указывают найденные модели восприятия*,

*Я. Я. Беллик. Моделирование восприятия удаленности и ее изменения по видимой скорости движущихся ориентиров. Докл. на конф. по моделированию псих. деятельности, Новосибирск, 1969.

опрос летчиков и регистрация положения головы и глаз в экспериментах на нас eye trace recorder. Направление линии зра вертолётчика под углом 25° объясняется тем, что при скольжении под этим углом, во-первых, летчик может держать в поле зрения линию горизонта, что очень важно для сохранения горизонтального положения вертолета — одного из самых важных моментов управления и, во-вторых, при этом угле высота еще не совсем скрадывается. Все это полностью относится к управлению самолетом с поправкой на несколько отличные от 25° углы визирования, зависящие от режимов полета самолета.

Определив из эксперимента типичный угол визирования, можно указать характерную для вертикального взлета и посадки зависимость видимой скорости от высоты

$$\Psi = 0,77 \frac{v}{h} \quad (36)$$

Из модели (36) следует, что видимая скорость обратно пропорциональна высоте.

Линии одинаковой видимой скорости, наблюдающиеся при управлении системами типа самолетов и автомобилей, определяются уравнением

$$\sin \gamma = \frac{\text{const}}{\sin \alpha}, \quad (4)$$

где

$$\text{const} = \Psi \frac{h}{v} \leq 1.$$

Из модели (4) видно, что, задаваясь определенными углами α (такими, чтобы $\frac{\text{const}}{\sin \alpha} \leq 1$), можно построить интересующие нас линии одинаковой видимой скорости.

Таблица 2

$\Psi \text{ сек}^{-1}$	2										1												
α°	53	55	60	65	70	75	80	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	23			
γ°	90	77	65	61	58	55	54	24	24,5	25	26	27	29	31,5	34,5	38	44	53	70	90			
$\Psi \text{ сек}^{-1}$	0,5										0,25												
α°	30	40	50	60	70	80	90	4	7	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90			
γ°	90	51	41	35	32	30,5	30	90	55	35	23	17	14	12	9	7,5	6,6	6	5	4			

В табл. 2 приведены численные значения, характеризующие кривые одинаковой видимой скорости при $v = 50 \text{ м/сек}$, $h = 20 \text{ м}$ (для различных направлений движения из этих и промежуточных значений надо выбирать одновременно возможные α и γ). Данные этой таблицы характерны для распределения видимых скоростей при посадке самолета.

Рассмотрим, к примеру, режим выравнивания, в котором самолет движется под определенным (небольшим, порядка 10°) углом к Земле, так что движение осуществляется в одну точку. В эту же точку по инструкции должен быть направлен взгляд пилота. Из модели (3) следует, что видимая скорость этой точки равна нулю, а видимая скорость окружающих точек увеличивается при отходе от этой точки до тех пор, пока произведение $\sin \alpha \times \sin \gamma$ не станет максимальным. Картина видимых скоростей, зависящая от направления этих скоростей и их распределения по величине, такова, что земля как бы расходитсЯ во все стороны.

Линии одинаковой видимой скорости наглядно можно представить как периметры сечений поверхности Земли коническими поверхностями, полученными вращением образующей вокруг вершины конуса (циклоидического глаза оператора). Характер вращения определяется зависящими друг от друга значениями α и γ (типа приведенных в табл. 2).

Если в управляемой системе достаточно велик сектор обзора, то, очевидно, при положении глаз, параллельном поверхности Земли, оператор будет видеть симметрию в распределении видимых скоростей относительно проекции направления движения на Землю.

Эта симметрия или асимметрия в распределении видимых скоростей являются указателем положения управляемой системы относительно Земли. Данный признак становится особенно важным при полетах на сравнительно небольших высотах в пасмурную погоду или ночью, поскольку более сильный дневной признак — положение горизонта относительно характерных частей управляемой системы (например, капота самолета, вертолета) — в это время отсутствует, а светящихся или видимых деталей на Земле может быть достаточно.

Распределение видимых скоростей в поле зрения водителя автомобиля и других движущихся наземных систем описывается моделью (3а), согласно которой при постоянном α , зависящем от скорости движения, видимая скорость обратно пропорциональна удаленности l до находящегося впереди объекта на Земле. В реальных условиях управления автомобилем углы визирования достаточно малы. Это объясняется тем, что при больших углах визирования угловые скорости находятся в зоне слияния мельканий и недоступны для восприятия.

Итак, для частных случаев движения показана вихревая природа видимой скорости, получена общая модель функциональной системы восприятия удаленности по видимой скорости ориентиров и применительно к системам типа вертолета, самолета и автомобиля описаны распределения видимых скоростей точек земной поверхности, в реальных условиях полета выявлен основной способ восприятия удаленности — способ скольжения линии взора, получены значения углов визирования и указаны причины использования малых углов визирования при управлении различного рода движущимися системами.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ В СЕТЧАТКЕ ГЛАЗА ЛЯГУШКИ

Ю. И. Зозуля, Ю. И. Нефедов, В. Г. Червов, Ю. П. Бугай

В современных нейрофизиологических и бионических исследованиях анализаторов животных большое место занимает изучение отдельных нервных элементов и их групп, выделяющих (детектирующих) различные признаки входных сигналов.

Для большинства организмов очень важна информация о параметрах движения объектов окружающего мира: направлении, скорости, ускорении. В связи с этим особый интерес вызывают обнаруженные в зрительных анализаторах различных животных рецептивные поля, детектирующие движение. Исследования операций, выполняемых такими детекторами над входными возмущениями, сейчас весьма актуальны. Известные модели детекторов движения [1, 2, 3, 9] недостаточно исследованы с математической точки зрения и в большинстве случаев отражают функциональные, а не структурные особенности рецептивных полей зрительного анализатора, детектирующих движение.

В данной работе изложены математические модели детекторов движения и детекторов направления движения, обнаруженных у ряда живот-

ных на различных уровнях организации зрительных анализаторов. Модели детекторов движения, рассматриваемые ниже, построены, главным образом, на основе анализа данных о чувствительности к движению в элементах сетчатки глаза лягушки [2, 4, 5, 6]. Однако многие из полученных результатов могут быть легко распространены на аналогичные детекторы в анализаторах других животных.

Общие черты рецептивных полей, детектирующих движение

Как показали электрофизиологические исследования рецептивных полей ганглиозных клеток сетчатки глаза лягушки [2, 4], реакция всех классов детекторов значительно усиливается при движении стимулов. Выясним, каковы общие черты рецептивных полей, детектирующих движение, что общего у различных классов детекторов.

Анализ ответов ганглиозных клеток на движение составных пятен, полос, перепадов яркости приводит к выводу о том, что в переходных процессах, связанных с изменением освещенности отдельных фоторецепторов, возбуждение растет значительно быстрее торможения, вызывая обострение реакций детекторов. Различие инерционности процессов возбуждения и торможения в рецептивных полях можно объяснить либо разной инерционностью этих процессов в элементах сетчатки, либо различием инерционности возбуждающих и тормозящих связей рецептивных полей. Эти оба эффекта найдены в сетчатке глаза лягушки. Первый из них проявляется в адаптации быстрых и медленных биполяров к постоянному раздражителю [5], второй находит свое выражение во временной задержке латерального торможения по отношению к иррадирующему возбуждению [6].

Различие в инерционности возбуждения и торможения независимо от того, какие механизмы сетчатки глаза его вызывают, можно легко промоделировать, используя математический аппарат для описания непрерывных сред [7, 8, 10]. Как известно, такая среда полностью характеризуется функцией влияния линейной части среды и величиной порога срабатывания элементов. Функция влияния искомой модели может быть представлена в виде соотношения

$$G(x - x_0, y - y_0, t - t_0) = G_1(x - x_0, y - y_0) \gamma_1 e^{-\gamma_1(t-t_0)} - G_2(x - x_0, y - y_0) \gamma_2 e^{-\gamma_2(t-t_0)}, \quad (1)$$

в котором $G_1(x - x_0, y - y_0)$ и $G_2(x - x_0, y - y_0)$ — пространственные весовые характеристики инерционных возбуждающих и тормозящих связей каждого элемента среды, обладающих постоянными затухания инерции $\frac{1}{\gamma_1}$ и $\frac{1}{\gamma_2}$ соответственно.

Как и для любых непрерывных сред, реакция линейной части инерционной нейронной среды может быть найдена в виде интеграла свертки функции влияния и входного возмущения $I(x_0, y_0, t_0)$

$$P(x, y, t) = \int_{-\infty}^t \iint_{R^2} G(x - x_0, y - y_0, t - t_0) \times \\ \times I(x_0, y_0, t_0) dx_0 dy_0 dt_0. \quad (2)$$

Влияние порога срабатывания с элементов среды на реакцию системы $Q(x, y, t)$ учитывается с помощью выражения

$$Q(x, y, t) = P(x, y, t) \mid [P(x, y, t) - c]. \quad (3)$$

Опираясь на исследования статических (квазистатических) свойств рецептивных полей [7, 8], покажем, что нейронные среды с функцией

влияния вида (1) описывают многие свойства рецептивных полей сетчатки глаза лягушки, детектирующих параметры движения раздражителей.

Анализ свойств детекторов на математических моделях

Из детекторов сетчатки лягушки особо выделяются своими специфическими реакциями на движение стимулов детекторы движущихся краев. В [4] дается описание функции этих детекторов: «Они являются теми самыми элементами, которые названы Гартлайном и Барлоу «включено — выключено»... Детекторы реагируют на край объекта только при условии, что он движется... Реакция на движущиеся предметы значительно сильнее, чем на изменение общей освещенности, и лишь незначительно варьирует при изменении общей освещенности в отношении 1:300. Частота импульсации нарастает с увеличением скорости движения предмета в определенных пределах».

Эффект «включено — выключено» в модели можно учесть введением нелинейных зависимостей постоянных затухания инерции от скорости изменения входного воздействия $\frac{dI}{dt}$. Исследование таких зависимостей является темой отдельной работы, поэтому эффект «включено — выключено» здесь не рассматривается.

Свойство детекторов движущихся краев не реагировать на неподвижные раздражители можно объяснить лишь тем, что во всех точках рецептивных полей этих детекторов в статических условиях торможение либо уравнивает возбуждение, либо преобладает над ним, т. е. выполняется соотношение

$$G_1(x - x_0, y - y_0) \leq G_2(x - x_0, y - y_0). \quad (4)$$

Рассмотрим подробнее простейший частный случай, когда пространственные весовые характеристики возбуждающих и тормозящих связей рецептивного поля одинаковы, а форма рецептивного поля имеет вид квадрата со стороной $2a$:

$$G_1(x - x_0, y - y_0) = G_2(x - x_0, y - y_0) = 1(a - |x - x_0|) \times \\ \times 1(a - |y - y_0|). \quad (5)$$

Реакцию линейной части модели на движущийся вдоль оси x с постоянной скоростью v перепад амплитуды возмущения

$$I(x_0, y_0, t_0) = m 1(vt_0 - x_0) \quad (6)$$

можно найти из выражения

$$P(x, y, t) = m \int_{-\infty}^t \int_{y-a}^{y+a} \int_{x-a}^{x+a} 1(vt_0 - x_0) [\gamma_1 e^{-\gamma_1(t-t_0)} - \gamma_2 e^{-\gamma_2(t-t_0)}] dx_0 dy_0 dt_0. \quad (7)$$

Принтегрировав, окончательно получим

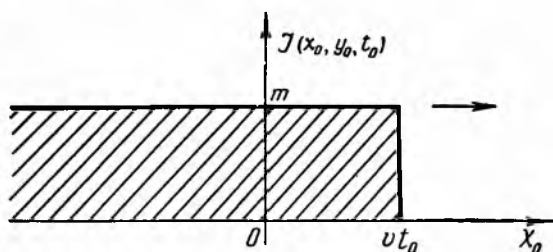
$$P(x, y, t) = \begin{cases} 0, & x > vt + a; \\ 2avm \left\{ \frac{1 - \exp\left[-\frac{\gamma_2}{v}(vt - x + a)\right]}{\gamma_2} - \frac{1 - \exp\left[-\frac{\gamma_1}{v}(vt - x + a)\right]}{\gamma_1} \right\}, & vt - a < x < vt + a; \\ 4avm \left\{ \frac{\text{sh } \frac{\gamma_2 a}{v}}{\gamma_2} \exp\left[-\frac{\gamma_2}{v}(vt - x)\right] - \frac{\text{sh } \frac{\gamma_1 a}{v}}{\gamma_1} \exp\left[-\frac{\gamma_1}{v}(vt - x)\right] \right\}, & x < vt - a. \end{cases} \quad (8)$$

График (8) изображен на рис. 1. Анализ этой функции показывает, что реакция сосредоточена вблизи границы возмущения, т. е. выделяется край движущегося стимула. При условии

$$x = vt - \frac{v}{\gamma_1 - \gamma_2} \ln \frac{\operatorname{sh} \frac{\gamma_2 a}{v}}{\operatorname{sh} \frac{\gamma_1 a}{v}} \quad (9)$$

функция (8) имеет максимум

$$P_{\max} = \frac{4 mav (\gamma_1 - \gamma_2)}{\gamma_1 \gamma_2} \times \frac{\left(\operatorname{sh} \frac{\gamma_2 a}{v} \right)^{\frac{\gamma_1}{\gamma_1 - \gamma_2}}}{\left(\operatorname{sh} \frac{\gamma_1 a}{v} \right)^{\frac{\gamma_2}{\gamma_1 - \gamma_2}}} \quad (10)$$



Зависимость величины $P_{\max}$ от скорости движения возмущения (рис. 2, а) для малых значений v имеет линейный характер. При увеличении скорости реакция растягивается вдоль направления движения, а значение максимума реакции стремится к постоянной величине. Аналогичное поведение детектора движущегося края при возрастании скорости движения раздражителя было обнаружено в сетчатке глаза лягушки [2, 4].

Как известно, движение характеризуется не только скоростью, но и ускорением. Для изучения особенностей реакций модели на ускоренное движение можно рассмотреть случай, когда перепад амплитуды раздражителя входит в рецептивное поле со скоростью v_0 и движется с ускорением g . В результате вычислений был получен график зависимости максимума реакции линейной части модели от ускорения при постоянных начальных скоростях (рис. 2, б). При условии $v_0 = 0$ максимум пропорционален $\sqrt{g}$ для малых значений ускорения. В общем же случае величина $P_{\max}$ зависит от ускорения и начальной скорости. Когда выполняется условие $g > \frac{v_0^2}{4a}$, преобладает зависимость величины

$P_{\max}$ от ускорения, а когда $g < \frac{v_0^2}{4a}$, реакция сильнее зависит от начальной скорости.

Характерное свойство детекторов движущихся краев — их слабая реакция на изменение общей освещенности. Изменение общей освещенности на величину $\Delta J = m$, в свою очередь, соответствует предъявлению детектору перепада амплитуды возмущения (6), движущегося со скоростью $v = \infty$ (в обоих случаях происходит одновременное включение всех элементов среды). Поэтому зависимость величины $P_{\max}$ от скорости движения возмущения должна иметь спад при условии $v \rightarrow \infty$ (спад показан пунктиром на рис. 2, а). Такой спад реакции ранее был описан,

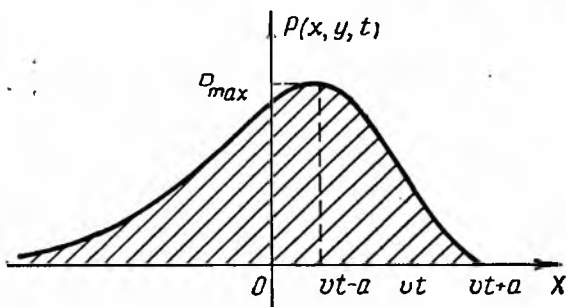


Рис. 1.

но не объяснен [2]. Появление рассматриваемого эффекта может быть связано с наличием периферического торможения у элементов «включено — выключено» [4, 5]. Если инерционность этого торможения меньше инерционности процессов возбуждения и торможения в центре рецептивного поля [9], то при увеличении скорости движения скачкообразного возмущения влияние периферического торможения на ответ детектора усиливается. Следствием этого является спад величины $P_{\max}$ при больших скоростях движения стимула.

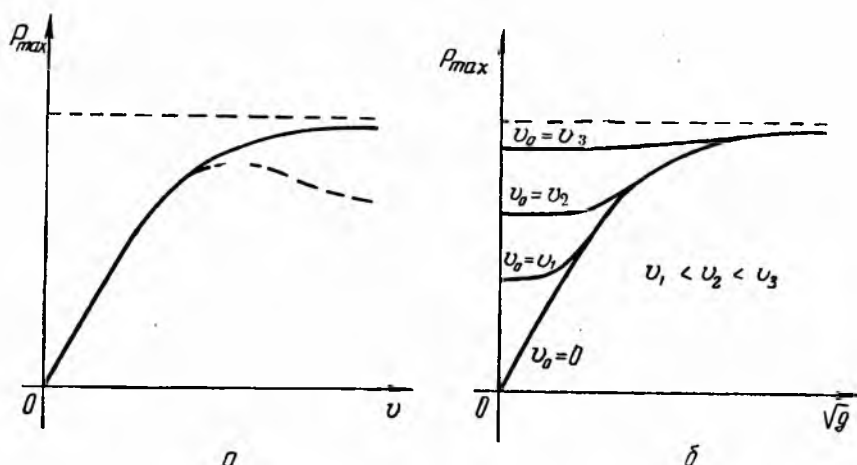


Рис. 2.

Влияние размеров областей возбуждения и торможения рецептивного поля на реакцию детектора можно исследовать на модели с функцией влияния

$$G(x - x_0, y - y_0, t - t_0) = 1 \left[a - \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \right] \gamma_1 e^{-\gamma_1(t-t_0)} - \\ - 1 \left[b - \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \right] \gamma_2 e^{-\gamma_2(t-t_0)} \quad (11)$$

(рис. 3). Если такой модели предъявить движущееся вдоль оси x с постоянной скоростью δ -видное «микропятно», которое можно представить в виде соотношения

$$I(x_0, y_0, t_0) = \delta(vt_0 - x_0) \delta(y_0), \quad (12)$$

то реакция элементов модели, расположенных на оси x , может быть найдена с помощью выражения

$$P(x, 0, t) = \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} 1 \left[a - \sqrt{(x - x_0)^2 + y_0^2} \right] \gamma_1 e^{-\gamma_1(t-t_0)} \delta(vt_0 - x_0) \times \\ \times \delta(y_0) dx_0 dy_0 dt_0 - \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} 1 \left[b - \sqrt{(x - x_0)^2 + y_0^2} \right] \gamma_2 e^{-\gamma_2(t-t_0)} \delta(vt_0 - \\ - x_0) \delta(y_0) dx_0 dy_0 dt_0 = P_1(x, t) - P_2(x, t), \quad (13)$$

в котором

$$P_1(x, t) = \begin{cases} 0, & x > vt + a, \\ 1 - \exp \left[-\frac{\gamma_1}{v} (vt - x + a) \right], & vt - a < x < vt + a, \\ 2 \operatorname{sh} \frac{\gamma_1 a}{v} \exp \left[-\frac{\gamma_1}{v} (vt - x) \right], & x < vt - a; \end{cases} \quad (14)$$

$$P_2(x, t) = \begin{cases} 0, & x > vt + b, \\ 1 - \exp\left[\frac{\gamma_2}{v}(vt - x + b)\right], & vt - b < x < vt + b, \\ 2 \operatorname{sh} \frac{\gamma_2 b}{v} \exp\left[-\frac{\gamma_2}{v}(vt - x)\right], & x < vt - b; \end{cases} \quad (15)$$

а постоянные a и b определяют соответственно протяженность областей возбуждения и торможения. Графики функций $P(x, 0, t)$; $P_1(x, t)$; $P_2(x, t)$ представлены на рис. 4. Анализ уравнения (13) показывает, что с увеличением размеров области торможения ответная реакция модели уменьшается и даже может стать отрицательной. Условие существования реакции модели на движущееся «микропятно» при нулевом пороге срабатывания элементов среды ($c = 0$) сводится к неравенству

$$P(x, 0, t)_{\max} > 0. \quad (16)$$

В результате решения этого неравенства может быть получено соотношение между допустимыми размерами области возбуждения и области торможения

$$\frac{b}{a} < 2 \frac{\gamma_1}{\gamma_2} - 1. \quad (17)$$

Как видно из неравенства (17), пропорции между размерами областей определяются отношением постоянных затухания инерции

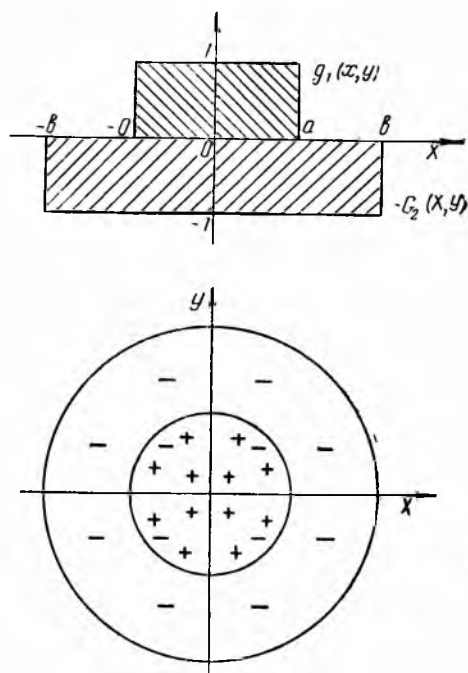


Рис. 3.

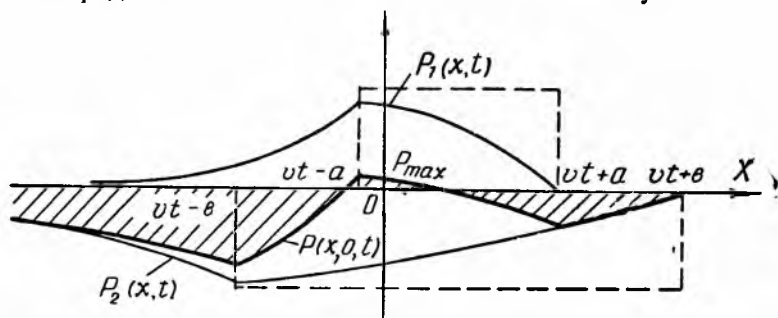


Рис. 4.

этих процессов ($\frac{1}{\gamma_1}$ и $\frac{1}{\gamma_2}$) и не зависят от скорости движения возмущения. Условие (17) справедливо также для локальных радиусов областей возбуждения и торможения рецептивных полей сложной конфигурации. В таких полях неравенство (17) может выполняться только для отдельных направлений движения стимула, что эквивалентно детектированию

движения исключительно в этих направлениях. Элементы сетчатки глаза лягушки, выделяющие одно предпочтительное направление движения раздражителя, были названы в физиологии детекторами направления движения [5]. В направлениях, отличных от предпочтительного, реакция таких детекторов либо совсем отсутствует, либо незначительна. На рис. 5, а показаны конфигурации рецептивных полей, позволяющих выделять движения пятен, на рис. 5, б — полосок и перепадов яркости только в одном направлении, отмеченном стрелкой. Такие поля

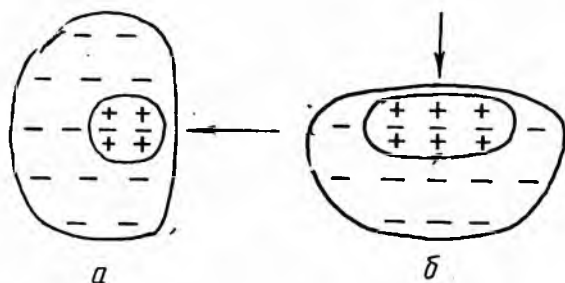


Рис. 5.

можно исследовать на модели, используя выражения (13), (17) при условии, что $\frac{T_1}{T_2} = \text{const}$. В общем же случае чувствительность рецептивных полей зрительного анализатора к определенному направлению движения стимула может возникать не только за счет асимметрии форм рецептивных полей. Анализируя соотношение (17), нетрудно заметить, что неоднородность временных характеристик полей в отдельных направлениях может играть такую же роль, как и асимметрия во взаимном расположении возбуждающей и тормозящей областей рецептивного поля. В каждом конкретном случае доминирует один из этих факторов, поэтому детекторы направления движения отличаются различными пространственными и временными характеристиками и часто не похожи друг на друга.

Следует отметить, что сочетание различных пространственных особенностей рецептивных полей (размеры, форма и асимметрия в расположении возбуждающей и тормозящей областей) с разной инерционностью возбуждения и торможения позволяет выделять движущиеся стимулы на фоне неподвижных и определять скорость, ускорение и направление их движения. Этот вывод относится не только к детекторам движущихся краев, но и распространяется на детекторы контраста, кривизны, яркости, найденные в сетчатке глаза лягушки. Различная инерционность возбуждения и торможения в этих рецептивных полях вызывает обострение их реакции на движущиеся раздражители, сохраняя неизменными статические свойства полей [4]. Усиление ответа при увеличении скорости движения стимула обнаружено во всех детекторах сетчатки глаза лягушки [2], а некоторые из них имеют предпочтительные направления движения раздражителей [4].

Изложенные выше модели могут быть использованы для дальнейших более детальных исследований функциональных и структурных особенностей рецептивных полей, детектирующих движение в зрительных анализаторах различных животных. Результаты, описанные в данной работе, могут найти применение и для построения нейроподобных технических систем, выделяющих движущиеся объекты на фоне непо-

движных и измеряющих параметры их движения — скорость, ускорение и направление. Некоторые из рассмотренных моделей уже реализованы нами на телевизионных системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Розенблатт. Принципы нейродинамики. Изд-во «Мир», 1965.
2. O. J. Grüsser, D. Finkelstein, U. Grüsser-Görner. The Effect of Stimulus Velocity on the Response of Movement Sensitive Neurons of the Frog's Retina. «Pflügers Arch. ges. Physiol», 1968, № 300.
3. А. Коут. Машинная интерпретация изображений на экране радиолокатора. Сб. «Проблемы бионики». Изд-во «Мир», 1965.
4. Д. Ж. Леттвин, Г. Матурана, У. Мак-Каллок, У. Питтс. Что сообщает глаз лягушки мозгу лягушки. Сб. «Электроника и кибернетика в биологии и медицине» Изд-во иностр. лит., 1963.
5. А. Л. Бызов. Электрофизиологические исследования сетчатки. Изд-во «Наука», 1966.
6. Г. М. Зенкин, В. В. Максимов. Исследование горизонтального взаимодействия на уровне медленных биполяров сетчатки лягушки, II. Количественные характеристики взаимодействия. «Биофизика», 1964, № 9.
7. Ю. П. Бугай. Исследование нейроподобных элементов и систем как устройств первичной переработки информации. Автореф. канд. дисс., Харьков, 1968.
8. Ю. И. Зозуля, В. Г. Червов, Ю. П. Бугай. Математические модели детекторов сетчатки глаза лягушки. Сб. «Проблемы бионики», вып. 4. Изд-во ХГУ, Харьков, 1970.
9. А. Бертудис, В. Д. Глезер, Н. Б. Костелянец, Н. Ф. Подвигин, И. Н. Шеталов. Новые данные о функциональной организации рецептивного оп-поля сетчатки и его модели. Сб. «Вопросы бионики». Изд-во «Наука», 1967.

ОБ ОДНОМ ПРИМЕНЕНИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

С. Ф. Марченко, В. Г. Червов

При анализе изображений геометрических фигур и, в частности, письменных знаков в задачах автоматического распознавания возникает необходимость выделения признаков, накладывающих незначительные ограничения на инвариантность их описаний к переносам, поворотам и другим изменениям в реальных шрифтах и рукописных знаках. В [2] рассматриваются биологические принципы выделения информативных признаков изображений геометрических фигур и составляются описания по характеристикам изломов внешней контурной линии машинописных знаков. Эти характеристики — количество линий, принадлежащих точке излома, — при описании соотносятся с начальной точкой отсчета, что позволяет получить однозначные описания анализируемых знаков. Начальная точка отсчета (НТО) определяется здесь, согласно психофизическим данным восприятия зрительной информации, как верхняя крайняя точка изображения.

В настоящей работе описывается способ определения НТО, позволяющий путем соотнесения с ней структурных признаков получать описания изображений письменных знаков, инвариантные масштабным преобразованиям, анизотропным, непропорциональным изменениям, переносу в поле зрения и поворотам в таких пределах, которые допускаются при узнавании человеком этих знаков без привлечения содержания читаемого текста. Этот способ позволяет автоматизировать операции определения НТО и составления описаний изображений письменных знаков средствами электроники и автоматики. Приведем

развернутую функциональную схему устройства, работающего по описанному алгоритму.

Для пояснения сути этого способа рассмотрим рис. 1 и определим некоторые понятия, которыми будем пользоваться в дальнейшем. Необходимую информацию о знаке будем получать из развертки его внешней контурной линии с помощью прослеживающих движений [3].

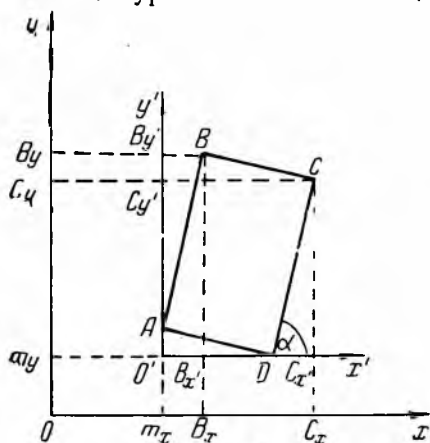


Рис. 1.

Определим собственную систему координат исследуемой фигуры, для чего найдем точки ее контурной линии с минимальными расстояниями m_x и m_y до соответствующих осей декартовой системы координат, в которой фигура может иметь произвольное положение

$$0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ. \quad (1)$$

Очевидно, что для данного положения фигуры ABCD (рис. 1), такими точками будут D и A, имеющие минимальные расстояния до осей x и y соответственно. Линии, проведенные параллельно соответствующим осям через эти точки, образуют собственную систему координат с центром в

точке $O' (m_x, m_y)$. В дальнейшем все вычисления, кроме оговоренных случаев, будем производить в этой системе координат. При этом координаты точек контурной линии исследуемой фигуры станем называть для краткости собственными координатами.

Используя эти определения, будем находить начальную точку отсчета как точку излома с максимальным произведением ее собственных координат (НТО₁), если хотя бы в одной точке излома обе эти координаты не равняются нулю, или как точку контурной линии с максимальным произведением ее собственных координат (НТО₂), если в каждой точке излома хотя бы одна из собственных координат равняется нулю.

Так как контурная линия рассматриваемой фигуры имеет изломы и среди них есть точки без нулевых собственных координат (B и C), то НТО будем искать в точке излома (НТО₁). Для данного положения фигуры (рис. 1) такой точкой, очевидно, будет C, так как из построения видно, что произведение ее собственных координат (площадь прямоугольника $O'C_y'CC_x'$)

$$N_c = (C_x - m_x)(C_y - m_y) = C_x \cdot C_y' \quad (2)$$

больше произведения собственных координат точки B (площадь прямоугольника $O'B_y'BB_x'$)

$$N_b = (B_x - m_x)(B_y - m_y) = B_x \cdot B_y', \quad (3)$$

а произведения собственных координат в точках A и D равны нулю. Таким образом, для данного положения фигуры имеет место неравенство

$$\frac{N_c}{N_b} > 1. \quad (4)$$

Очевидно, что НТО будет находиться в точке C при различных преобразованиях фигуры, ее переносах и вращениях до тех пор, пока сохраняется соотношение (4). Найдем эти условия путем решения не

равенства (4) и раскрытия содержания входящих в него величин. Запишем значения величин, входящих в соотношения (2) и (3):

$$C_{x'} = CD \cos \alpha + AD \sin \alpha; \quad C_{y'} = CD \sin \alpha; \quad (5)$$

$$B_{x'} = AB \cos \alpha; \quad B_{y'} = AB \sin \alpha + AD \cos \alpha.$$

Обозначим для краткости записей $AB = CD = b$, $AD = BC = a$ и, подставляя соотношения (5) в выражения (2)–(4), найдем условия существования неравенства (4)

$$\frac{N_c}{N_b} = \frac{(b \cos \alpha + a \sin \alpha) b \sin \alpha}{(b \sin \alpha + a \cos \alpha) b \cos \alpha} > 1,$$

откуда получим неравенство

$$\sin \alpha \cos \alpha + a \sin^2 \alpha > \sin \alpha \cos \alpha +$$

$$+ a \cos^2 \alpha,$$

преобразуя которое, получим

$$a(\sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha) > 0 \quad \text{или}$$

$$a \cos 2\alpha < 0. \quad (6)$$

Величина a , входящая в выражение (6), всегда положительна и на характер этого соотношения не влияет. Тогда это неравенство имеет место при условии

$$90^\circ < 2\alpha < 270^\circ \quad \text{или} \quad 45^\circ < \alpha < 135^\circ. \quad (7)$$

Из соотношений (1) и (7) вытекает неравенство

$$45^\circ < \alpha < 90^\circ. \quad (8)$$

Таким образом, положение НТО₁ не изменится при наклонах исследуемой фигуры от 45 до 90° к осям координат.

Рассмотрим изменение положения НТО₁, если угол $\alpha > 90^\circ$ (рис. 2):

$$90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ. \quad (9)$$

В этом случае оси собственной системы координат будут привязаны к точкам A и B фигуры. Для данного положения фигуры целесообразно исследовать неравенство

$$\frac{N_c}{N_d} > 1, \quad (10)$$

где

$$N_d = (D_x - m_x)(D_y - m_y) = D_x D_y.$$

При таком положении фигуры $N_b = 0$ и неравенство (4) выполнимо до тех пор, пока ось y' привязана к точке B.

Запишем соотношения для величин N_c и N_d , вытекающие из построений на рис. 2,

$$N_c = C_{x'} C_{y'} = a \sin \alpha (b \sin \alpha - a \cos \alpha), \quad (11)$$

$$N_d = D_x D_y = (b \cos \alpha - a \sin \alpha) a \cos \alpha.$$

Подставляя соотношения (11) в неравенство (10), найдем условия, при которых сохраняется последнее:

$$\frac{N_c}{N_d} = \frac{a \sin \alpha (b \sin \alpha - a \cos \alpha)}{(b \cos \alpha - a \sin \alpha) a \cos \alpha} > 1.$$

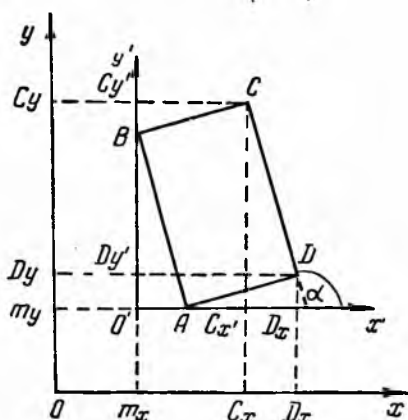


Рис. 2.

Раскрывая это выражение и решая неравенства, получим

$$b \cos 2\alpha < 0. \quad (12)$$

Величина b всегда положительна и не влияет на характер неравенства (12). В этом случае данное неравенство выполняется при условии (7). Из соотношений (7) и (9) следует

$$90^\circ \leq \alpha < 135^\circ. \quad (13)$$

Тогда из неравенств (8) и (13) вытекает соотношение

$$45^\circ < \alpha < 135^\circ. \quad (14)$$

Таким образом, НТО₁ будет сохранять свое положение в точке C при поворотах фигуры на угол, определяемый соотношением (14). Из неравенств (6), (12) и (14) следует также, что положение НТО при данном выше определении не зависит от величин a и b , т. е. от масштабных изменений фигуры, а также от соотношения этих величин между собой, т. е. от непропорционального изменения ее сторон. В условие (14), при котором сохраняются соотношения (4) и (10), не входят также величины, определяющие положение фигуры на плоскости, образованной осями координат x и y (рис. 1—2).

1112233444566778889900

Рис. 3.

Проведенный анализ показывает, что признак начальной точки отсчета, определяемый по максимальному произведению собственных координат точек излома контурной линии фигуры (НТО₁), инвариантен положению в декартовых координатах, масштабным преобразованиям фигуры, непропорциональному изменению ее сторон и поворотам на угол $\pm 45^\circ$ относительно первоначально выбранного вертикального положения.

Способ нахождения начальной точки отсчета для случая, когда все изломы лежат на осях собственной системы координат (НТО₂), отличается от предыдущего только тем, что точка с максимальным произведением собственных координат определяется независимо от других признаков контурной линии изображения (специальные расчеты для этого случая здесь не приводятся).

Покажем, как можно использовать признак начальной точки отсчета для анализа машинописных или написанных от руки письменных знаков, которым предъявляются незначительные требования к стилизации: отсутствие разрывов линии знака, нормализация толщины этой линии и сохранение тех изломов, по которым было составлено эталонное описание. Запишем коротко последовательность операций, позволяющих выделять признаки и составлять описания, адекватные задаче распознавания, для изображений цифровых знаков различного типа написания (рис. 3).

1. Определяется собственная система координат исследуемой фигуры.

2. Определяется наличие изломов. Если изломы отсутствуют, то анализ прекращается при возвращении в одну из точек с минимальным значением собственных координат.

3. Если изломы существуют и хотя бы один из них лежит на одной из осей собственной системы координат, определяется НТО₁.

4. Если изломы существуют и все они лежат на осях собственной системы координат, то определяется НТО₂.

5. Осуществляется анализ признаков и составляется описание изображения, началом которого служит признак НТО.

6. Заканчивается описание при получении необходимой информации об изображении или при возвращении в НТО.

Кроме признака НТО; для описания изображений, как в [2], будут использоваться характеристики изломов — количество линий, пересекающихся в этой точке. Если эти характеристики фиксировать в той последовательности, в какой они встречаются при обходе против часовой стрелки, начиная с НТО, то получим следующие описания:

$$\begin{array}{ll} A_1 = (113; 113, 133; 113, 133) & A_6 = (13; 14, 41) \\ A_2 = (121; 441, 144) & A_7 = (221; 2124) \\ A_3 = (311, 111; 2122) & A_8 = (33; 4; 241) \\ A_4 = (124, 141, 142; 224; 131) & A_9 = (31; 31) \\ A_5 = (122) & A_{10} = (222; 0). \end{array}$$

Эти описания — неполные и составлялись по группам: для единиц, двоек, троек и т. д. Последовательность описаний в группе соответствует расположению вариантов написания знака на рис. 3. Если один знак в группе имеет несколько описаний, то они отделяются друг от друга запятой, остальные — точкой с запятой.

На рис. 3 представлены только характерные варианты написаний знаков. Так как для их описаний использовались топологические признаки, то инвариантность этих описаний геометрическим преобразованиям изображений знаков ограничивается только признаком НТО. Из приведенных выше расчетов определения НТО следует, что этот признак накладывает ограничения только на повороты изображений. Для знаков, имеющих в верхней части прямые горизонтальные участки контурной линии, инвариантность описаний не нарушится при поворотах знаков на $\pm 45^\circ$ относительно их нормального вертикального положения. Для знаков с другими характеристиками элементов контурных линий соответствующие расчеты в данной статье не приводятся. Однако можно сказать, что для этих знаков допустимы повороты на углы больше $\pm 45^\circ$, а примерно для половины из них — на 360° .

Автоматический анализ изображений знаков по описанному выше алгоритму осуществляется на модели пространственного анализатора [3]. Развернутая функциональная схема используемых для этого узлов приведена на рис. 4.

Анализируемое изображение преобразуется блоком 1 в электрический сигнал. С выхода *a* этого блока снимается сигнал, характеризующий функциональную зависимость между координатами точек контурной линии $y = f(x)$. С выходов *b* и *c* снимаются сигналы $x = x(t)$ и $y = y(t)$, характеризующие изменения координат точек контурной линии во времени. Блоки 3 и 5 определяют минимальные значения этих координат m_x и m_y . Блоки 6 и 7 определяют значения собственных координат $x' = x - m_x$ и $y' = y - m_y$ анализируемой фигуры. Блок 8 выявляет наличие изломов контурной линии. Блок 2 вырабатывает сигналы о числе прохождений точек с минимальными координатами. Если на его выходе появляется сигнал и блок 8 не выявляет изломов, то блок 12 пропускает сигнал с выхода *a* на вход блока 16, осуществляющего анализ и измерение данных. В результате анализа в этом блоке происходит выделение признаков, характеризующих изображение.

Если контурная линия анализируемого изображения имеет изломы, то сигнал об этом из блока 8 поступает в блок 9, выявляющий нулевые

координаты в точках изломов. Этот блок начинает работать только тогда, когда определена собственная система координат анализируемой фигуры. Сигнал об этом вырабатывается в блоке 4. Если есть изломы и в каждой такой точке ее собственные координаты равны нулю, то сигнал с выхода блока 9 обеспечивает открывание ключей 10 и 11 на все время анализа. Это делает возможным поступление сигналов с блоков 6 и 7 на множительное устройство 13, вырабатывающее сигналы, пропорциональные произведению текущих координат точек контурной линии изображения. Множительное устройство может работать по одному из принципов, описанных в [1]. Сигнал с выхода множительного устройства поступает на устройство 14, определяющее его максимальную величину, по которой находится положение НТО₂.

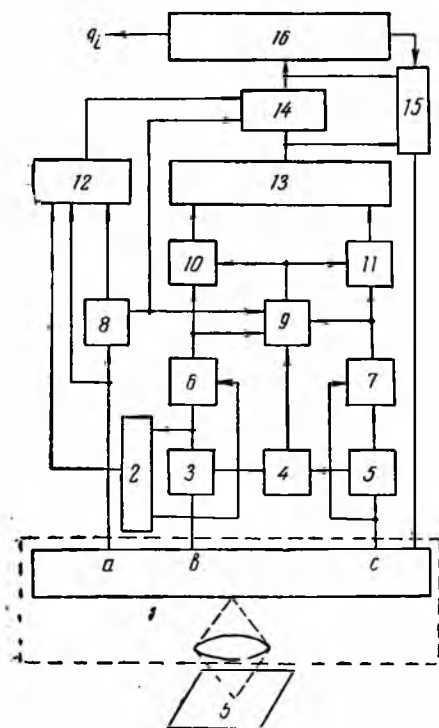


Рис. 4.

При наличии такого сигнала на входе блока 16 анализ контурной линии осуществляется только в точках излома, так как соответствующий выход блока 8 связан также с одним из входов блока 16.

Если хотя бы один излом контурной линии не имеет нулевых координат, то блок 9 открывает ключи 10 и 11 только в моменты поступления сигнала о наличии излома из блока 8. В этом случае множительное устройство 13 вырабатывает сигналы, пропорциональные произведению координат точек изломов, а блок 14 выделяет теперь максимальный сигнал только из этой со-

вокупности. При прохождении точки излома с максимальным произведением собственных координат на другой вход блока 16 поступает сигнал из блока 8, и начинается анализ характеристик изломов.

Для всех трех случаев анализ изображения прекращается при получении необходимой информации или при возвращении воспринимающего элемента блока 1 в начальную точку отсчета. Сигнал об этом вырабатывается в блоке конца анализа 15, поступает в блок 1, и дальнейшее преобразование данного изображения прекращается. Признаки, выделяемые блоком 16, можно использовать для сравнения с эталонными описаниями изображений геометрических фигур. Идентификация описания предъявленного изображения с одним из эталонных будет отвечать задаче его распознавания.

Таким образом, показана принципиальная возможность применения биологических принципов обработки информации, изложенных в [2, 4], для решения задачи автоматического анализа письменных знаков и получения описаний, адекватных задаче распознавания.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Латенко. Аналоговые множительные устройства. Гостехиздат УССР, Киев, 1963.

2. С. Ф. Марченко, В. Г. Червов. Выделение пространственных признаков изображений и кодирование знаковой информации. Сб. «Проблемы бионики», вып. 4. Изд-во ХГУ, Харьков, 1970.

3. С. Ф. Марченко. О структуре и функции пространственного анализатора. Сб. «Проблемы бионики», вып. 4. Изд-во ХГУ, Харьков, 1970.

4. В. Г. Червов, Ю. П. Бугай, С. Ф. Марченко. Некоторые способы преобразования информации в нервных клетках, исследованные на аналоговой модели нейрона. Тезисы докл. научно-техн. конференции, посв. Дню радио, Харьков, 1966.

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ РЕОГРАММ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИХ НА ЦИФРОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАШИНЕ

С. А. Пинчук, П. В. Волошин, Г. И. Белик

Среди современных методов исследования сердечно-сосудистой системы важное место занимает реография, которая позволяет исследовать состояние гемодинамики в различных, даже труднодоступных областях. Широкое распространение получили реоэнцефалография, реокардиография, реовазография, реография печени и легких. В эксперименте практически возможна реография любого органа или его части.

К настоящему времени предложено свыше десяти информативных параметров реографической волны, отражающих различные стороны гемодинамики. Для получения усредненных значений информативных параметров рекомендуется обрабатывать 3—5 находящихся рядом пульсовых кривых. Количество комплексов реограмм, подлежащих обработке, резко возрастает при учете не только фоновых кривых, но и кривых, полученных при различных функциональных пробах [1, 2].

Для решения топики сосудистых поражений головного мозга и раскрытия патофизиологических механизмов нарушения регионарной церебральной гемодинамики предложено около десяти отведений [3].

Следовательно, для углубленного реоэнцефалографического изучения состояния регионарной церебральной гемодинамики у одного больного необходимо обработать 50—80 реографических комплексов и оценить 5—10 информативных параметров для каждого комплекса, что требует не менее пяти часов ручной математической обработки. Естественно, что оперативно, наиболее точно и полно обработка и анализ реографических кривых могут быть выполнены на цифровых вычислительных машинах (ЦВМ).

Для эффективной обработки графической информации на ЦВМ важное значение имеет вопрос о представлении (аналитическом описании) реограмм. Классические методы аппроксимации графически заданных функций (Лагранжа, Ньютона, Гаусса, Фурье и др.) не удобны с точки зрения обработки и анализа реограмм на ЦВМ.

Так, методы Лагранжа и Ньютона, с одной стороны, не удобны из-за необходимости заранее задавать порядок интерполяционного многочлена, который в данном случае оказывается весьма большим, и, с другой стороны, наличие на реограммах участков плато и зубцов (негладкая кривая) исключает возможность использования этих методов для аппроксимации с необходимой точностью.

По той же причине не удобен и метод Гаусса (аппроксимация кривой многочленом с использованием метода наименьших квадратов): весьма затруднительно заранее задавать порядок аппроксимирующего многочлена, а точность аппроксимации при этом может оказаться не удовлетворительной.

Что касается метода Фурье (аппроксимация кривой тригонометрическим многочленом), то он в данном случае нецелесообразен.

В настоящей работе для аналитического описания реограмм предлагается использовать R -функции, введенные В. Л. Рвачевым, которые позволяют строить уравнения графиков и чертежей сложной структуры [4, 5].

Совокупность анализируемых реограмм (РГ) с точки зрения их аналитического описания можно разбить на два класса:

а) нормальные реограммы (рис. 1, а);

б) измененные реограммы (рис. 1, б, на котором представлена реограмма с наличием плато и дополнительных зубцов).

При автоматической обработке и анализе реограмм оцениваются информативные параметры, существенные с точки зрения анализа различных сторон гемодинамики [1]. Информативными параметрами

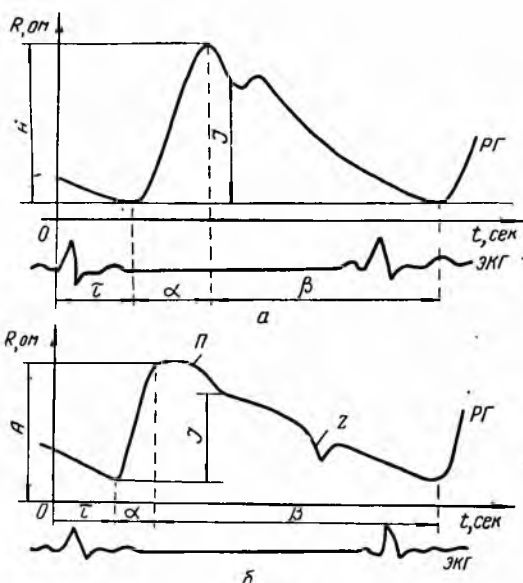


Рис. 1.

реограммы являются (рис. 1, а и б):

1) амплитуда волны реограммы A ;

2) время восходящей части волны реограммы α ;

3) время нисходящей части волны реограммы β ;

4) отношение восходящей части к полному времени волны реограммы $\gamma = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} 100\%$;

5) время распространения РЭГ — волны τ ;

6) показатель тонического напряжения $T = \frac{I}{A} 100\%$;

7) дополнительные зубцы волны реограммы Z ;

8) плато волны реограммы Π и др.

Волну нормальной реограммы представляется возможным разбить на четыре характерных участка (рис. 2), каждый из которых можно аппроксимировать параболой второго порядка (рис. 3, а, б, в, г). При этом граничные точки A, C, E, G, I участков определяются как точки A, I экстремумов или как точки C, E, G перегибов кривой. Промежуточные точки первых трех участков являются точками B, D, F экстремумов, а промежуточная точка H четвертого участка — средней точкой.

Задача состоит в построении функции — такой, чтобы она с определенной степенью точности аппроксимировала данную кривую (рео-

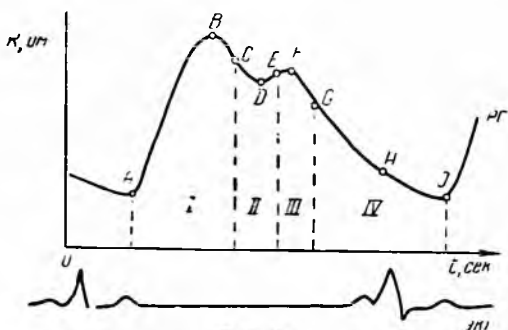


Рис. 2.

грамму). Для этого необходимо подготовить набор аналитических кривых («шаблонов»), с помощью которых можно «склеивать» (синтезировать) аналитические выражения реограмм. Таким материалом для конструирования упомянутых «шаблонов» в данном случае могут быть основные функции (параболы, прямые, функции-сигнатуры).

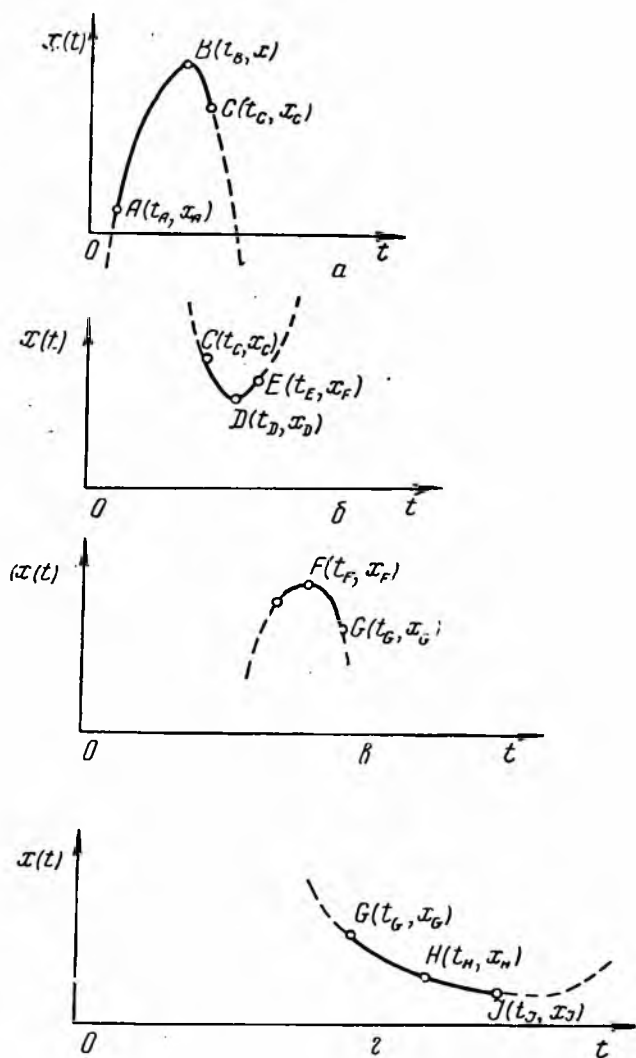


Рис. 3.

Рассмотрим задачу аналитического описания «шаблона» для первого участка (рис. 3, а). Пусть функции

$$\varphi_1(t) = a_1 t^2 + b_1 t + c_1, \quad (1)$$

$$\chi_1(t) = a_1 t + e_1, \quad (2)$$

$$\psi_1(t) = \frac{x_A}{2} [1 - \text{sign}(t - t_A)], \quad (3)$$

$$\omega_1(t) = \frac{x_C}{2} [1 - \text{sign}(t - t_A)] \quad (4)$$

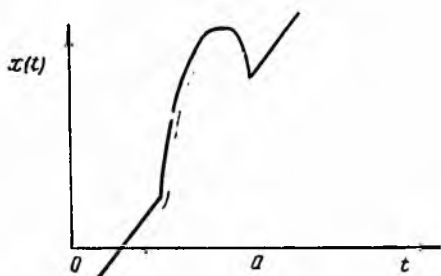
представляют соответственно

- а) параболу, проходящую через точки A, B, C ;
- б) прямую, проходящую через точки A и C ;
- в) функцию-сигнатуру, проходящую через точку A ,
- г) функцию-сигнатуру, проходящую через точку C .

Для аналитического описания «шаблона» используем R -операции (R -конъюнкцию и R -дизъюнкцию)

$$f_1(t) \wedge_1 f_2(t) = \frac{1}{2} [f_1(t) + f_2(t) - |f_1(t) - f_2(t)|]; \quad (5)$$

$$f_1(t) \vee_1 f_2(t) = \frac{1}{2} [f_1(t) + f_2(t) + |f_1(t) - f_2(t)|]. \quad (6)$$



Заметим, что (5) и (6) не являются в общем случае R -функциями (так как функции $f_1(t)$ и $f_2(t)$, вообще говоря, не являются таковыми).

Составим из (1) — (4) по правилам (5) и (6) следующие функции:

$$\varphi_1 \vee_1 \chi_1 = \frac{1}{2} (\varphi_1 + \chi_1 + |\varphi_1 - \chi_1|); \quad (7)$$

$$\chi_1 \wedge_1 \psi_1 = \frac{1}{2} (\chi_1 + \psi_1 - |\chi_1 - \psi_1|); \quad (8)$$

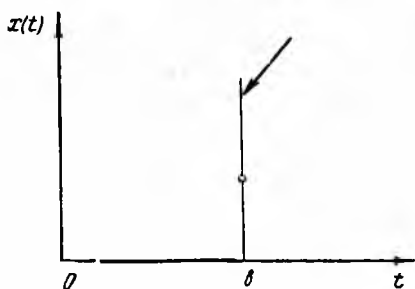
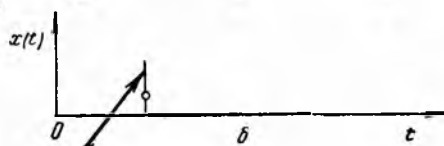


Рис. 4.

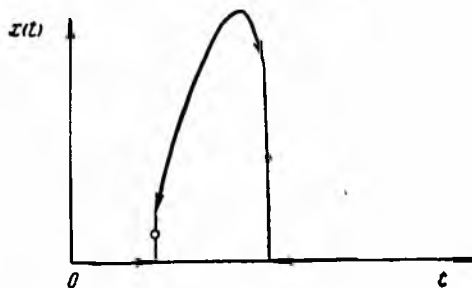


Рис. 5.

$$\chi_1 - \chi_1 \wedge_1 \omega_1 = -\frac{1}{2} (\chi_1 + \omega_1 - |\chi_1 - \omega_1|) + \chi_1. \quad (9)$$

Графики функций (7), (8) и (9) изображены соответственно на рис. 4, а, б и в. «Шаблон» для первого участка волны реограммы, используя (7)–(9), можно аналитически представить в виде

$$\pi_1 = \varphi_1 \vee_1 \chi_1 - \chi_1 \wedge_1 \psi_1 + \chi_1 \wedge_1 \omega_1 - \chi_1 = \frac{1}{2} (\varphi_1 - \chi_1 - \psi_1 + \omega_1 + |\varphi_1 - \chi_1| + |\chi_1 - \psi_1| - |\chi_1 - \omega_1|). \quad (10)$$

График функции (10) изображен на рис. 5.

Аналогично строим функции «шаблонов» для второго, третьего и четвертого участков. При этом функции, с помощью которых конструируются аналитические выражения «шаблонов», имеют вид:

для второго участка

$$\varphi_2(t) = a_2 t^2 + b_2 t + c_2; \quad (11)$$

$$\chi_2(t) = d_2 t + e_2; \quad (12)$$

$$\psi_2 = \frac{x_C}{2} [1 + \text{sign}(t - t_C)]; \quad (13)$$

$$\omega_2(t) = \frac{x_E}{2} [1 + \text{sign}(t - t_E)]; \quad (14)$$

для третьего участка

$$\varphi_3(t) = a_3 t^2 + b_3 t + c_3; \quad (15)$$

$$\chi_3(t) = d_3 t + e_3; \quad (16)$$

$$\psi_3(t) = \frac{x_E}{2} [1 - \text{sign}(t - t_E)]; \quad (17)$$

$$\omega_3(t) = \frac{x_G}{2} [1 - \text{sign}(t - t_G)]; \quad (18)$$

для четвертого участка

$$\varphi_4(t) = a_4 t^2 + b_4 t + c_4; \quad (19)$$

$$\chi_4(t) = d_4 t + e_4; \quad (20)$$

$$\psi_4(t) = \frac{x_G}{2} [1 + \text{sign}(t - t_G)]; \quad (21)$$

$$\omega_4(t) = \frac{x_I}{2} [1 + \text{sign}(t - t_I)]. \quad (22)$$

Аналитические выражения «шаблонов» для второго, третьего и четвертого участков с учетом (11)–(14), (15)–(18) и (19)–(22) имеет вид

$$\begin{aligned} \pi_2 &= \varphi_2 \wedge_1 \chi_2 + \chi_2 \vee_1 \psi_2 - \chi_2 \wedge_1 \omega_2 - \chi_2 = \\ &= \frac{1}{2} (\varphi_2 - \chi_2 + \psi_2 - \omega_2 - |\varphi_2 - \chi_2| - |\chi_2 - \psi_2| + |\chi_2 - \omega_2|); \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \pi_3 &= \varphi_3 \vee_1 \chi_3 + \chi_3 \wedge_1 \psi_3 - \chi_3 \wedge_1 \omega_3 - \chi_3 = \\ &= \frac{1}{2} (\varphi_3 - \chi_3 + \psi_3 - \omega_3 + |\varphi_3 - \chi_3| - |\chi_3 - \psi_3| + |\chi_3 - \omega_3|); \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \pi_4 &= \varphi_4 \wedge_1 \chi_4 + \chi_4 \vee_1 \psi_4 - \chi_4 \wedge_1 \omega_4 - \chi_4 = \\ &= \frac{1}{2} (\varphi_4 - \chi_4 + \psi_4 - \omega_4 + |\varphi_4 - \chi_4| - |\chi_4 - \psi_4| + |\chi_4 - \omega_4|). \end{aligned} \quad (25)$$

Осуществляя «склеивание» выражений (10), (23)–(25) для «шаблонов» на соответствующих участках, получим уравнение волны реограммы в виде

$$\Pi(t) = \sum_{i=1}^4 \pi_i(t; x_i, \dots, e_i x_A, \dots, x_I, t_A, \dots, t_I). \quad (26)$$

Аналогичным уравнением описывается любая волна нормальной реограммы; при этом для каждой волны будут свои параметры a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} , d_{ij} , e_{ij} ; x_{Aj} , x_{Bj} , x_{Cj} , x_{Dj} , x_{Ej} , x_{Fj} , x_{Gj} , x_{Hj} , x_{Ij} , t_{Aj} , t_{Bj} , t_{Cj} , t_{Dj} , t_{Ej} , t_{Fj} , t_{Gj} , t_{Hj} , t_{Ij} ($i = 1, 2, 3, 4$; $j = 1, 2, \dots, n$).

Таким образом, уравнение реограммы имеет вид

$$P(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^4 \pi_{ij}(t; a_{ij}, \dots, e_{ij}, x_{Aj}, \dots, x_{Ij}, t_{Aj}, \dots, t_{Ij}). \quad (27)$$

Отметим, что функция (27) является непрерывной и дифференцируемой всюду на рассматриваемом открытом интервале, однако в граничных точках ($A_j, C_j, E_j, G_j, I_j = A_j$) она может иметь, вообще говоря, различные двусторонние производные.

Значения параметров $a_{ij}, \dots, e_{ij}$ ($i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, n$), входящих в выражение (27), определяются по формулам

$$a_{ij} = \frac{\Delta_{a_{ij}}}{\Delta_{ij}}, \quad b_{ij} = \frac{\Delta_{b_{ij}}}{\Delta_{ij}}, \quad c_{ij} = \frac{\Delta_{c_{ij}}}{\Delta_{ij}} \quad (i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, n), \quad (28)$$

где

$$\Delta_{ij} = \begin{vmatrix} t_{(i-1),j}^2 & t_{(i-1),j} & 1 \\ t_{ij}^2 & t_{ij} & 1 \\ t_{(i+1),j}^2 & t_{(i+1),j} & 1 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ t_{(i-1),j} & t_{ij} & t_{(i+1),j} \\ t_{(i-1),j}^2 & t_{ij}^2 & t_{(i+1),j}^2 \end{vmatrix} \neq 0 \quad (\text{определитель Вандермонда});$$

$$\Delta_{a_{ij}} = \begin{vmatrix} x_{(i-1),j} & t_{(i-1),j} & 1 \\ x_{ij} & t_{ij} & 1 \\ x_{(i+1),j} & t_{(i+1),j} & 1 \end{vmatrix}; \quad \Delta_{b_{ij}} = \begin{vmatrix} t_{(i-1),j}^2 & x_{(i-1),j} & 1 \\ t_{ij}^2 & x_{ij} & 1 \\ t_{(i+1),j}^2 & x_{(i+1),j} & 1 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_{c_{ij}} = \begin{vmatrix} t_{(i-1),j}^2 & t_{(i-1),j} & x_{(i-1),j} \\ t_{ij}^2 & t_{ij} & x_{ij} \\ t_{(i+1),j}^2 & t_{(i+1),j} & x_{(i+1),j} \end{vmatrix};$$

$$\left. \begin{aligned} a_{ij} &= \frac{x_{(i+1),j} - x_{(i-1),j}}{t_{(i+1),j} - t_{(i-1),j}} \\ e_{ij} &= x_{(i-1),j} - \frac{x_{(i+1),j} - x_{(i-1),j}}{t_{(i+1),j} - t_{(i-1),j}} t_{(i-1),j} \end{aligned} \right\}. \quad (29)$$

В этих уравнениях принята следующая индексация:

а) первый индекс i обозначает номер участка волны реограммы, второй индекс j — номер волны реограммы;

$$б) (i-1; i; i+1) = \begin{cases} (A_j B_j C_j) & \text{для } i = 1 \\ (C_j D_j E_j) & \text{для } i = 2 \\ (E_j F_j G_j) & \text{для } i = 3 \\ (G_j H_j I_j) & \text{для } i = 4 \end{cases}$$

Для реограмм, содержащих плато, дополнительные зубцы и пр. (измененных реограмм), необходимо модифицировать функцию (26), описывающую волну реограммы, т. е. ввести дополнительные участки для плато, зубцов и пр., предварительно записав их аналитические выражения. Так, например, «шаблон» для плато описывается следующим образом (рис. 6, а):

$$\pi_k = \psi_k \wedge_1 \omega_k = \frac{1}{2} (\psi_k + \omega_k - |\psi_k - \omega_k|), \quad (30)$$

$$\text{где } \psi_k = \frac{x_{\Pi}}{2} [1 + \text{sign}(t - t_k^1)] \text{ и } \omega_k = \frac{x_{\Pi}}{2} [1 - \text{sign}(t - t_k^2)] -$$

функции-сигнатуры, проходящие через крайние точки плато волны реограммы.

Аналогично «шаблон» для зубца может быть описан функцией (рис. 6, б)

$$\begin{aligned}\pi_i &= \chi_i^1 \vee \chi_i^2 - (\chi_i^1 - \chi_i^1 \wedge \psi_i) - (\chi_i^2 - \chi_i^2 \wedge \omega_i) = \\ &= \frac{1}{2} (\psi_i + \omega_i + |\chi_i^1 - \chi_i^2| - |\chi_i^1 - \varphi_i| - |\chi_i^2 - \omega_i|),\end{aligned}\quad (31)$$

где $\chi_i^1 = d_i^1 t + e_i^1$ — уравнение прямой, проходящей через левую и угловую точки зубца;

$\chi_i^2 = d_i^2 t + e_i^2$ — уравнение прямой, проходящей через правую и угловую точки зубца;

$$\psi_i = \frac{x_z^1}{2} [1 + \text{sign}(t - t_i^1)] \text{ и } \omega_i = \frac{x_z^2}{2} [1 - \text{sign}(t - t_i^2)] —$$

функции-сигнатуры, проходящие через крайние точки зубца волны реограммы.

Таким образом, чтобы аналитически описать любую реограмму, необходимо иметь полный относительно класса реограмм набор «шаблонов», с помощью которых возможно синтезировать аналитические выражения любых реограмм. При этом уравнение реограммы в общем случае можно представить в виде

$$P(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \pi_{ij}(t; a_{ij}, \dots, e_{ij}, x_{ij}^1, x_{ij}^2, x_{ij}^3; t_{ij}^1, t_{ij}^2, t_{ij}^3), \quad (32)$$

где функции π_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$) являются аналитическими выражениями «шаблонов».

В заключение отметим, что информация о реограмме вводится в ЦВМ с некоторым определенным шагом Δt с помощью устройства «Силуэт» или какого-либо другого устройства, предназначенного для снятия с носителя и ввода графической информации в ЦВМ [6]. На основе информации по мере ввода ее в ЦВМ автоматически строится соответствующая функция. При этом, в первую очередь, с помощью специальной логической подпрограммы автоматически определяются координаты характерных точек волн реограммы (экстремумов, перегибов, изломов и т. п.), а также запоминаются и находятся соответствующие участки аппроксимации, после чего вся вводимая информация стирается.

ВЫВОДЫ

1. Характерная особенность изложенного метода аналитического описания кривых сложной структуры (реограмм) по сравнению с другими методами аппроксимации графической информации (Лагранжа, Ньютона, Гаусса и др.) — простота окончательных расчетных формул (28), (29) и повторяемость операций. Особенно важно то, что циклы операций аналогичны при определении параметров каждой волны рео-

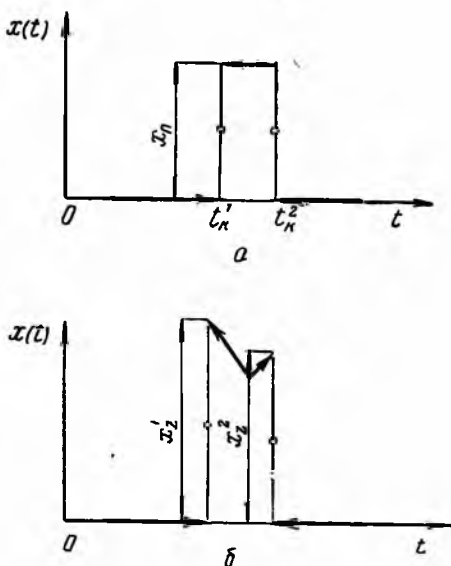


Рис. 6.

граммы. Все это делает данный метод удобным для реализации его на ЦВМ.

2. Относительным недостатком предлагаемого метода является его некоторая громоздкость. Однако при реализации этого метода на ЦВМ указанный недостаток становится несущественным, так как машинное время построения функций невелико (по мере ввода информации в ЦВМ), а сам процесс построения — автоматический. Поэтому предлагаемый метод аналитического построения функций может быть назван машинным методом.

3. Рассматриваемый метод построения функций достаточно точен: погрешность аппроксимации сравнима с погрешностями регистрации кривых на носителе и погрешностями снятия информации с носителя в процессе ввода в ЦВМ.

4. Отметим, что данный метод аналитического описания реограмм позволяет применять теорию автоматического распознавания образов в процессе их обработки.

5. Предлагаемый метод аналитического описания реограмм может быть использован для аналитического описания любой графической информации (электрокардиограмм, баллистокардиограмм и т. д.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Л. Дженкнер. Реоэнцефалография. Изд-во «Медицина», 1966.
2. Х. Х. Ярулин. Клиническая реоэнцефалография. Изд-во «Медицина», 1967.
3. Г. И. Энния. Реография в оценке сдвигов церебральной гемодинамики в возрастном аспекте и при атеросклерозе. Автореф. докт. дисс., Рига, 1968.
4. В. Л. Рвачев. Геометрические приложения алгебры логики. Изд-во «Техніка», Киев, 1967.
5. Б. А. Борисенко. Моделирование на цифровой вычислительной машине процесса топливоподачи многотопливного двигателя. Канд. дисс., Харьков, 1965.
6. В. Г. Абакумов, А. Н. Петренко. Устройства на видеоконе для ввода графиков в ЭВМ. Изд-во «Энергия», 1967.

ОБ ОДНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НЕЙРОНА

А. И. Бых, Л. В. Воевода, Ю. К. Худенский

В создании самонастраивающихся и самоорганизующихся систем нуждаются самые разнообразные области техники. Весьма перспективным считают применение в этих системах электрохимических элементов памяти — мемисторов [1], в частности, для создания самоприспосабливающихся искусственных нейронов, в которых, как и в нервных волокнах, основные процессы распространения импульсов возбуждения протекают в электролитах. Подобно нервным волокнам, эти модели характеризуются значительным временем релаксации (порядка 10^{-3} сек) [2]. Последнее обстоятельство связано с тем, что распространение импульса возбуждения в электрохимических системах обусловлено процессами, контролируемыми диффузией.

Однако наряду с процессами, контролируемыми диффузией, перенос энергии возбуждения в биологических системах может происходить в виде переноса электрона по молекулярной цепи [2, 3]. В связи с этим представляет интерес изучение быстрых процессов распространения электрических возбуждений в электролитах.

Наиболее приемлемым методом исследования для этих целей

можно считать наблюдение импульсов электрохемилюминесценции (ЭХЛ), которые возникают при прохождении импульсных токов через растворы неводных электролитов, содержащих примеси люминесцирующих органических молекул.

Модельный электролит такого рода состоит из неводного растворителя, например, диметилформамида, растворенной в нем соли типа хлористого натрия и ароматических люминесцирующих молекул, являющихся деполяризаторами при электролизе [4, 5].

По литературным данным, пределом длительности возбуждающих ЭХЛ электрических импульсов можно считать 10^{-3} сек. Данный временной предел теоретически обоснован для наблюдения ЭХЛ в [6], исходя из радикально-ионного механизма ЭХЛ, контролируемого диффузией ион-радикалов в электролите.

Цель настоящей работы — изучение возможности получения импульсов ЭХЛ при возбуждении их электрическими импульсами, имеющими длительность на два порядка меньше, чем предельная длительность для диффузионного механизма (10^{-3} сек).

Исследования проводились на электрохимической ячейке с двумя платиновыми электродами $\varnothing 1$ мм и глубиной погружения 15 мм, питание которых осуществлялось от генератора прямоугольных импульсов. Зазор между электродами составлял 1 мм. Световой сигнал ЭХЛ подавался на ФЭУ-18 с фотометрической схемой, на выходе которой использовался двухлучевой осциллограф С1-16.

На рис. 1 приведены осциллограммы: нижняя — возбуждающего напряжения ($t_n = 20$ мсек; $f = 25$ гц; амплитуда 26 в), верхняя — сигнала ЭХЛ. Указанная длительность импульсов возбуждения сохранялась в пределах, соответствующих механизму диффузии. Как видно из рис. 1, в исследуемом режиме разгорание свечения ЭХЛ характеризуется значительным временем запаздывания, составляющим ≈ 10 мсек. Амплитуда светового сигнала на выходе ФЭУ-18 ($R_n = 5 \cdot 10^3$ ом) составляла 300 мв. При сокращении длительности возбуждающих импульсов до 15 мсек, амплитуда сигнала ЭХЛ уменьшилась до 30 мв. Дальнейшее сокращение длительности импульсов, даже при увеличении частоты посылок, приводило к значительному уменьшению амплитуды сигнала ЭХЛ, который становился соизмеримым с уровнем шумов ФЭУ-18 в используемом режиме ($U = 860$ в). Описанные в [4, 6] режимы возбуждения ЭХЛ оказались непригодными для возбуждения сигналов ЭХЛ, превышающих уровень шумов ФЭУ при $t_n \leq 10$ мсек, в условиях, которыми мы располагали. Учитывая это, можно сделать вывод о допустимости радикально-ионного механизма ЭХЛ для области длительностей возбуждающих импульсов напряжения до 10^{-3} сек.

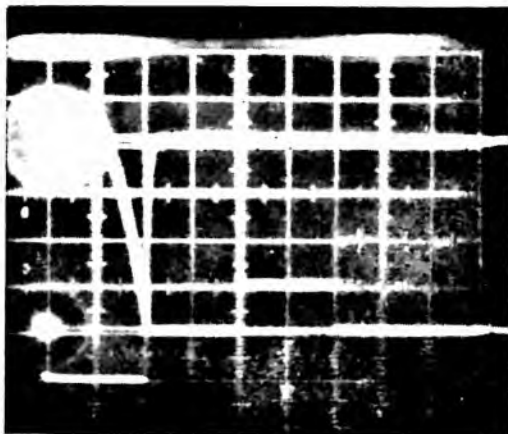


Рис. 1. Осциллограммы:

нижняя — возбуждающего биполярного импульса с параметрами $t_n = 20$ мсек; $f = 25$ гц, $U_m = 26$ в; верхняя — сигнала электрохемилюминесценции (ЭХЛ).

Как можно предположить на основании данных результатов, собственные потенциалы электродов недостаточны для сорбирования значительных количеств люминесцирующих органических молекул на поверхности электрода. Низкая концентрация сорбированных люминесцирующих молекул на электроде ограничивает световыход ЭХЛ при малых длительностях возбуждающих импульсов и значительно повышает

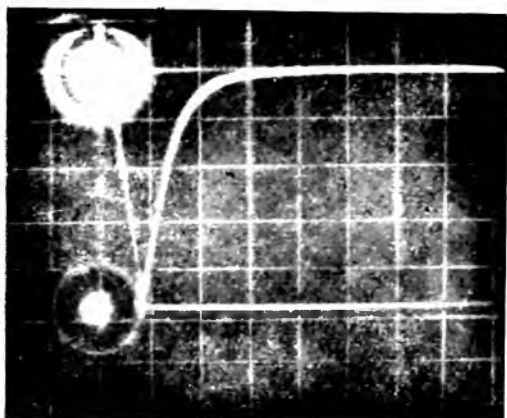


Рис. 2. Осциллограммы:
нижняя — возбуждающего униполярного импульса с параметрами $t_{\text{и}} = 35$ мксек, $f = 40$ гц, $U_m = 20$ в; верхняя — сигнала ЭХЛ.

время запаздывания сигналов ЭХЛ по отношению к фронту возбуждающего сигнала. Можно предположить, что предварительная поляризация электродов потенциалами, приводящими к частичной ионизации ароматических люминесцирующих молекул, увеличит их концентрацию на электроде в молекулярной и ионной форме, благодаря чему должно уменьшиться время запаздывания и возрасти световыход ЭХЛ при возбуждении короткими пусковыми импульсами.

Исследования проводились на аналогичной ячейке, но с четырьмя электродами: питание двух из них осуществлялось от генератора пря-

моугольных импульсов, третий и один из рабочих электродов использовались для подачи поляризующего напряжения, а четвертый — в качестве электрода сравнения.

Возбуждение ЭХЛ проводилось униполярными положительными импульсами при подаче поляризующего напряжения минусом на рабочий электрод. После работы в указанном режиме в течение 30 мин и прохождения переходных процессов в ячейке был достигнут оптимальный по яркости свечения ЭХЛ режим: $t_{\text{и}} = 35$ мксек; $U_m = 20$ в; $f = 40$ гц. На рис. 2 показаны осциллограммы возбуждающего напряжения и сигнала ЭХЛ при $t_{\text{и}} = 35$ мсек, $f = 40$ гц и амплитуде 20 в.

Полученная амплитуда светового сигнала (3,5 в) в цепи фотометрирования дает возможность провести оценку мгновенной (динамической) и статической яркости свечения ЭХЛ в описанном режиме. Исходя из геометрии опыта (расстояние до катода ФЭУ-18 — 20 мм, размеры электрода и интегральная чувствительность ФЭУ-18 известны), можно оценить мгновенную яркость ЭХЛ $\approx$ в 20 нт, что с учетом формулы Талбота [7] дает статическую яркость 0,02 нт.

По мере дальнейшего уменьшения длительности возбуждающего импульса до 5 мсек длительность нарастания светового сигнала также сокращалась. Амплитуда светового сигнала при частоте посылок 40 гц в 3 раза превышала уровень собственных шумов использованного ФЭУ. Световой сигнал на выходе ячейки не наблюдался при отдельной подаче возбуждающих импульсов и поляризующего напряжения.

Таким образом, режим работы с предварительной поляризацией рабочего электрода позволяет генерировать световые импульсы ЭХЛ в области длительностей возбуждающих сигналов до $5 \cdot 10^{-6}$ сек. Можно

предположить, что свечение ЭХЛ в этой области длительностей возбуждающих сигналов определяется не диффузионным механизмом рекомбинации ион-радикалов, а переносом электрона между ион-радикалами в растворе.

Процессы переноса электрона в электролите могут быть использованы при конструировании элементов быстродействующей памяти типа мемисторов, применение которых возможно в оптоэлектронных схемах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрохимические преобразователи информации. Под ред. П. Д. Луковцева. Изд-во «Наука», 1966.
2. А. Г. Пасынский. Биофизическая химия. Изд-во «Высшая школа», 1968.
3. Sent — Gyorgy. Science, 161, 3845 (1968).
4. D. M. Hercules. Science, 145, 808 (1964).
5. R. Visco, E. A. Chandross. El. acta, 13, 1187 (1968).
6. S. W. Feldberg. J. Electrochem. Soc., 88, 390 (1966).
7. В. И. Раков. Индикаторные устройства радиолокационных станций. Судпромгиз, Л., 1962.

СИНТЕЗ КОМБИНАЦИОННОГО СУММАТОРА НА ФОРМАЛЬНЫХ НЕЙРОНАХ

С. О. Мкртчян, В. И. Потапов

Формальный нейрон (ФН) — специфический пороговый элемент (ПЭ), отличающийся от классического ПЭ тем, что на одном ФН с δ входами можно реализовать любую из множества $\{M\} = 2^{2^\delta}$ логическую функцию δ переменных, чего нельзя сказать относительно классического ПЭ. Такая функциональная полнота ФН позволяет построить на их основе различные логические узлы дискретных автоматов, отличающиеся экономичностью, функциональной гибкостью (многофункциональностью) и высокой надежностью [1]. В данной статье показана возможность построения сумматора ЦВМ на ФН и его схемная реализация. Как будет видно из дальнейшего изложения, эта схема может выполнять различные логические функции в зависимости от величины порога возбуждения θ , т. е. она является схемой с управляемой логикой. Предполагается, что θ может принимать только дискретные значения $\theta_1, \theta_2, \theta_3 \dots$. Разность $\theta_i - \theta_{i-1} = h_i$ ($i = 1, 2, 3 \dots$) называется шагом изменения порога. Заметим, что логикой — выполняемой функцией — нейрона можно управлять также путем изменения весовых коэффициентов волокон (этот способ здесь не будет рассматриваться).

Множество $\{\mu\}_n$ выходных функций нейрона во всем диапазоне изменения порога $(+\infty, -\infty)$ содержит не более $(2^{\delta} - 1)$ элементов (тождественные нулю и единице не учитываются как неинформативные функции). $\{\mu\}_n$ всегда является непустым множеством, поскольку в противном случае нейрон не имеет физического смысла. Таким образом, число элементов (ν_n) этого множества находится в пределах $1 \leq \nu_n \leq (2^{\delta} - 1)$ $\{\mu\}_n \in \{M\}$. $\{\mu\}_n$ является упорядоченным множеством в следующем смысле: при изменении θ от $+\infty$ до $-\infty$ или наоборот выходные функции нейрона F_i в $\{\mu\}_n$ располагаются в порядке увеличения или уменьшения весов. Здесь за вес функции F_i принимается число дизъюнктивных членов, когда F_i записана в совершенной дизъюнктивной нормальной форме. Кроме этого, на $\{\mu\}_n$ (точнее, на его элементы F_i) накладывается еще одно ограничение: каждая следующая по весу функция F_{i+1} содержит в себе предыдущую функцию F_i , т. е. $F_i \in F_{i+1}$ ($i = 1, 2, 3 \dots$), где возрастание индекса соответствует возрастанию веса функции. Если ряд весов функций F_i множества $\{\mu\}_n$ соответствует начальному отрезку натурального ряда длиной 2^δ , то такой нейрон называется невырожденным. Другими словами, нейрон считается невырожденным, если на каждом шаге изменения порога вес F_i изменяется на

одну и только одну единицу. В противном случае нейрон называется вырожденным.

Выполняемая нейроном логическая функция изображается его функциональной или точечной Венн-диаграммой ($D^{(1)}$). На рис. 1 показаны диаграмма Венна при $\delta = 3$ и конъюнкции логических переменных и их отрицаний, которые соответствуют различным областям диаграммы. При

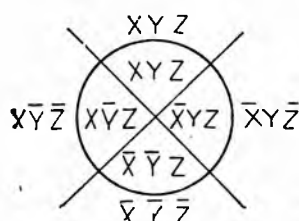


Рис. 1. Обозначения областей диаграммы Венна (случай $\delta = 3$).

изображении некоторой логической функции (когда $\delta = 3$) точечной диаграммой всегда используется указанное обозначение областей Венн-диаграммы. Для этого логическая функция сначала приводится к совершенной дизъюнктивной нормальной форме. Например,

$$((XY) \rightarrow Z) \rightarrow (Y \vee Z) = (\overline{X \vee Y \vee Z}) \vee Y \vee Z = XYZ \vee \overline{X}YZ \vee XY\overline{Z} \vee \overline{X}Y\overline{Z} \vee \overline{X}\overline{Y}Z \vee$$

$$\vee X\overline{Y}\overline{Z} = \bigotimes.$$

Использование диаграмм Венна позволяет заменить длинные логические формулы простыми символами (так называемые диаграммные уравнения) и вместо законов алгебры логики пользоваться более простыми формальными правилами преобразования диаграмм.

θ	θ_0	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8
$\left\{ \mu \right\}_H^S$									
$\left\{ \mu \right\}_H^E$									

Рис. 2. Примеры множеств выходных функций нейронов.

Рассмотрим один разряд двоичного сумматора. Пусть X есть первое слагаемое, Y — второе и Z — перенос из предыдущего разряда. Обозначим сумму через S , а перенос в следующий разряд — через E . Тогда

$$S = XYZ \vee X\overline{Y}\overline{Z} \vee \overline{X}Y\overline{Z} \vee \overline{X}\overline{Y}Z = \bigotimes.$$

$$E = XYZ \vee XY\overline{Z} \vee X\overline{Y}Z \vee \overline{X}YZ = \bigotimes.$$

В силу вышеупомянутых ограничений функции S и E не могут принадлежать одному и тому же множеству $\{\mu\}_H$, т. е. для реализации каждой из функций потребуется отдельный нейрон. Таким образом, один разряд сумматора будет реализован на двух нейронах.

Допустим, что $\{\mu\}_H^S$ и $\{\mu\}_H^E$ таковы, как на рис. 2. В верхней строке показаны значения порога, при котором нейрон суммы (H_S) и нейрон переноса (H_E) должны выполнять указанные внизу функции. Видно, что при $\theta = \theta_4$ H_S и H_E выполняют нужные нам функции. Пусть $h_i = \theta_i - \theta_{i-1} = 1$ ($i = 1, 2, 3, \dots, 2^n$). Тогда $\{\mu\}_H^S$ и $\{\mu\}_H^E$ (рис. 2) можно изобразить как диаграммы, в областях которых записан порядок появления точек. Такая диаграмма называется порядковой и обозначается через $D^{(N)}$.

Таким образом, порядковыми диаграммами нейронов H_S и H_E будут соответственно $D_S^{(N)}$ и $D_E^{(N)}$ (рис. 3). $D_S^{(N)}$ и $D_E^{(N)}$ содержат определенную информацию о том, каковы должны быть структуры H_S и H_E . Однако по ним еще невозможно синтезировать нейроны. Для этого нужно знать величину порога на каждом шаге (для каждого нейрона). Иначе говоря, нужно иметь пороговые диаграммы ($D^{(\theta)}$) нейронов.

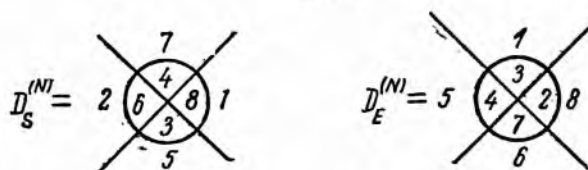


Рис. 3. Порядковые диаграммы.

Число, записанное в каждой области пороговой диаграммы, показывает величину порога, при котором появляется точка в соответствующей области функциональной (точечной) диаграммы. Следовательно, на основании рис. 2 и 3 однозначно получим пороговые диаграммы, представленные на рис. 4. Для определения численных значений порога а различных шагах поступаем следующим образом. Приравниваем нулю значение порога (θ_i), которое записано в области $\overline{XYZ}$ (рис. 1) диаграммы. Тогда все остальные $\theta_{i \pm k} = \pm kh$ ($k = 1, 2, 3, \dots$), если $h_1 = h_2 = \dots = h$.

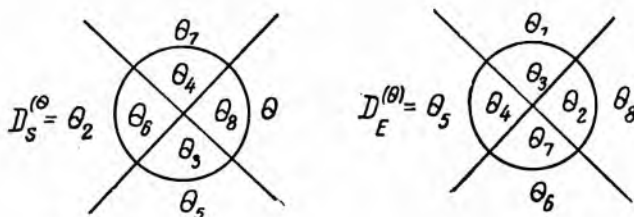


Рис. 4. Пороговые диаграммы (неявный вид).

В общем случае, когда $h_i = \theta_i - \theta_{i-1}$ и $h_i \neq h_j$ для всех $i \neq j$, алгоритм перехода от порядковых к пороговым диаграммам следующий:

$$\theta_{i-k} = + \sum_{j=1}^{k-1} h_{i-j} \quad (k = 1, 2, \dots, i) \quad \text{и} \quad \theta_{i+1} = - \sum_{j=1}^k h_{i+j}$$

($k = 1, 2, \dots, (2^8 - i)$), где i — индекс θ , записанного в области $\overline{XYZ}$ порядковой диаграммы.

При $h = 1$ из рис. 4 получим пороговые диаграммы, представленные на рис. 5. По этим диаграммам уже можно синтезировать соответствующие нейроны пользуясь алгоритмом, изложенным в [2]. В результате получим нейроны, показанные на рис. 6, а и б.

Здесь обозначения возбуждающих, запрещающих и тормозящих волокон те же, что и в [2]. Нетрудно видеть, что если порог H_S равен $+1$, а порог H_E равен $+2$, то они выполняют нужные нам функции S и E . Если изменять пороги нейронов, изменятся также их выходные функции в последовательности, показанной на рис. 2.

Функциональная блок-схема формального нейрона представлена на рис. 7, где 1 — узел взаимодействия волокон; 2 — узел «взвешивания»

(точнее, приписания весов) входных волокон; 3 — линейный сумматор; 4 — пороговое устройство (генератор). Показанные здесь узлы, кроме первого, входят также в обыкновенный пороговый элемент, и их структура в определенной степени известна. Поэтому «раскроем» только узел 1. Схема узла 1, как и всего нейрона, зависит от того, на каких

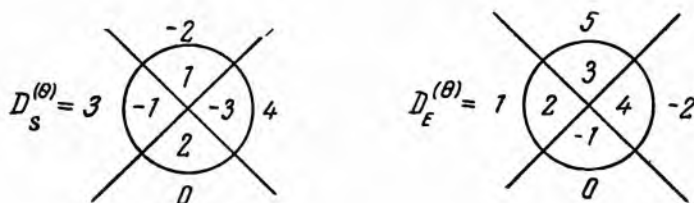


Рис. 5. Пороговые диаграммы (явный вид).

элементах она реализуется. Так, например, если схему построить на нейристорных элементах [3], то запрещение одного волокна другим реализуется довольно просто. Для этого запрещающее волокно нужно

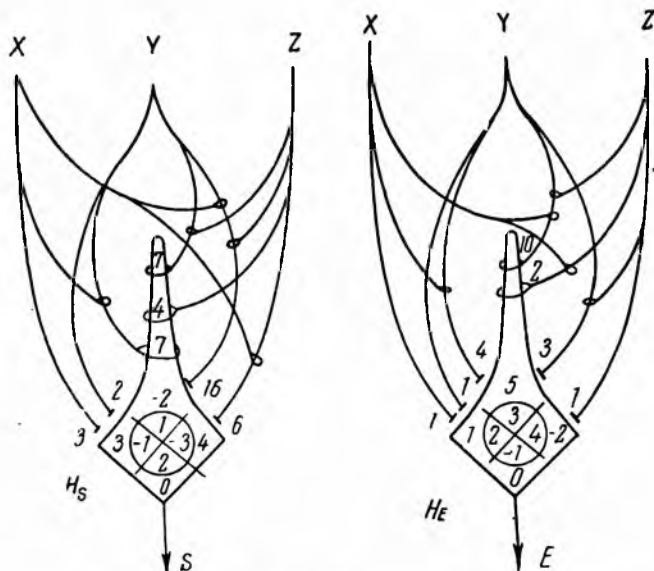


Рис. 6. Нейроны суммы (H_s) и переноса (H_E).

лишь соединить рефрактным образом (так называемое R -соединение [3]) с волокном, по которому проходит сигнал. Но в этом случае трудно реализуются большие весовые коэффициенты. При построении схемы на обыкновенных полупроводниковых приборах весовой коэффициент реализуется довольно просто — на одном сопротивлении, а для реализации взаимодействия волокон используются инверторы (схемы «НЕ») и диодные клапаны (схемы «И»).

На рис. 8 представлена блок-схема синтезированного нейрона H_s , в которой узел взаимодействия волокон заменен системой логических элементов. Здесь возбуждающие входы изображены черной стрелкой, а тормозящие — светлой. Легко заметить, что число элементов I равно числу запрещаемых волокон (рис. 6), а общее число диодов в клапа-

нах I равно сумме чисел запрещающих и запрещаемых волокон. Можно показать, что в общем случае при синтезе нейрона по упомянутому выше алгоритму с последующим переходом в блок-схеме типа представленной на рис. 8 общее число клапанов I в схеме составит $r_k \leq (2^{\delta} - \delta - 1)$, из которых число клапанов с j -входами равно $r(j) \leq C_{\delta}^j$ ($j = 2, 3, \dots, \delta$). Следовательно, общее число диодов в этих элементах равно

$$r_d \leq \sum_{i=2}^{\delta} i C_{\delta}^i = \delta (2^{\delta-1} - 1).$$

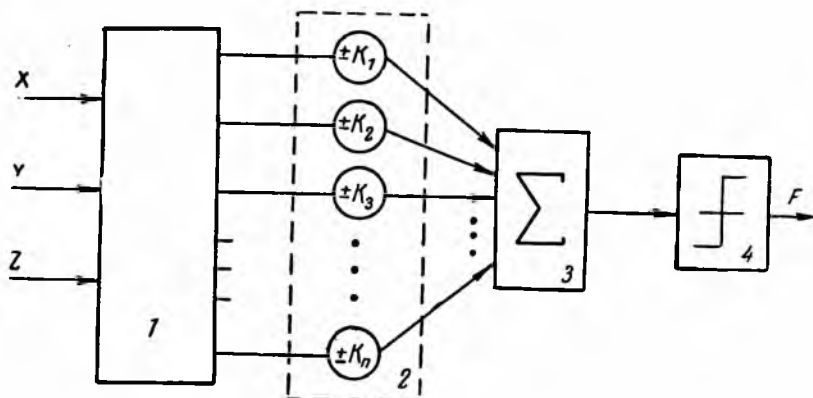


Рис. 7. Функциональная блок-схема нейрона.

Таким образом, функциональная схема одного разряда комбинационного сумматора, построенного на формальных нейронах, выглядит так, как это показано на рис. 9. Здесь узлы взаимодействия волокон обоих нейронов объединены. Эта схема является лишь конкретным примером, и показанная здесь структура — вовсе не обязательная. Если из

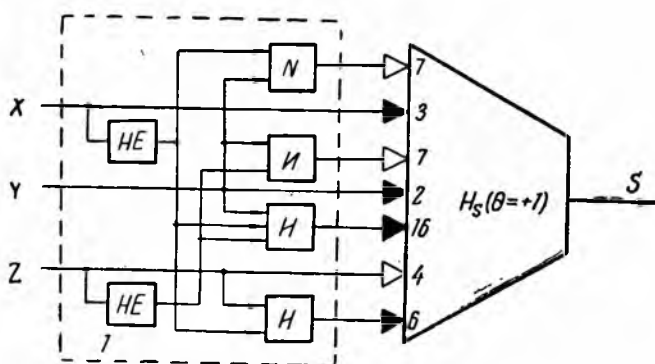


Рис. 8. Блок-схема нейрона H_8 с «раскрытым» узлом взаимодействия волокон.

множеств нейронов, удовлетворяющих данным пороговым диаграммам [2] выбирать другие нейроны или предварительно задавать другие множества $\{\mu\}$, то получим совершенно другую картину взаимодействия волокон и использования выходов триггеров. Преимущество этой некоторой произвольности синтеза нейронов заключается в возможности

индивидуального подхода при построении каждого разряда сумматора. Благодаря этому, например, можно разгружать тот или иной выход (в том числе Z и $\bar{Z}$) данного разряда.

Выше указывалось, что сложность технической реализации схемы на формальных нейронах, а также ее экономичность и надежность во многом зависят от используемых элементов. Исследования показали,

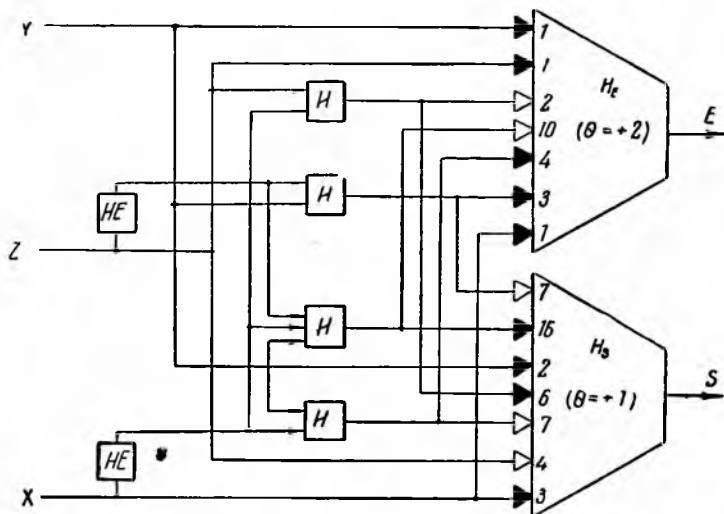


Рис. 9. Функциональная блок-схема одного разряда сумматора.

что одним из наиболее удачных вариантов построения схемы на формальных нейронах в указанном смысле является реализация на феррито-транзисторных ячейках (ФТЯ) (рис. 10). Пороговое устройство формального нейрона реализуется на одной ФТЯ с обмоткой постоянного подмагничивания. Ток, протекающий по этой обмотке, характеризует величину порога Θ . Изменяя величину тока, можно легко установить необходимое значение порога. Одновременно с функциями порогового устройства ФТЯ выполняет функции сумматора. Сердечник ячейки имеет n входных обмоток в соответствии с числом возбуждающих и тормозящих входных волокон. Изменение действия (возбуждающего или тормозящего) входных сигналов на пороговое устройство достигается соответствующим направлением включения входных обмоток. Так, обмотки, соединенные с возбуждающими волокнами, включены встречно с обмоткой постоянного подмагничивания, а обмотки, соединенные с тормозящими — согласно с ней. Число витков $w_1, w_2, \dots, w_n$ в каждой входной обмотке пропорционально абсолютной величине веса соответствующего входного волокна $|K_1|, |K_2|, \dots, |K_n|$.

Узел взаимодействия входных волокон также довольно просто реализуется на ФТЯ с постоянным подмагничиванием, удерживающим сердечник каждой ячейки в состоянии «1». Количество ячеек, необходимых для реализации узла взаимодействия (рис. 7), равно числу запрещаемых волокон и не зависит от числа запрещающих. Выход каждой ячейки соединен с соответствующей обмоткой на сердечнике порогового устройства и, по сути, является запрещаемым волокном.

Каждая ячейка имеет две входные обмотки, одна из которых соединена последовательно с запрещающим волокном, а другая — с входной

клеммой запрещающего волокна. Если сигналы одновременно подаются в обе входные обмотки ФТЯ, то они взаимно компенсируют друг друга и импульс на выходе ячейки отсутствует (сердечник ячейки остается в состоянии «1»). Если сигнал подается только в одну входную обмотку,

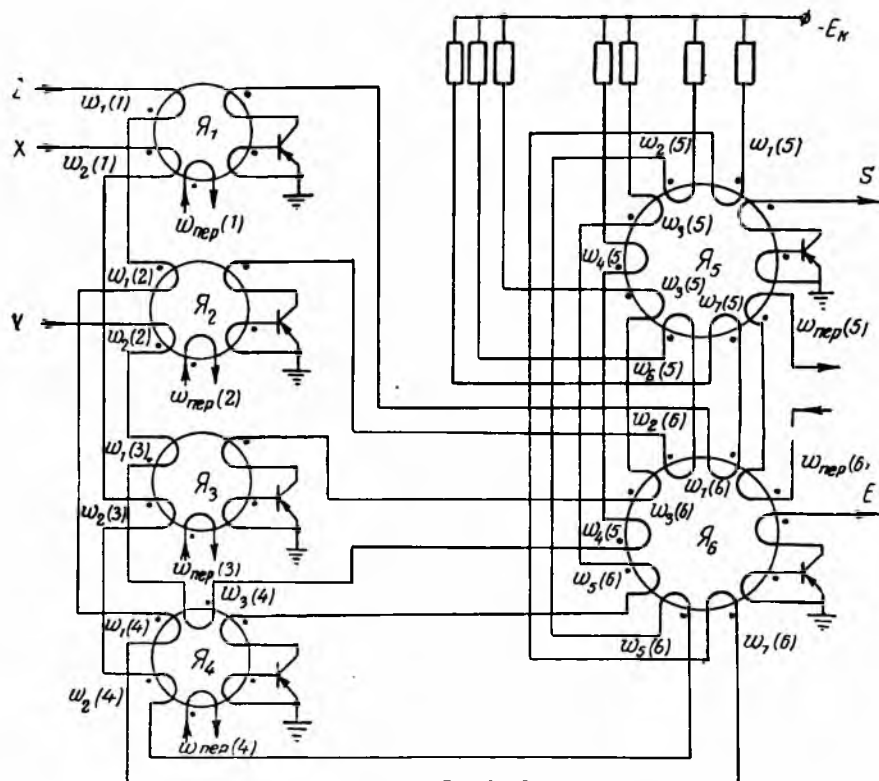


Рис. 10. Феррито-транзисторная схема одного разряда сумматора, построенного на формальных нейронах.

связанную с входной клеммой запрещающего волокна, то он переманичивает сердечник ячейки из состояния «1» в состояние «0», и на выходе ячейки появляется импульс тока, воздействующий на сердечник порогового устройства. По окончании входного импульса под действием тока постоянного подмагничивания сердечник ячейки возвращается в состояние «1». В том случае, когда сигнал поступает только в обмотку, соединенную с запрещающим входным волокном, подтверждается единичное состояние ячейки и импульс на ее выходе отсутствует.

Используя описанные выше принципы, удалось построить феррито-транзисторный комбинационный сумматор на формальных нейронах (рис. 10), соответствующий функциональной схеме на рис. 9. Узел взаимодействия входных волокон выполнен на четырех ФТЯ — Я₁, Я₂, Я₃ и Я₄. Пороговые элементы нейронов Н₅ и Н₆ выполнены соответственно на феррито-транзисторных ячейках Я₅ и Я₆. Точками на схеме обозначено начало обмоток. Число витков в обмотках постоянного подмагничивания ячеек Я₁ — Я₄ выбрано одинаковым.

Обозначим через $w_i(k)$ i -ю обмотку k -й ячейки, а через $w_{пер}$ — обмотки подмагничивания. В приведенной схеме $w_{пер}(1) = \dots = w_{пер}(4)$.

Входные обмотки этих ячеек имеют также одинаковое число витков $w_1(1) = w_2(1) = w_1(2) = w_2(2) = w_1(3) = w_2(3) = w_1(4) = w_2(4) = w_3(4)$.

В связи с тем, что порог нейрона H_S равен $+1$, а порог нейрона $H_E = +2$, число витков в обмотках постоянного подмагничивания ячеек Y_5 и Y_6 находится в соотношении

$$\omega_{\text{пер}}(6) = 2\omega_{\text{пер}}(5).$$

Количество витков в остальных обмотках, расположенных на сердечниках ячеек Y_5 и Y_6 , пропорционально весовым коэффициентам соответствующих волокон

$$\begin{aligned} \omega_1(5) \sim 3; \omega_2(5) \sim 4; \omega_3(5) \sim 16; \omega_4(5) \sim 2; \omega_5(5) = \omega_6(5) \sim 7; \\ \omega_7(5) \sim 6; \omega_1(6) \sim 2; \omega_2(6) \sim 3; \omega_3(6) \sim 4; \omega_4(6) = \omega_6(6) = \omega_7(6) \sim 1; \\ \omega_5(6) \sim 10. \end{aligned}$$

В качестве примера рассмотрим работу описываемого сумматора в предположении, что на его вход подана следующая комбинация переменных: $X = 1$, $Y = 1$, $Z = 0$. Поступивший на вход X импульс проходит по обмотке $\omega_2(1)$ и подтверждает единичное состояние ячейки Y_1 . Проходя далее по обмоткам $\omega_2(3)$ и $\omega_2(4)$, он компенсирует действие импульса, поданного на вход Y ячейки Y_3 и Y_4 . Ячейка Y_2 под воздействием импульса в обмотке $\omega_2(2)$ перемагничивается из состояния «1» в состояние «0», и на ее выходе появляется импульс тока. Таким образом, в обмотки $\omega_6(6)$ и $\omega_2(5)$, $\omega_4(6)$ и $\omega_4(5)$, $\omega_2(6)$ и $\omega_6(5)$ пороговых устройств поступают импульсы тока. Легко подсчитать, что алгебраическая сумма весовых коэффициентов обмоток, по которым протекает импульс тока, для ячейки Y_5 равна -2 , а для ячейки Y_6 — $+5$. В связи с тем, что у ячейки Y_5 $\theta = +1$, а у ячейки Y_6 $\theta = +2$, на выходе сумматора имеем $S = 0$ и $E = 1$. Анализ работы сумматора при любых других сочетаниях входных переменных не представляет трудности.

В заключение отметим, что применение формальных нейронов позволяет строить высоконадежные схемы различных логических узлов ЦВМ, в частности, сумматоров. Кроме того, поскольку формальные нейроны являются элементами с управляемой логикой, то на них можно построить функционально гибкие (многофункциональные) схемы цифровых автоматов. В таких автоматах одна и та же структура может выполнять различные функции в зависимости от внутренних и внешних условий (отказы блоков, изменение класса решаемых задач и т. д.). Управление функциями такого многофункционального автомата можно реализовать централизованным изменением порога нейронов — как вручную, так и программным путем. Подобные функционально гибкие автоматы послужат связующим звеном между будущими самоорганизующимися адаптивными автоматами, современными детерминированными автоматами. По-видимому, развитие ЦВМ в ближайшем будущем пойдет именно в этом направлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. S. McCulloch. Agathe Tyche of nervous nets — the lucky reckoners. «Proc. Symposium on Mechanization of Thought Processes»; N. P. L., Teddington, 1958.
2. С. О. Мкртчян. Алгоритм построения формального нейрона с оптимальными параметрами. Изв. АН СССР, Техническая кибернетика, 1965, № 4.
3. Г. Д. Крейн. Нейристор — новый прибор. Вопросы его применения в схемах. Труды института радиоинженеров, 1962, т. 50, № 10.

РАЗЛОЖЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОЙ ФУНКЦИИ В РЯД ИЗ ПРОИЗВОДНЫХ И ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОГРАММ

И. Д. Пономарева, Г. В. Цепков

Проблема автоматического анализа непрерывных биоэлектрических процессов чрезвычайно актуальна. Одним из основных затруднений на пути ее решения является ввод информации в ЦВМ. Используемые аналого-цифровые преобразователи осуществляют квантование и цифровое кодирование с такой частотой, при которой число дискретных ординат за период высшей гармоники было бы достаточным для восстановления непрерывной функции методом линейно-кусочной аппроксимации. При этом количество ординат, вырабатываемых за период высшей гармоники, должно быть значительно больше двух, требующихся по теореме Котельникова [1].

В электрофизиологическом эксперименте часто необходимо анализировать значительные по времени участки электрограмм (10; 15 сек и более).

Учитывая, что спектр — например ЭЭГ — расположен в полосе от 0 до 100 μ ц, нетрудно заметить, что описанный выше способ кодирования информации не всегда целесообразен.

Нами исследовалась возможность кодирования электрограмм путем выделения экстремальных точек при некоторых известных общих статистических параметрах. В таком методе используются биологические предпосылки того, что для нервной ткани в качестве информативных составляющих, например, сигнала, отмечаются моменты обращения в нуль его производных [2]. Метод основан на теоретическом доказательстве возможности разложений непрерывной функции в ряд из ее производных, в силу чего он применим только для стационарных процессов.

Докажем следующее.

Теорема. *Всякая стационарная непрерывная случайная функция представима в виде ряда из ее производных*

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

Доказательство. Пусть $x(t)$ — стационарный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием $m_x = 0$, дисперсией $Dx(t) = 1$; $R(\tau)$ — корреляционная функция процесса, имеющая $(n-1)$ переходов через нуль $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}$. Тогда система функций $x(t), x(t - \tau_1), \dots, x(t - \tau_{n-1})$ является ортонормированной в силу свойств корреляционной функции, определяемой

$$R(\tau) = \int_0^\infty x(t) x(t - \tau) dt.$$

Разложим в ряд производные функции $x(t)$, приняв в качестве базисной систему $x(t), x(t - \tau_1), \dots, x(t - \tau_{n-1})$,

$$x'(t) = a_{11}x(t) + a_{12}x(t - \tau_1) + \dots + a_{1n}x(t - \tau_{n-1});$$

$$x''(t) = a_{21}x(t) + a_{22}x(t - \tau_1) + \dots + a_{2n}x(t - \tau_{n-1});$$

$$\dots \dots \dots$$

$$x^{(n)}(t) = a_{n1}x(t) + a_{n2}x(t - \tau_1) + \dots + a_{nn}x(t - \tau_{n-1}).$$

Нетрудно убедиться, что коэффициенты a_{ij} определяются формулами

$$a_{ij} = \frac{d^i R}{d\tau^i} \Big|_{\tau=\tau_{j-1}} \quad (i = 1, 2, \dots, n-1; j = 1, 2, \dots, n).$$

Решим систему (3) относительно $x(t)$. Она имеет решение во всех точках непрерывности $x'(t)$, $x''(t)$, $\dots$, $x^{(n)}(t)$:

$$x(t) = \frac{1}{\Delta} [x'(t) \alpha_1 + x''(t) \alpha_2 + \dots + x^{(n)}(t) \alpha_n].$$

Здесь

$$\Delta = \begin{vmatrix} \frac{dR}{d\tau} \Big|_{\tau=0} & \frac{dR}{d\tau} \Big|_{\tau=\tau_1} & \dots & \frac{dR}{d\tau} \Big|_{\tau_{n-1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d^n R}{d\tau^n} \Big|_{\tau=0} & \frac{d^n R}{d\tau^n} \Big|_{\tau=\tau_1} & \dots & \frac{d^n R}{d\tau^n} \Big|_{\tau_{n-1}} \end{vmatrix};$$

$$\alpha_i = (-1)^{i-1} \Delta_i,$$

где Δ_i — определители алгебраических дополнений к элементам первого столбца.

Рассмотрим возможность восстановления исходной функции по ее экстремальным значениям для случая, когда корреляционная функция имеет один переход через нуль τ_i :

$$x(t) \simeq A_1 x'(t) + A_2 x''(t),$$

где

$$A_1 = - \frac{\frac{d^2 R}{d\tau^2} \Big|_{\tau_i}}{\frac{dR}{d\tau} \Big|_{\tau=\tau_i} \frac{d^2 R}{d\tau^2} \Big|_{\tau=\tau_0}}; \quad A_2 = - \frac{1}{\frac{d^2 R}{d\tau^2} \Big|_{\tau=\tau_0}}.$$

Аппроксимирующий полином второго порядка в точках t_i имеет вид

$$x(t) = mt^2 + nt + p,$$

где

$$m = \frac{x(t_i)}{2A_2}; \quad n = - \frac{x(t_i)}{A_2} t_i; \quad p = x(t_i) + \frac{x(t_i)}{2A_2} t_i^2.$$

Точность восстановления определяется формулой

$$\epsilon = \sqrt{\frac{N}{\sum_{i=1}^N [x(t) - \hat{x}(t)]^2}}.$$

Как показали исследования на ЦВМ БЭСМ-6, такой алгоритм кодирования без вычисления АКФ может применяться для некоторых специализированных алгоритмов обработки биоинформации (полярно-корреляционный, гистограммы временных интервалов между экстремумами). Представляет интерес расчет электрограммы путем определения необходимых параметров АКФ по спектральным характеристикам.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Кондалев. Преобразователи формы информации. Изд-во «Наукова думка», Киев, 1965.
2. Г. В. Цепков. Время — импульсный метод классификации непрерывных функций. Материалы симпозиума по прикладной математике и кибернетике, Горький, 1967.

ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ ОПИСАНИЮ ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МЕЛЬКАНИЙ ЯРКОСТИ

Е. Г. Качко

В [1] предложена линейная модель инерции зрения

$$S(t) = c \int_{-\infty}^t B(\tau) A(t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

где $B(\tau)$ — яркость зрительной картины;

$S(t)$ — светлота зрительного ощущения;

$A(t)$ — функция затухания;

c — постоянный коэффициент.

С учетом исследований Аллара формула (1) принимает вид

$$S(t) = c \int_{-\infty}^t B(\tau) e^{-\frac{t-\tau}{a}} d\tau. \quad (2)$$

Выражение (2) носит название математической инерции зрения Аллара — Луизова.

Модель (2) проверена Луизовым [1] для одиночных вспышек яркости, получено хорошее согласование теории с опытом. Показано, что модель удовлетворяет основному психофизическому закону Тальбота. Правда, автор не применяет линейной модели для математического описания зрительного восприятия периодических мельканий яркости.

В [2] показано, что модель (1) хорошо согласуется с законом Плато в обобщенной форме. Из модели (2) выводятся некоторые математические следствия, допускающие экспериментальную проверку.

Линейная модель использовалась в качестве рабочей модели при исследовании зрительного восприятия периодических мельканий яркости [5]. В результате обработки полученных экспериментальных данных автор определяет функцию затухания, при которой реакция модели (1) согласуется с реакцией зрительной системы в случае одинаковых входных сигналов.

Положительные результаты применения линейной модели для математического восприятия периодических мельканий яркости обуславливают необходимость ее дальнейшего исследования.

1. Известен экспериментальный факт зависимости критической частоты мельканий яркости от амплитуды [3]. Для прямоугольных мельканий при скважности $\lambda = \frac{1}{2}$ эта зависимость, известная под названием закона Портера — Айвса, имеет вид

$$n = a + b \lg \Delta B, \quad (3)$$

где ΔB — амплитуда прямоугольных мельканий яркости (рис. 1);

n — критическая частота, гц;

a и b — постоянные коэффициенты.

Пусть нестационарные зрительные картины B_1, B_2, B_3 представляют собой прямоугольные мелькания яркости (диаграмма (рис. 2)), амплитуды которых связаны соотношением

$$\frac{\Delta B_2}{\Delta B_1} = \frac{\Delta B_3}{\Delta B_2} = \alpha. \quad (4)$$

Для каждой из зрительных картин критическая частота соответственно определяется как

$$n_1 = a + b \lg \Delta B_1; \quad (5)$$

$$n_2 = a + b \lg \Delta B_2; \quad (9)$$

$$n_3 = a + b \lg \Delta B_3. \quad (7)$$

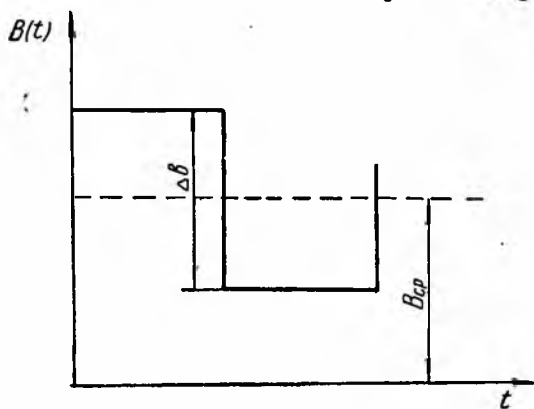


Рис. 1.

Подставив вместо $\Delta B_2 = \alpha \Delta B_1$, $\Delta B_3 = \alpha \Delta B_2$, вычтем (5) из (6) и (6) из (7). Тогда

$$n_2 - n_1 = \frac{\Delta B_2}{\Delta B_1}; \quad (8)$$

$$n_3 - n_2 = \frac{\Delta B_3}{\Delta B_2}.$$

Таким образом, из закона Портера—Айвса следует, что если амплитуды мельканий яркости связаны между собой соотношением (4), то

$$n_2 - n_1 = n_3 - n_2. \quad (9)$$

Из модели (2) не удастся вывести такое следствие. Действительно, если

$$\Delta B_1 \gg \Delta B_n; \quad \Delta B_2 \gg \Delta B_n; \quad \Delta B_3 \gg \Delta B_n,$$

то, согласно [3],

$$\text{Следовательно, } n_1 = \frac{1}{4a} \cdot \frac{\Delta B_1}{\Delta B_n}; \quad n_2 = \frac{1}{4a} \cdot \frac{\Delta B_2}{\Delta B_n}; \quad n_3 = \frac{1}{4a} \cdot \frac{\Delta B_3}{\Delta B_n}.$$

$$n_2 - n_1 = \frac{1}{4a} \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right); \quad (10)$$

$$n_3 - n_2 = \frac{1}{4a} \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{B}{\alpha^2} \right). \quad (11)$$

Выполнение формулы (9) очевидно только в том случае, когда $\alpha = 1$, т. е. все три зрительные картины одинаковы. Для $\alpha \neq 1$ следствие из модели не совпадает со следствием из закона Портера—Айвса.

Рассмотрим, позволит ли какая-либо другая функция затухания согласовать линейную модель с законом Портера—Айвса. Запишем выражение (3) следующим образом:

$$R(\omega) = k e^{-\xi|\omega|}, \quad (12)$$

$$\text{где } k = \Delta S_n 10^{\frac{a}{b}}; \quad \xi = \frac{1}{2\pi b}; \quad R(\omega) = \frac{\Delta S_n}{\Delta B_n} (\omega, \text{ рад/сек}).$$

Если рассматривать глаз как некоторую линейную динамическую систему при восприятии мельканий яркости, $R(\omega)$ можно считать

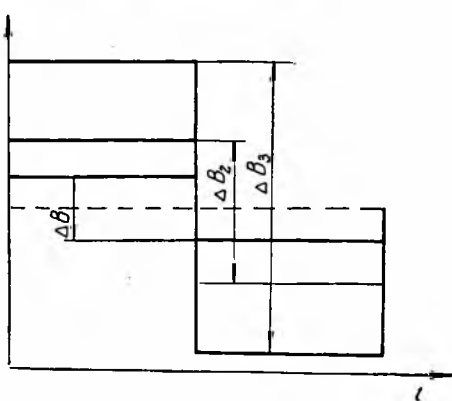


Рис. 2.

амплитудно-частотной характеристикой этой системы. Действительно, $R(\omega)$ — зависимость отношения амплитуд выходного и входного сигналов от частоты мельканий входного.

Известно, что не каждая функция может служить амплитудно-частотной характеристикой физически осуществимой динамической системы [6]. Условие физической осуществимости системы с заданной амплитудно-частотной характеристикой имеет вид

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\ln R(\omega)|}{1 + \omega^2} d\omega < \infty. \quad (13)$$

Проверка условия (13) для (12) дает отрицательный результат, т. е.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|ke^{-\beta|\omega|}|}{1 + \omega^2} d\omega \text{ расходится.}$$

Это значит, что принципиально не может быть построена система, имеющая амплитудно-частотную характеристику (12). Но модель (1) предполагает существование такой системы и сама является ее описанием.

2. Дальнейшее исследование линейной модели (1) проводилось для сдвинутых относительно друг друга во времени мельканий яркости (диаграмма на рис. 3). Был проведен следующий эксперимент. На два поля сравнения подавались зрительные картины (рис. 3). При частотах 15 гц и выше наблюдатель отмечал равенство ощущений полей сравнения, мелькания на обоих полях сравнения ощущались как синфазные и с одинаковой амплитудой. Критические частоты мельканий также совпадали. Если модель объясняет полученные результаты экспериментов, то реакции модели на зрительные картины, которые математически могут быть записаны.

$$\begin{aligned} B_1(t) &= B \sin \omega t + B_{cp}, \\ B_2(t) &= B \sin \omega t + \varphi + B_{cp}; \end{aligned} \quad (14)$$

должны совпадать.

Для определенности $\varphi = \frac{\pi}{2}$. Тогда реакции модели запишутся в виде

$$\begin{aligned} S_1(t) &= \int_{-\infty}^t B \sin \omega \tau e^{\frac{t-\tau}{a}} d\tau + \int_{-\infty}^t B_{cp} e^{\frac{t-\tau}{a}} d\tau; \\ S_2(t) &= \int_{-\infty}^t B \sin \left(\omega \tau + \frac{\pi}{2} \right) e^{\frac{t-\tau}{a}} d\tau + \int_{-\infty}^t B_{cp} e^{\frac{t-\tau}{a}} d\tau. \end{aligned} \quad (15)$$

После интегрирования получим

$$\begin{aligned} S_1(t) &= B \left(\sin \omega t \frac{a}{1 + a^2 \omega^2} - \cos \omega t \frac{a^2 \omega}{1 + a^2 \omega^2} \right) + B_{cp} a; \\ S_2(t) &= B \left(\cos \omega t \frac{a}{1 + a^2 \omega^2} + \sin \omega t \frac{a^2 \omega}{1 + a^2 \omega^2} \right) + B_{cp} a. \end{aligned}$$

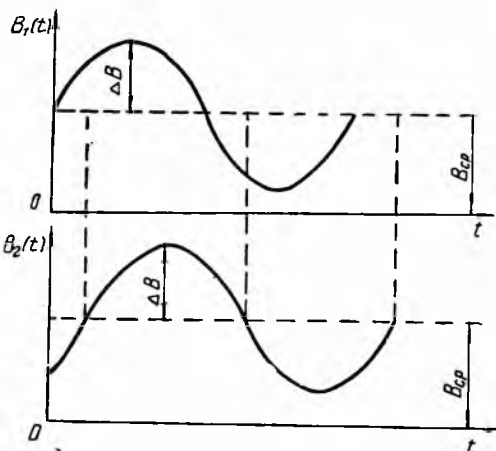


Рис. 3.

Можно показать, что в один и тот же момент времени зрительные ощущения $S_1(t)$ и $S_2(t)$ не совпадают.

Действительно, при $t = -\frac{1}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{1}{a\omega} + \pi$

$$S_1(t) = S_{1\max} = \frac{2Ba}{\sqrt{1+a^2\omega^2}} + B_{\text{ср}}a; \quad (16)$$

$$S_2(t) = B_{\text{ср}}a.$$

Можно также показать, что при сдвиге любой из гармоник, которые составляют сложный сигнал при разложении его в ряд Фурье, реакция модели (2) не остается неизменной при докритических частотах.

3. В [3] выведены условия равенства критических частот для мельканий произвольной формы (рассматривались только периодические мелькания яркости) как следствие из модели (2).

Эти условия для прямоугольных мельканий яркости имеют вид

$$\lambda'(1-\lambda')\Delta B' = \lambda''(1-\lambda'')\Delta B'', \quad (17)$$

а для мельканий произвольной формы —

$$\begin{aligned} \max_{t \leftarrow T} \int_{t \leftarrow T}^t B'(\tau) e^{\frac{\tau}{a}} d\tau - \min_{t \leftarrow T} \int_{t \leftarrow T}^t B'(\tau) e^{\frac{\tau}{a}} d\tau = \max_{t \leftarrow T} \int_{t \leftarrow T}^t B'(\tau) e^{\frac{\tau}{a}} d\tau - \\ - \min_{t \leftarrow T} \int_{t \leftarrow T}^t B''(\tau) e^{\frac{\tau}{a}} d\tau, \end{aligned} \quad (18)$$

если средние яркости сравниваемых зрительных картин одинаковы.

Экспериментальная проверка условий (17) и (18) показала, что критические частоты действительно очень близки, а разность частот не превышает 3 гц, если параметры мельканий связаны между собой по формулам (17) или (18).

Для выяснения точного условия равенства критических частот был поставлен следующий эксперимент. Наблюдателю предъявлялись два поля сравнения, на одном из которых формировались прямоугольные мелькания яркости, на другом — синусоидальные с тем же периодом. Амплитуды синусоидальных мельканий менялись, в результате чего выделялась зона изменения амплитуды синусоидальных мельканий, при которой наблюдалось равенство критических частот мельканий (зона нечувствительности).

Оказывалось, что в центре зоны нечувствительности лежат точки, соответствующие такой амплитуде синусоидальных мельканий, которая равна амплитуде первой гармоники прямоугольных мельканий яркости, а точки, соответствующие амплитудам, вычисленным по формуле (17), — на ее границе. Факт равенства критических частот мельканий при

$$\Delta B_{\text{np}} = \Delta B_{\sin} \frac{\pi}{2 \sin \pi \lambda},$$

где ΔB_{np} — амплитуда прямоугольных мельканий;

$\Delta B_{\sin}$ — амплитуда первой гармоники [7].

Так как амплитуда первой гармоники прямоугольных мельканий яркости $\Delta B_{\sin} = 2\Delta B_{\text{np}} \frac{\sin \pi \lambda}{\pi}$, то условие равенства критических частот для прямоугольных мельканий яркости может быть записано следующим образом:

$$2\Delta B'_{\text{np}} \frac{\sin \pi \lambda'}{\pi} = 2\Delta B''_{\text{np}} \frac{\sin \pi \lambda''}{\pi}, \quad (19)$$

где λ — скважность мельканий.

Средние яркости для обоих прямоугольных мельканий одинаковы. Из условия (17) вытекает, что

$$\frac{\Delta B'}{\Delta B''} = \frac{\lambda''(1-\lambda'')}{\lambda'(1-\lambda')} ; \quad (20)$$

из условия (19) —

$$\frac{\Delta B'}{\Delta B''} = \frac{\sin \pi \lambda''}{\sin \pi \lambda'} . \quad (21)$$

Сравнивая (20) и (21) (рис. 4), замечаем, что хотя условия равенства критических частот мельканий и близки друг к другу, но точно не совпадают. Рис. 4 построен для $\lambda^1 = \frac{1}{2}$. Сплошная линия соответствует формуле (20), крестики — формуле (21).

ВЫВОДЫ

1. Модель Аллара—Луизова (2) хорошо согласуется с экспериментальными данными при исследовании реакции зрительного анализатора на одиночные вспышки яркости [1].

2. Модель (2) объясняет некоторые зависимости при исследовании реакции зрительного анализатора на периодические мелькания яркости [3, 5].

3. Модель (1) не может объяснить закон Портера—Айвса, подтвержденный экспериментом.

4. Реакции моделей (1), (2) не соответствуют результатам экспериментов при исследовании влияния сдвига фаз гармоник входного сигнала.

5. Полученные из модели (2) условия равенства критических частот для периодических мельканий яркости не совсем точны.

Следовательно, линейная модель инерции зрения не может объяснить всех экспериментальных фактов, наблюдавшихся при исследовании восприятия периодических мельканий яркости.

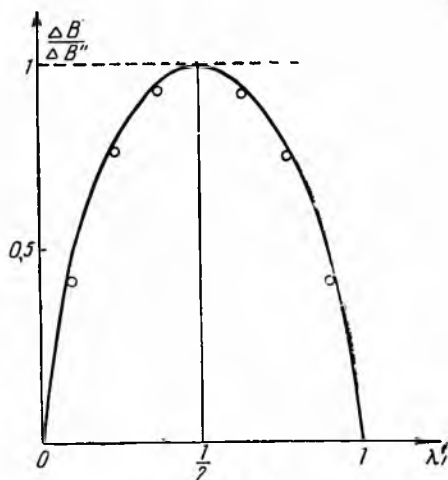


Рис. 4.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Луизов. Инерция зрения. Оборонгиз, 1961.
2. М. Е. Allard. Memoire sur l'intensité et la portée des phares. Paris. 1876.
3. Ю. П. Шабанов-Кушнаренок, Е. Г. Качко. Исследование реакций модели Аллара—Луизова на периодические мелькания яркости. Сб. «Проблемы бионики», вып. 4. Изд-во ХГУ, Харьков, 1970.
4. H. E. Ives. A Theory of Intermittent Vision. JOSA, 4, 6. (1922).
5. D. H. Kelly. Vision Responses to Time Dependent Stimuli. JOSA, 7, 51 (1961).
6. В. В. Солодовников. Техническая кибернетика. Изд-во «Машиностроение», 1967.
7. H de Lange D3n. Research into the Dynamic Nature of the Human Fovea. JOSA, 11, 48(1958).

К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ ЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНДУКТИВНЫХ СВОЙСТВ ЗРЕНИЯ

В. Я. Сердюченко, А. А. Галькевич

Необходимость изучения индуктивных свойств органа зрения человека объясняется поисками новых путей сокращения количества информации, перерабатываемой в различных информационных системах, функционирующих в контакте с человеком.

В [1, 2] предложены математические модели и методы исследования анализатора, представляющего собой частный случай индукции зрения. Проверка эвристических моделей осуществлялась с помощью дисков Максвелла. Но наряду с известными достоинствами этому методу свойственны и недостатки, основными из которых являются:

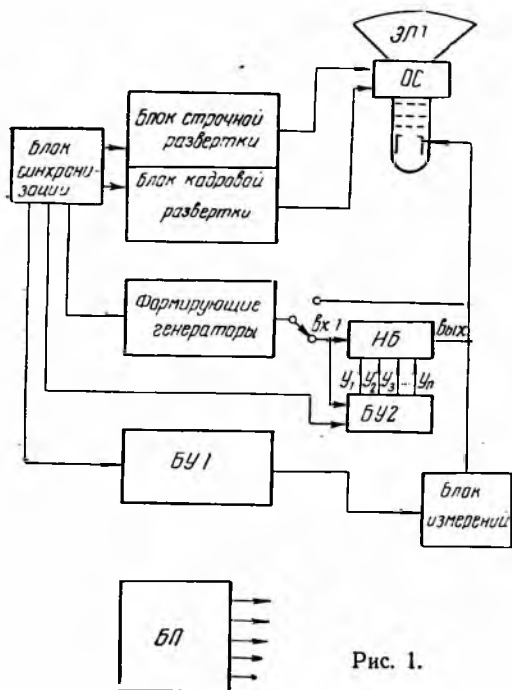


Рис. 1.

- 1) невозможность получения двумерных зрительных картин;
- 2) малый предел изменения яркости в сторону ее повышения;
- 3) сложность измерения яркостей отдельных участков изображений;
- 4) сложная подготовка опыта, требующая большого количества громоздких вычислений, что, в свою очередь, вносит дополнительные погрешности.

Известно, что индуктивные свойства зрения играют основную роль при выделении глазом контуров изображения. Тщательные исследования показали, что механизм краевого контраста зрения, ответственный за подчеркивание перепадов яркостей, осуществляет автоматическую регулировку интенсивности этого подчеркивания. При малых различиях яркостей двух полей интенсивность наибольшая, при больших — наименьшая. Целесообразность такой регулировки очевидна, поэтому необходимо знать ее характер и учитывать при создании систем, выделяющих контуры изображения. Зависимость интенсивности подчеркивания границы от соотношения яркостей отдельных участков изображения особенно важна для телевизионных систем. Поэтому желательно установить такую зависимость при анализе глазом телеизображения. В связи с этим возникла необходимость создания электронного устройства, позволяющего формировать необходимые зрительные картины на экране электронно-лучевой трубки. С помощью электронного устройства должны осуществляться следующие операции:

- 1) решение прямой задачи краевого контраста для одномерных и двумерных зрительных картин;

рые реализуются стандартными блоками, применяемыми в аналоговой технике. Известно, что эти блоки работают лишь на низких частотах, поэтому с их помощью можно изменять яркость зрительной картины единственно в одном направлении, т. е. они позволяют проверять только одномерную модель контраста. В этом случае сигнал типа «скачок яркости» (рис. 3, а) с блока формирующих генераторов (рис. 1) поступает на блок формирования (рис. 2), который преобразует сигнал с учетом величины скачка яркости. Далее сигнал непосредственно или через линии задержки с регулируемым временем задержки следует на блоки реализации функций типа e^x . Время задержки, а также постоянные времени блоков степенных функций зависят от вида входного сигнала и автоматически устанавливаются управляющим сигналом с блока БУ. С выходов этих блоков сигналы поступают на клапан.

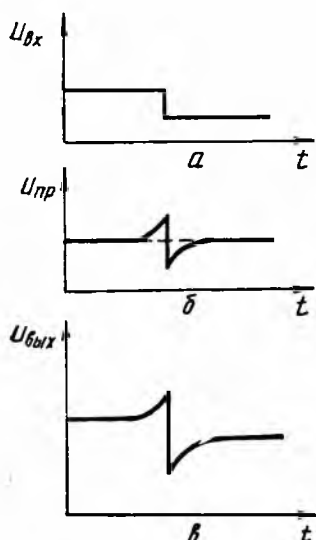


Рис. 3.

При решении прямой задачи краевого контраста комбинация управляющих сигналов y_1, y_2, y_0 (рис. 2) такая, что на выходе клапана получается контур (рис. 3, б), который после суммирования с основным сигналом дает на выходе нелинейного блока сигнал с подчеркнутым контуром (рис. 3, в).

Работа нелинейного блока в режиме «обратной задачи» краевого контраста отличается от режима «прямой задачи» только комбинацией управляющих сигналов y_1, y_2, y_0 .

Работа электронного устройства в режиме «индукция» упрощается, так как при этом для формирования зрительных картин необходимы только генераторы прямоугольных сигналов. Частным случаем индукции зрения является посветление серого объекта на темном фоне и потемнение того же объекта на более ярком фоне. Определенный интерес представляют количественные характеристики положительной и отрицательной индукции, которые могут быть получены в психофизическом эксперименте. При этом на половине экрана ЭЛТ (рис. 1) формируются простые фигуры (полосы, квадраты) разной величины и регулируемой яркости на фоне, яркость которого также изменяется. Вторая половина экрана служит полем сравнения. Важным достоинством электронного устройства является возможность регулировки яркости этих полей в больших пределах.

При исследовании явления последовательного светлотного контраста в устройстве предусмотрена возможность быстрой смены изображения объекта фоном равномерной яркости.

Во время медицинских исследований органа зрения на экране ЭЛТ с помощью блока формирующих генераторов создаются жолосы регулируемой ширины и контрастности, неподвижные или движущиеся с необходимой скоростью.

Таким образом, предлагаемое электронное устройство позволяет формировать большую часть зрительных картин, необходимых при исследовании индукции зрения. Данное устройство может найти применение в светотехнике, телевидении, медицине и для психофизических исследований органа зрения человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Шабанов-Кушнаренок, В. Я. Сердюченко. К вопросу

моделирования явления краевого контраста зрения. Сб. «Проблемы бионики», вып. 2. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969.

2. А. Г. Мурашко, В. Я. Сердюченко. Линеаризованная модель краевого контраста зрения. Сб. «Проблемы бионики», вып. 3. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969.

ОБРАЗ И ПРИЗНАКИ В ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ

Е. Н. Мясникова

Несмотря на большое количество работ, посвященных определению понятия образа и вопросам выбора признаков при автоматическом распознавании образов, до сих пор не установлено количественное определение образа и его признаков.

В настоящей работе намечен путь к такому определению. Для пояснения приведем сначала два примера из акустики.

Пусть имеется колеблющаяся на звуковых (или ультразвуковых) частотах пластинка; изменяя условия возбуждения колебаний, можно получить различные колебательные моды, каждая из которых характеризуется картиной распределения амплитуд или фаз по поверхности пластинки. К числу наблюдаемых картин относятся и известные фигуры Хладни. Эти картины можно принять за образы колебаний пластинки. Математически они находятся путем решения уравнения

$$H\Psi = E\Psi \quad (1)$$

при соответствующих граничных условиях.

Здесь H — оператор;

E — собственное значение оператора;

Ψ — собственная функция, принадлежащая этому значению.

Определение Ψ позволяет получить образ, т. е. картину распределения амплитуд. На этом основании колебательный образ можно найти через собственную функцию, принадлежащую оператору, а признаки — через собственные значения оператора.

В качестве другого примера приведем орган речи или его механическую модель. Такая модель представляет собой трубу с определенным законом изменения площади сечения вдоль ее длины, причем при переходе от одного звука речи к другому закон изменения сечения меняется, чем и достигается артикуляция.

Не будем останавливаться на деталях процесса возбуждения звука в такой трубе. Заметим только, что определенные вариации сечения приводят к возникновению формант, характеризующих фонемы (гласные).

В этой задаче акустическим образом следует считать создаваемые фонемы (а также сочетания фонем, слова и т. д.). Каждая фонема соответствует определенному состоянию модели органа речи. Состояния, которые несут образы, описываются, как и в предыдущем примере, с помощью собственных функций. Уравнение для собственных функций и собственных значений следующее:

$$H\Psi = E\Psi.$$

Здесь H — линейный оператор (он, конечно, иной, нежели в случае колебания пластинки);

E — его собственное значение, причем набор собственных значений оператора образует спектр;

Ψ — собственная функция этого оператора.

Как показано в [1], это уравнение может быть приведено к уравнению Вебстера; кроме того, возможно получить формантные параметры, характеризующие различные гласные звуки. Таким образом, и здесь акустический образ определяется собственной функцией, а его признаки — собственными значениями операторов, дающими частотно-амплитудный спектр звука речи.

Перейдем теперь к общей формулировке понятия образа и признаков. Состояние системы, создающей образ, описывается вектором в бесконечномерном комплексном пространстве Гильберта. Изменение состояния вызывается действием операторов, которым соответствуют физические величины.

Построим некоторый набор линейных операторов, коммутирующих между собой. Для каждого оператора α_i могут быть найдены собственные значения α'_i , собственный вектор $|\alpha_i\rangle$ удовлетворяет уравнению

$$\alpha_i |\alpha'_i\rangle = \alpha'_i |\alpha'_i\rangle.$$

Можно составить полный набор собственных векторов $|\alpha'_i\rangle$ и с его помощью получить представление произвольного вектора состояния как ряд «проекций» на направление этих векторов. Тогда произвольный вектор может быть выражен как функция собственных значений вышеуказанных операторов $\Psi(\alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3 \dots)$.

Собственные значения операторов, примененных для базиса, составляют название признаков в теории распознавания образов. Ψ -функция имеет физический смысл амплитуды вероятности этих признаков. Квадрат модуля этой функции $|\Psi(\alpha'_1, \alpha'_2 \dots)|^2$ выражает плотность вероятности существования признаков, указанных в аргументе.

Функцию Ψ можно рассматривать как сигнал. В распознающей системе происходит ее разложение по собственным функциям

$$\Psi = a_1 \Psi(\alpha'_1) + a_2 \Psi(\alpha'_2) + a_3 \Psi(\alpha'_3) + \dots$$

Здесь a_1, a_2, a_3 — весовые коэффициенты;

$\Psi(\alpha'_i)$ — ортонормированные собственные функции некоторого набора операторов, использующиеся для выбора признаков (частот, амплитуд, временных изменений частоты и т. д.).

В частном случае сигнал строго соответствует образу. Тогда Ψ удовлетворяет уравнению

$$\alpha \Psi = \alpha' \Psi,$$

т. е. с точностью до множителя, который не существует, а Ψ совпадает с некоторым $\Psi(\alpha'_k)$. Тогда набор собственных значений операторов α'_k составляет набор признаков образа. Образ выражается как собственная функция набора операторов, собственные значения которых являются признаками образа.

Важно отметить, что набор признаков должен соответствовать набору коммутирующих операторов. Отсюда следует, что выбор признаков ограничен. В иерархических ступенях автоматического распознавания используемые в одной ступени признаки должны относиться к коммутирующим между собой операторам, например, к спектральным частотам и амплитудам. Разумеется, в разных ступенях могут быть использованы некоммутирующие операторы.

Опишем теперь процесс распознавания фонемы, пользуясь вышеприведенной моделью голосового тракта. Пусть голосовой тракт имеет

некоторое состояние, которое описывается функцией Ψ . Излучаемое звуковое поле переносит эту функцию, подвергая ее некоторым несущественным преобразованиям, как сигнал, поступающий затем на приемную систему.

Приемное устройство осуществляет процесс, который с общетеоретической точки зрения может быть назван «рассеянием». Здесь происходит разложение Ψ по некоторому набору собственных функций, а каких именно — это зависит от задачи. Любое распознающее устройство должно оперировать некоторой системой собственных функций и набором признаков. Если последние неизвестны, может использоваться обучение приемной системы. Во время действия приемной системы могут быть найдены или сам искомый образ (если Ψ окажется одной из собственных функций), или функция распределения вероятности того, что данные признаки соответствуют некоторому образу. Последний случай наиболее типичен для процедур распознавания.

В заключение обратимся к такой задаче автоматического распознавания, когда образ не может быть описан с помощью непрерывной функции. Сюда относится большинство образов искусственного происхождения, например, печатные буквы, рукописные знаки и т. д. В акустике тоже встречаются такие образы — например, видеограммы звука речи или характерного шума, спектрограммы, получаемые посредством оптиковолоконного анализатора, ультразвуковые изображения, построенные в электронно-лучевом ультразвуковом преобразователе С. Я. Соколова.

В этих случаях вся вышеизложенная схема сохраняется, если обобщить понятия оператора и Ψ -функции. Оператор H надо толковать как некоторую систему алгоритмов, следующих определенной схеме действия; Ψ -функцию — как слово, представляющее некоторую реализацию из элементов отвечающего случаю словаря в соответствии с необходимой грамматикой. Действие алгоритмов, которые считаются нормализуемыми, сводится в конечном счете к ряду подстановок и замене одних элементов другими. Так строятся любые структуры. Если удовлетворяется обобщенное уравнение

$$H\Psi = E\Psi,$$

это означает, что действие алгоритмов, связанных с построением образа, не изменяет реализации, так как данная реализация оказывается образом. В случае плоских изображений (рукописных букв, видеограмм звуков и т. п.) Ψ -функция выражается матрицей. Матричные элементы дают «картину», оператор выражается схемой алгоритмов, означающих предписания вида [2]

$$a[i, k] \rightarrow b[i, k].$$

Такое предписание оказывается излишним, если относится к образу, уже показанному на таблице, и тогда картина остается неизменной.

Аналогичные выводы могут быть сделаны для трехмерных (на объемных решетках) и многомерных образов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Н. Мясникова. Объективное распознавание звуков речи. Изд-во «Энергия», 1967.
2. Е. Н. Мясникова. Конструктивная теория распознавания звукоотчетов. Труды IV Всесоюзной школы-семинара АРСО, Киев, 1969, 165.

К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДАННЫХ ПАТОЛОГИИ ВКУСОВОГО АНАЛИЗАТОРА ДЛЯ МАШИННОЙ ДИАГНОСТИКИ

Ю. С. Марченко

Расстройство вкуса — частый симптом ряда заболеваний человека, обуславливающих возникновение дальнейших существенных расстройств организма. Точное знание свойств «среднего» вкусового анализатора и патологии органа вкуса может сыграть немаловажную роль в правильной постановке диагноза.

Опыты по смешению различных вкусовых веществ, произведенные в лаборатории П. П. Лазарева [1], свидетельствуют о том, что оценки веществ отдельными испытуемыми мало различаются между собой. Произведенные эксперименты убедили в возможности найти вкусовые свойства «среднего» вкусового анализатора и основать на них среднюю, свободную от индивидуальных особенностей оценку вкусового действия вещества. Дальнейшие исследования [2] показали, что пороги вкусовых ощущений многих лиц оказываются одинаковыми при достаточно развитой остроте вкуса, а поэтому можно говорить о стандартных вкусовых порогах, подобных стандартным зрительным и слуховым порогам.

Результаты экспериментов, проведенных в лаборатории объективных методов определения вкусовых и ароматических свойств пищевых продуктов [3], позволяют сделать следующие выводы.

1. У практически здоровых людей существует одинаковое ощущение вкуса горького, сладкого, кислого и соленого в зависимости от концентрации вкусоносителя. Определение этого факта делает возможным создание единой шкалы вкусовых ощущений.

2. Установленная некоторая средняя характеристика вкусовых свойств человека позволяет говорить о вкусе не только как об ощущениях, но и как о техническом понятии, определения которого базируются на сходстве восприятий громадного большинства нормальных испытуемых.

3. Если у обследуемого наблюдается отклонение от нормы, то это свидетельствует о крайне выраженных индивидуальных особенностях либо о наличии болезни, когда объективные симптомы еще не уловимы, а вкусовые ощущения уже могут быть изменены. Такая ранняя диагностика заставит провести более обстоятельное обследование.

Потеря вкуса, или агевзия, наблюдается при различных болезненных состояниях; чаще всего встречается понижение вкусовой чувствительности — гипогевзия. Нередко наблюдаются случаи извращения вкуса (парагевзия).

В клинику часто обращаются больные, у которых отмечается изменение вкусовых ощущений. При обследовании обнаруживается, что большинство из них страдает заболеваниями желудочно-кишечного тракта (колит, гастрит, заболевания печени, хронический аппендицит и т. д.). Данные исследования состояния вкусового анализатора [4, 5] могут служить дополнительным методом обследования больных при диагностике заболеваний желудка.

К болезненным процессам, несомненно влияющим на вкусовое восприятие, относится всякое изменение обмена веществ. Установлено [6], что при туберкулезных поражениях легких, верхних дыхательных путей и языка почти всегда обнаруживалось расстройство вкусовой чувствительности. В некоторых случаях при одностороннем туберкулезном поражении наблюдалась асимметрия вкуса, т. е. вкусовое ощущение при

раздражении одной половины языка протекало иначе, чем при раздражении другой.

Расстройство вкусовой рецепции при туберкулезе имеет фазный характер и может охватить различные вкусовые (горькое, сладкое, кислое, соленое) системы. Чаще всего поражаются вкусовые системы, связанные с восприятием горького и сладкого. Изменения в течении туберкулезного процесса в сторону улучшения или ухудшения обычно сопровождаются изменением порогов вкусовой рецепции.

В [7, 8] изучались свойства сосудистых реакций у женщин с нормальной и патологической беременностью. Регистрация сосудистых реакций производилась с помощью водно-воздушного плетизмографа системы Новицкого, дающего возможность объективно оценить состояние вкусовой рецепции. Исследования с применением внешних раздражителей позволили выявить особенности сосудистой реакции у женщин с легкими формами токсикоза в сравнении с реакцией испытуемых, у которых беременность протекала нормально. Характеристика сосудистых реакций в различные сроки нормально протекающей беременности может служить фоном, образцом, с которым позволительно сравнивать сосудистые реакции обследуемой при подозрении на различные нарушения беременности.

Изменение вкусовой чувствительности отмечается также при многих других заболеваниях. При диабете наблюдается снижение чувствительности к сладкому. При глаукоме [9], как правило, наблюдается сильное повышение порога ощущения горького, немного повышается порог кислого и соленого. Порог ощущения сладкого остается нормальным или понижается.

Многие инфекционные заболевания сопровождаются искажением вкусовых ощущений. Во время заболевания дизентерией наблюдается извращение вкуса, потеря аппетита. Для изучения состояния вкусового анализатора при дизентерии пользовались методом плетизмографии [10].

Реакция на применение 10%-ного раствора глюкозы выражается в сосудосуживающем эффекте, который становится интенсивнее по мере увеличения концентрации глюкозы; у здоровых на применение глюкозы отмечается сосудорасширяющий эффект.

Исследовалась динамика вкусовой рецепции у больных скарлатиной [11]. Обнаружено повышение порога рецепции, в первую очередь для кислого, а затем для сладкого и соленого. Отмечено значительное удлинение латентного периода. Часто наблюдалось извращение вкусовой рецепции.

У страдающих болезнью Боткина имеет место потеря аппетита вплоть до полного отвращения к пище, ощущение неприятного горького вкуса во рту, а зачастую и извращение вкуса. Проведены наблюдения [12, 13] за изменением вкусовой чувствительности у страдающих острой и хронической формой болезни Боткина.

Исследовалась вкусовая чувствительность у больных раком [14]. Наиболее характерным в этом случае является снижение вкусовой чувствительности к горькому. По отношению к сладкому раздражителю было отмечено менее выраженное, но отчетливое снижение вкусовой чувствительности. Наблюдалась тенденция к притуплению остроты ощущения и к соленому.

Нарушения функции вкусового анализатора у больных с развившимися в результате травмы абсцессами мозга исследованы в [15]. Поскольку мозговые абсцессы протекают в достаточной мере скрыто, полученные данные могут быть использованы для ранней диагностики

мозговых заболеваний. Обнаружено, что повышение порогов на кислое, соленое, сладкое и горькое имело прямую связь с тяжелым травматическим осложнением — абсцессом мозга. Вкусовые пороги закономерно повышались до операционного вмешательства, а после эвакуации абсцесса всегда характерно понижались.

При поражении тройничного нерва (невритах и невралгиях) пороги вкуса на кислое, соленое, сладкое и горькое повышены на стороне поражения. На противоположной половине языка пороги вкуса на все раздражители не меняются.

В литературе освещено состояние вкусовой чувствительности при опухоли головного мозга с различной локализацией процесса [16, 17], проведено исследование вкуса в дифференциальной диагностике опухолей восьмой пары нервов [18].

Ранняя диагностика опухолей восьмой пары нервов имеет большое практическое значение, поскольку единственным способом лечения здесь является операционное вмешательство. Наиболее благоприятна для операции вторая стадия заболевания. В этот период удается не только сохранить жизнь больному, но и вернуть его к трудовой деятельности. Однако опухоль тяжело распознается в данной стадии. Начальными симптомами опухоли восьмой пары нервов обычно бывают шум в ухе, нарушения слуха и иногда головокружение. Поэтому вторую стадию опухоли трудно отличить от обычных заболеваний уха. Многочисленные попытки использования для этой цели различных методов исследования уха и вестибулярной функции не увенчались успехом. Подобные больные длительное время наблюдаются отоларингологами.

Нарушение вкуса довольно часто является дополнительным симптомом опухоли восьмой пары нервов. Вкус нарушается на передних $\frac{2}{3}$ или на половине языка, соответствующей опухоли. В поздние стадии заболевания вкусовые ощущения иногда нарушались по всему языку, но на стороне языка, соответствующей опухоли, изменения вкуса всегда были выражены более резко.

Динамическое исследование вкуса после удаления опухоли может указывать на осложненное течение послеоперационного периода. При резких стволовых нарушениях вкус после операции ухудшается.

Особо обращают на себя внимание нарушения в деятельности вкусового анализатора при заболеваниях нервной системы.

У больных шизофренией наблюдаются признаки, прямо или косвенно указывающие на вовлечение в болезненный процесс вкусового анализатора. Заявления больных о том, что со времени заболевания пища стала безвкусной, неприятной, или жалобы на притупление вкуса весьма часты. Вкусовые иллюзии и галлюцинации очень характерны именно для шизофрении. Об этом говорят данные исследований вкусовой чувствительности у больных шизофренией с распределением этих больных по клиническим формам болезни [19, 20]. Для больных шизофренией характерно явление так называемого «парадоксального вкуса», выражающееся в неправильной оценке концентрации растворов. Больные верно определяют вкус слабых растворов, при усилении же концентрации вкусового вещества оценивают их как менее концентрированные, а иногда даже неправильно определяют качество раздражителя.

У больных эпилепсией [21] имеет место повышение порогов, диссоциация вкуса, вкусовые извращения. Функция вкусового анализатора страдает при любой локализации патологического процесса, но наиболее ярко выраженные изменения вкуса наблюдаются при локализации процесса в теменной области, поражение которой сопровождается «пере-

крестным эффектом» — асимметрией. При этом чувствительность снижается на стороне, противоположной очагу.

Понятие диагностики включает в себя сбор диагностической информации (результаты анализов, исследований, жалобы больного), анализ диагностических данных и, наконец, постановку диагноза. Диагноз, в свою очередь, — тоже информация, необходимая для правильного выбора лечения. Можно сказать, что диагностика — это типичный кибернетический процесс, связанный со сбором, передачей, хранением и переработкой информации.

Считают, что диагностический процесс строится интуитивно. Однако после соответствующего анализа довольно подробно можно зафиксировать всю последовательность рассуждений врача при постановке диагноза, т. е. описать «диагностический алгоритм».

Итак, данные расстройств вкусового анализатора при различных заболеваниях могут иметь диагностическое значение для установления ранних форм заболевания и прогностическое — для определения дальнейшего развития болезни после соответствующей обработки и классификации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. П. Барышева. О синтезе вкусовых ощущений. Ж. прикл. физ., 1925, 2, 247.
2. Е. П. Барышева. Определение порога ощущения вкуса у человека. Арх. биол. наук, 1935, 40, вып. 3, 139.
3. Разработка шкал восприятия вкуса простых основных вкусоносителей. Тбил. филиал ВНИИМ. Научно-техн. отчет по теме № 02031205. Тбилиси, 1968.
4. А. Н. Демченко. Состояние вкусового анализатора при некоторых заболеваниях желудка. «Сов. медицина», 1961, № 9.
5. С. М. Будылина. Вкусовая чувствительность при язвенной болезни. Сб. «Теория и практика стоматологии», вып. II. Моск. мед. стомат. ин-т, 1967.
6. С. А. Харитонов, Е. Я. Раппеорт, А. Г. Филатова. Состояние вкусовой рецепции при туберкулезе дыхательных путей и языка. Архив биол. наук, 1939, т. 54, вып. 3.
7. Н. М. Суворова. Изменение свойств сосудистой реакции в зависимости от срока беременности в ответ на вкусовые раздражения. Автореф. канд. дисс., Л., 1961.
8. Е. А. Беляева. О состоянии вкуса и осязания в различные сроки беременности. Труды Кишиневского гос. мед. ин-та, т. VI, 1957.
9. С. Я. Рудзит. Об изменениях вкусовых ощущений при глаукоме. Науч. сессия, посв. памяти проф. Буртниека, Рига, 1959.
10. З. Ф. Шамаева. К вопросу о вкусовой рецепции у больных дизентерией. Областная научн. конф. врачей, Куйбышев, 1955.
11. А. Г. Нихинсон. Вкусовая рецепция при скарлатине. «Вестник оториноларингологии», 1956, № 3.
12. М. Е. Семендяева, Хан Ден Хо. Изменение вкусовой чувствительности при болезни Боткина. «Врачебное дело», 1956, № 11.
13. О. Г. Невраева. Изменение вкусовой чувствительности при болезни Боткина и циррозах печени. «Сов. медицина», 1959, № 6.
14. И. Т. Абасов. Изменение вкусовой чувствительности у больных раком. «Сов. медицина», 1961, № 9.
15. С. Д. Ролле. Нарушения функции вкусового анализатора при травмах черепа. Автореф. канд. дисс., М., 1953.
16. А. П. Король. О нарушении обонятельного и вкусового анализаторов при опухолях головного мозга. Науч. конф. молодых ученых. Тезисы докл., Киев, 1956.
17. А. М. Шварц. Состояние вкусового анализатора при некоторых органических заболеваниях головного мозга. I. Труды Второй Павловской конф., Томск, 1952. II. Труды Третьей Павловской конф., 1953.
18. И. Я. Яковлева. Диагностическое значение исследования вкуса при опухолях восьмой пары нервов. Автореф. канд. дисс., М., 1957.
19. Е. А. Щербина. Нарушения вкусовой чувствительности у больных шизофренией. Ж. невропатологии и психиатрии, т. LXVII, вып. 9, 1967.
20. Е. А. Щербина. Нарушения порогов чувствительности и адаптации вкусового анализатора у больных шизофренией. Сб. «Вопр. клиники, патофизиологии и лечения психических заболеваний», Луганск, 1963.

21. Л. М. Шутова. Состояние вкусового и обонятельного анализаторов у больных симптоматической эпилепсией. Труды Сев.-Осетинского мед. ин-та, вып. XII, 1964.

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ОПОЗНАВАТЕЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ НА ПАМЯТЬ

И. М. Мельник, П. Б. Невельский

Исследования опознания показали, что для каждого знака в зависимости от длины алфавита, в который он входит, и информационного содержания знака можно найти некоторое оптимальное число опознавательных признаков [1, 2].

Задача настоящего исследования заключалась в определении зависимости воспроизведения от числа опознавательных признаков. Эксперименты проводились в условиях равного числа символов, равной длины алфавита этих символов, равного количества информации, приходящейся на один символ и всю последовательность, равной внутренней избыточности сложного символа, но разного числа опознавательных признаков, присущих этим символам.

Методика

Материал. Первый вариант. Экспериментальным материалом выступали случайные последовательности из десяти трехбуквенных бессмысленных слогов (согласная — гласная — согласная). Были подобраны два алфавита слогов, равных по степени внутренней избыточности, но различающихся числом опознавательных признаков внутри каждого слога алфавита. Длина алфавита — 8 слогов, т. е. 3 дв. ед. на каждый сложный символ. Под внутренней избыточностью будет пониматься избыточность [3] опознавательных признаков или элементов, составляющих сложный символ.

Первый алфавит отличался тем, что варьировалась только первая согласная буква слога (первые восемь согласных букв русского алфавита БВГДЖЗКЛ), остальные две буквы слога не изменялись, были полностью избыточны и не содержали никакой информации. Все 3 дв. ед. информации приходились на первую букву слога, а избыточность составляла 67%.

Во втором алфавите варьировались все три буквы слога и отбирались из восьми возможных, но разных букв. На первом месте появлялись буквы БВГДЗКЛ, на втором — АЕИОУЭЮЯ, на третьем — МНПРСТФХ. Каждый слог содержал 3 дв. ед. информации; каждая буква слога (если брать ее независимо от других букв) тоже содержала 3 дв. ед.; но если одна из трех букв слога опознавалась и становилась известной, тогда две другие буквы однозначно восстанавливались, не содержали никакой информации и были полностью избыточны. Избыточность также составляла 67%.

По всем информационным показателям первый и второй алфавиты были равны. Различались они только тем, что каждый слог первого алфавита имел один опознавательный признак, а каждый слог второго алфавита — три и мог быть идентифицирован по любому из них, т. е. по любой из трех букв этого слога.

Материал. Второй вариант. Сложными символами являлись трехзначные числа. Информационные характеристики, структура цифровых

алфавитов и предъявляемого материала не отличались от первого варианта. Алфавиты 1 и 2 соответствовали алфавитам 3 и 4.

В третьем алфавите варьировались только сотни 12345678, а десятки и единицы оставались неизменными (3; 5). Таким образом, первый (буквенный) и третий (цифровой) алфавиты были идентичны, варьировались только признаки первого знакоместа каждого сложного символа, а второе и третье не изменялись, были полностью избыточны и не содержали никакой информации.

В четвертом алфавите, как и во втором, варьировались все три отличительных признака. На первом месте появлялись сотни 12345678, на втором — десятки 23456789, на третьем — единицы 34567891. Однако появление их не было независимым, каждая цифра на каждом знакоместе однозначно определяла две другие, т. е. любой из трех опознавательных признаков был достаточным для полной идентификации этого сложного символа. Значит, при опознании одного из трех признаков два других становились полностью избыточными и не содержали никакой новой информации, если сам алфавит был заранее известен (табл. 1).

Таблица 1

Алфавиты			
Избыточность 67%			
Один отличительный признак, 3 дв. ед.		Три отличительных признака, 1 дв. ед.	
Слоги	Числа	Слоги	Числа
1	3	2	4
БИН	135	БАМ	123
ВИН	235	ВЕН	234
ГИН	335	ГИП	345
ДИН	435	ДОР	456
ЖИН	535	ЖУС	567
ЗИН	635	ЗЭТ	678
КИН	735	КЮФ	789
ЛИН	835	ЛЯХ	891

Таким образом, предъявляемым материалом являлись последовательности из десяти слогов или десяти трехзначных чисел (табл. 2).

Таблица 2

Образцы экспериментального материала

1	ЗИН	БИН	ДИН	ЗИН	ДИН	ЖИН	КИН	ГИН	ДИН	БИН
	ВИН	КИН	ДИН	ЖИН	БИН	ГИН	КИН	ДИН	КИН	ЛИН
	ЗИН	БИН	ДИН	ЗИН	БИН	ЖИН	КИН	ДИН	КИН	БИН
2	ЗЭТ	ЛЯХ	ЖУС	ГИП	КЮФ	ЖУС	ДОР	ДОР	ЛЯХ	ГИП
	БАМ	ЛЯХ	КЮФ	ДОР	КЮФ	ВЕН	ДОР	ЛЯХ	ДОР	БАМ
	КЮФ	ГИП	ЖУС	КЮФ	ДОР	БАМ	КЮФ	ДОР	ЛЯХ	ЗЭТ
3	735	735	435	535	635	235	635	235	535	135
	135	735	535	435	635	635	535	435	835	235
	435	235	535	335	235	235	835	135	735	735
4	789	123	678	345	678	234	234	891	345	345
	891	678	678	123	567	567	234	456	345	891
	567	567	123	891	678	678	678	123	123	789

Эти знаки печатались четким машинописным шрифтом в единственном экземпляре. Символы располагались в одну строку с интервалом между ними в три пробела. Всего было заготовлено 100 последовательностей для четырех алфавитов, чтобы один и тот же запоминаемый материал не предъявлялся дважды тому же испытуемому.

Испытуемые. В опытах участвовало 14 студентов Харьковского университета.

Процедура. Перед началом эксперимента в течение 10 дней испытуемые заучивали алфавиты и изучали структуру символов до полного усвоения всех четырех алфавитов. В соответствии с четырьмя алфавитами проводилось по четыре серии опытов. Они чередовались в порядке, установленном по таблице случайных чисел. С каждым испытуемым было проведено по 10 опытов в каждом алфавите, т. е. всего 560. Перед началом опыта каждому испытуемому предъявлялся листок с экспериментальным материалом, перевернутый так, чтобы испытуемый не видел, что на нем напечатано. Прежде чем начать первый опыт, экспериментатор давал испытуемым следующую инструкцию:

«Вы получите последовательность из десяти бессмысленных слогов или трехзначных чисел, отобранных из известных вам алфавитов. Их нужно прочитать и запомнить в том же порядке. На это задание дается 20 сек. Опыт начинается и заканчивается по моей команде. Сразу же после окончания запоминания вы должны перевернуть листки и в протоколе записать то, что запомнили. На месте забытых знаков ставьте прочерки».

Время воспроизведения не ограничивалось, однако не превышало 1 мин. Результаты воспроизведения проверялись самими испытуемыми. С этой целью над каждым пропущенным или ошибочным знаком ставился тот, который был на входе. Ответы записывались карандашами, а надписи делались чернилами для того, чтобы отличить воспроизведение от корректуры.

Результаты и обсуждение

Измерялось число правильно воспроизведенных сложных символов, число ошибок с поправкой на вероятность случайного угадывания [4]. Подсчитывались критерии полноты K_p , точности K_t и надежности воспроизведения K_n (П. Н.):

$$K_p = \frac{П - \frac{Ш}{A-1}}{C}. \quad (1)$$

$$K_t = \frac{П - \frac{Ш}{A-1}}{П + Ш}; \quad (2)$$

$$K_n = \frac{П - \frac{Ш}{A-1}}{СП + Ш}; \quad (3)$$

где $П$ и $Ш$ — наблюдаемое число правильных ответов и ошибок;
 A — длина алфавита;
 C — число символов на входе.

Таблица 3

Результаты воспроизведения сложных символов с разным числом опознавательных признаков

Показатели воспроизведения	Алфавиты слогов		Алфавиты чисел	
	1	2	3	4
Правильные ответы	8,11	7,84	7,99	7,31
Ошибки	1,82	2,05	1,94	2,55
Критерий точности	0,81	0,78	0,80	0,73
Критерий полноты	0,82	0,79	0,81	0,74
Критерий надежности	0,66	0,62	0,64	0,54

Как видно из табл. 3, результаты воспроизведения символов, содержащих разное количество опознавательных признаков, оказались примерно на одном уровне. Очень мало различаются критерии полноты, точности и надежности воспроизведения этих символов. Если для опознавания символов существует какое-то оптимальное число опознавательных признаков, то полученные результаты свидетельствуют о том, что число опознавательных признаков не оказывает значительного влияния на запоминание сложных символов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Ф. Ломов. Человек и техника (очерки инженерной психологии). Изд-во «Сов. радио», 1966.
2. М. К. Тутушкина. Экспериментальное исследование системы знаков. Сб. «Проблемы инженерной психологии», вып. 2. Изд. Об-ва психологов, Л., 1965.
3. П. Фресс. Неопределенность раздражителя и неопределенность реакции. «Вопросы психологии», 1966, № 4.
4. К. Шеннон. Математическая теория связи. В кн.: К. Шеннон. «Работы по теории информации и кибернетике». Изд-во иностр. лит., 1963.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И ЗАПОМИНАНИЕ ИНФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ ЕЕ КРАТКОВРЕМЕННОГО ПРЕДЪЯВЛЕНИЯ

Г. К. Середа, Б. И. Снопик

Разработка и конструирование современных кибернетических устройств, математическое моделирование психических функций человека — таких, как зрение, слух, память и т. д., вызывают необходимость исследования соответствующих процессов в психологическом аспекте. Так, усовершенствование запоминающих устройств ЭВМ предполагает всестороннее экспериментальное изучение особенностей и закономерностей психологии памяти человека.

Цель настоящего экспериментального исследования — изучение некоторых аспектов кратковременной памяти человека, в частности, вопроса о том, как различные преобразования информации, связанные с решением познавательных задач различной степени сложности, влияют на объем слуховой кратковременной памяти и число правильных решений. Предполагалось, что объем кратковременной памяти будет испытывать большее (отрицательное) влияние таких преобразований информации, осуществление которых возможно *в процессе* предъявления, восприятия материала, чем преобразований, выполнение которых отодвигается на время и осуществляется *после* предъявления и восприятия информации.

С восемью испытуемыми (пять женщин и трое мужчин в возрасте 18—25 лет), студентами разных факультетов Харьковского университета, было проведено три серии индивидуальных опытов. В первой серии испытуемые только запоминали экспериментальный материал (ряды случайных цифр), во второй и третьей сериях выполняли различные преобразования материала, связанные с решением всевозможных познавательных задач, и одновременно запоминали предъявляемый материал. Преобразования информации заключались в том, что в первом случае необходимо было вычислить сумму чисел, во втором — определить, какие цифры и сколько раз повторялись, в третьем — какие цифры из исходного алфавита символов 0, 1, 2, 3, 4, 5 ... 9 отсутствовали в предъявленной последовательности. Вторая и третья серии отличались только порядком воспроизведения: во второй испытуемым необходимо

было сначала назвать результат решения, а затем воспроизвести цифры, в третьей — наоборот: сначала воспроизвести цифры, а потом назвать результат решения. В опытах варьировалась также длина последовательности символов, составляющая 7 и 10 цифр, и скорость предъявления информации, составляющая 1 и 4 *симв/сек* (символ в секунду). Ряды цифр, зачитанные и записанные на магнитофон, предъявлялись испытуемым на слух. Каждый опыт с отдельным испытуемым повторялся трижды, а затем вычислялось среднеарифметическое значение для данного испытуемого. Средний показатель для всех испытуемых вычислялся соответственно на основании 24 наблюдений. Всего по вышеописанной методике с указанным количеством испытуемых было проведено 674 опыта. Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась по *t*-критерию Стьюдента.

На основании наблюдений во время опытов и самоотчета испытуемых можно считать, что при скорости предъявления информации 1 *симв/сек* если не все, то значительная часть вызываемых условиями опыта преобразований информации осуществляется в процессе предъявления последней; при скорости же предъявления 4 *симв/сек* различные преобразования в процессе предъявления практически невозможны: испытуемому нужно сначала сохранить всю предъявленную информацию, а затем осуществить необходимые преобразования и дать ответ.

Ниже приводится сводная таблица показателей в среднем для всех испытуемых по трем сериям опытов (объем памяти и число правильных ответов приводятся в процентах).

Задача Длина последовательности и скорость предъявления		Сумма		Повторяющиеся цифры		Отсутствующие цифры		Первая серия
		Объем памяти	Число правильных ответов	Объем памяти	Число правильных ответов	Объем памяти	Число правильных ответов	Объем памяти
7—1 <i>симв/сек</i>	Вторая серия	84	46	92	88	89	67	96
	Третья серия	87	33	97	71	94	67	
7—4 <i>симв/сек</i>	Вторая серия	88	46	99	71	84	58	95
	Третья серия	99	63	97	88	97	67	
10—1 <i>симв/сек</i>	Вторая серия	58	15	61	43	62	45	75
	Третья серия	71	21	70	29	75	58	
10—4 <i>симв/сек</i>	Вторая серия	56	4	70	27	65	48	80
	Третья серия	75	4	77	4	75	27	

Данные таблицы свидетельствуют о том, что объем воспроизведения не зависит от различных преобразований информации, если длина предъявляемой последовательности не превышает объема кратковременной памяти и испытуемому дается *мнемическая инструкция*; объем не зависит также от времени предъявления информации (в описываемых условиях) и статистически не отличается от объема «чистого» запоминания (первая серия). Различные преобразования информации влияют на объем кратковременной памяти лишь в случае достаточно длинной последовательности и большой скорости предъявления информации. Количество правильных решений уменьшается, если увеличи-

вается длина последовательности и скорость предъявления информации. Объем воспроизведения менее чувствителен к каким-либо преобразованиям информации, чем число правильных решений. Объем памяти изменяется в пределах от 56 до 99%, в то время как число правильных решений колеблется в пределах от 4 до 88%. Это, возможно, свидетельствует о том, что число правильных решений является более чувствительным индикатором процессов кратковременной памяти, чем традиционно измеряемый объем ее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Миллер. Магическое число семь плюс или минус два. О некоторых пределах нашей способности перерабатывать информацию. Сб. «Инженерная психология». Изд-во «Прогресс», 1964.
2. В. П. Зинченко, Г. Г. Вучетич. Определение времени преобразования информации в кратковременной памяти. Сб. «Об актуальных проблемах экспериментального исследования времени реагирования», Тарту, 1969.
3. Г. К. Середя, Б. И. Снопик. Слуховая кратковременная память в условиях совмещения познавательных и мнемических задач. Вестник Харьковского университета, сер. психологическая, № 32. Проблемы психологии памяти и обучения. Изд-во ХГУ, 1970.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВИБРАЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАТОЛОГИИ ВИБРАЦИОННОГО АНАЛИЗАТОРА

А. Г. Мурашко, В. В. Тищенко

В нашей стране и за рубежом большое внимание уделяется исследованиям биологического направления, находящим различное применение в науке и технике. Многие работы посвящены изучению психической деятельности человека, а также выяснению алгоритмов, лежащих в основе функционирования биологических систем, преобразующих ту или иную информацию, поступающую извне на сенсорные входы. Проблема анализа переработки информации биологическими системами актуальна в связи с широким внедрением вычислительных, информационных, логических и управляющих систем, а также машин, обслуживающих сферу физического и умственного труда человека.

Поэтому изучение законов преобразования информации в сенсорных органах человека приобретает особый интерес. Широко освещаются успехи психологических исследований и моделирования зрительного, слухового, вкусового, термического, вибрационного анализаторов в технике, медицине и т. д. [1—5].

Данная работа посвящена обсуждению возможности использования математических моделей вибрационного анализатора для исследования вопросов его патологии, часто выступающей предвестником тяжелых заболеваний человеческого организма.

История исследования вибрационного анализатора, самого древнего представителя контактных анализаторов, началась сравнительно недавно.

Вибрационная чувствительность кожи — наиболее древний вид ощущений — долгое время физиологически не выделялась в самостоятельный вид и причислялась к тактильной, костной и другим видам чувствительности. Только в 1900 году физиологу Д. С. Двойченко уда-

лось выделить вибрационную чувствительность в самостоятельный вид и предложить термин «вибрационная» [6].

В 1904—1914 годах Минору и Трейтелю удалось установить, что у больных спинной сухоткой отсутствует параллелизм между нарушениями вибрационного чувства и другими видами чувствительности. Они подтвердили этот факт тем, что нарушение вибрационной чувствительности обнаруживалось у больного задолго до появления нарушений других видов чувствительности. В 1920 году Франк в результате множества клинических наблюдений установил, что одновременное выпадение и восстановление вибрационной и тактильной чувствительностей не является обязательным. В 1922 году Виллиамсон отмечал потерю вибрационного чувства при сохранении прочих видов чувствительности у больных диабетом и хронической глюкозурией. В 1942 году Е. Ц. Андреева-Галанина у страдающих травматическими повреждениями периферических нервов отмечала более раннее восстановление тактильной чувствительности и более позднее восстановление вибрационной.

Было установлено, что отдельные участки тела обладают различной чувствительностью к давлению и вибрации, т. е. вибрационная чувствительность не тождественна тактильной, и это подтверждается топографическим распределением вибрационной чувствительности.

Исследования Голта (1937), Вернера Лекле (1950), Вожжова (1952) [7] подтвердили, что рецепторы вибрационной чувствительности, в основном, заложены в коже и, как можно предполагать, в процессе развития организма кожный покров, как и орган слуха, образовался из эктодермы. Не исключено, что в кожном покрове сохранились образования, воспринимающие колебания путем непосредственного контакта с ним.

Таким образом, патология вибрационного анализатора, вызванная органическими заболеваниями человека, позволила установить факт существования вибрационного анализатора как самостоятельного, равноправного анализатора сенсорной системы человека. Кроме того, несмотря на свое древнейшее происхождение, природа вибрационного анализатора очень мало изучена, а поэтому проведение исследований необходимо как с точки зрения физиологии и медицины для ранней диагностики, так и с точки зрения техники для создания помехозащищенных информационных систем, свободных от акустических помех, и приборов, способных расширить возможности систем, воспринимающих зрительную и слуховую информацию. Исследования вибрационной чувствительности требуют тщательной подготовки эксперимента и тренировки испытуемого, а также выбора места, времени, возраста испытуемого, локализации восприятия информации зрительным и слуховым анализаторами.

Не все участки кожи воспринимают информацию одинаково [8]. При раздражении кожной поверхности дистальных отделов конечностей ощущение приобретает качественную окраску, в то время как при раздражении кожи лица оно становится неопределенным, теряет тональность.

Если вибрационный раздражитель отличается малой интенсивностью, возникающее ощущение пространственно ограничено. При более высокой интенсивности раздражителя оно приобретает генерализованный характер.

Под влиянием раздражителей холода порог вибрационной чувствительности понижается. Могильницкий [9] доказал, что слуховой анализатор оказывает тормозящее действие на вибрационное чувство, и на-

оборот, если выключаются зрение и слух, вибрационная чувствительность обостряется. При полном отсутствии слуха вибрационное ощущение находилось в пределах 16—1500 гц (по данным Руссо). Больной без ошибки определял высоту звука в пределах полутона в интервале 25 и 488 гц. У слепоглухонемых (Школовский, 1939) вибрационная чувствительность связывается со сложной интерпретацией вибрационных ощущений.

В этом случае вибрация, очевидно, воспринимается как совокупность компонент осязательного восприятия речи и произносимого слова, осознаваясь и опосредствуясь в речевых общении и мышлении.

В тактильно-вибрационном восприятии речи выделяются и осознаются не только ее фонетические компоненты, но и индивидуальные качества речи [10]. В 1947 году Скороходова подробно описала восприятие музыки с помощью ощущения вибрации, передающейся от инструмента и пола. Очень низкий уровень порога вибрационных ощущений при хорошем зрении и слухе отмечается, главным образом, у больных истерией и реактивными неврозами [8].

Таким образом, наблюдается сложное взаимодействие вибрационного анализатора с другими анализаторами и их взаимное влияние. Ему, как и другим анализаторам, присущи патология и обострение чувствительности в определенных условиях.

Поэтому построение математической модели преобразования информации вибрационным анализатором, представляющим собой саморегулирующуюся систему с обратными связями, является очень важной и сложной задачей.

Цель данной работы — исследование кожного анализатора естественными вибрационными раздражениями, к которым причисляются периодические движения материальной кожи или тела, различные по амплитуде, форме и повторяемые неопределенное число раз [8].

Исследовался наиболее чувствительный участок кожи — дистальные конечности указательного пальца. При этом учитывались основные характеристики вибрационного анализатора — различительная чувствительность и дифференциальный порог различения [11—12], а также то, что порог вибрационного ощущения является функцией многих параметров

$$I = \varphi(f, A, \tau, t^{\circ}, \dots p),$$

где f — частота вибраций;

A — амплитуда вибраций;

τ — время воздействия;

t° — температура среды;

p — давление на участке тела и т. д.

Заметим, что богатый опытный материал, накопленный многими науками, занимающимися изучением и анализом сферы психической деятельности человека, используется крайне слабо. Это объясняется трудностями систематизации результатов исследований из-за наблюдающейся порой противоречивости выводов при изучении одного и того же явления, а также из-за того, что психология, невропатология, физиология, педагогика и другие в большинстве своем являются чисто описательными науками, поэтому из них трудно извлечь количественные результаты. Однако при изучении того или иного явления все же удается получить некоторую важную информацию, особенно при правильной постановке экспериментов. Поэтому для построения математической модели необходимо проверить справедливость психофизических соотношений для вибрационного анализатора. При этом вибрационную чувствительность удобно рассматривать как систему, где единственным

регистрирующим и анализирующим прибором является сознание человека.

Такую систему исследуют в физиологической целостности от входа до выхода, поэтому в дальнейшем вибрационный анализатор будет рассматриваться как кибернетическое устройство, обрабатывающее информацию. Входными сигналами такого устройства являются вибрационные раздражения, выходными — вибрационные ощущения. Задача моделирования вибрационного анализатора состоит в том, чтобы установить и математически описать закон преобразования вибрационного раздражения I (назовем его входной картиной) в вибрационное ощущение T (выходной образ), т. е. $T = f(I)$. Для решения ее выполняется ряд подготовительных работ: изучаются необходимый и достаточный наборы входных картин, способы их формирования и налаживаются установки для точного измерения параметров входных сигналов; разрабатывается методика оценки и обработки результатов.

Далее проводится сравнение действительных реакций вибрационного анализатора и реакций сформулированной математической модели для определения достоверности модели и уточнения справедливости исходных предпосылок, а также с целью извлечения дополнительной информации, дающей право на введение корректив в первоначальную гипотезу о механизме преобразования информации в вибрационном анализаторе. Опыты проверки реакций математической модели на различные типы входных сигналов осуществляются на аналоговых и цифровых вычислительных машинах, с помощью которых реализуются математические модели.

Эксперименты с участием человека проводятся на опытной экспериментальной установке, основными элементами которой являются электромагнитный датчик вибраций, широкополосный усилитель, блок управления и корректур, многофункциональный генератор, измерительная аппаратура и т. д. Установка способна формировать сигналы синусоидальной, прямоугольной и других форм в диапазоне частот 5—10 000 гц [15].

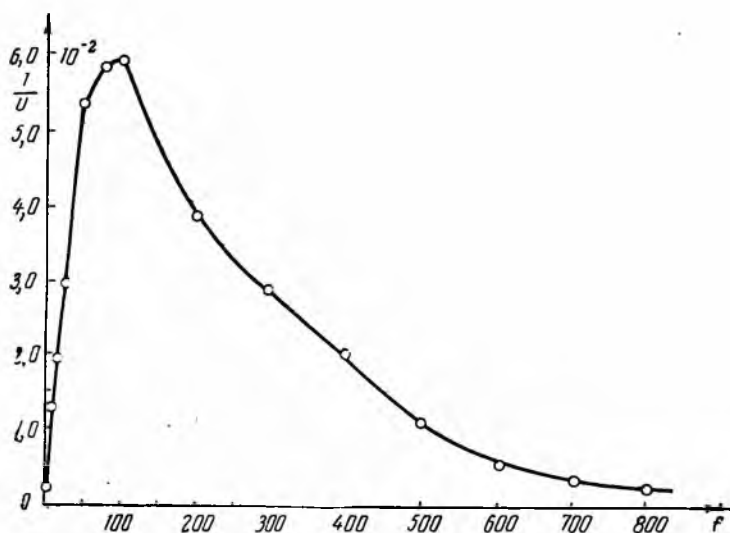
В основу методики экспериментов положены нуль-метод, принцип дихотомии, «шаг за шагом» и другие, суть которых освещена в [14, 15].

Кроме общей методики исследования, авторы стремились найти общие и различительные свойства в переработке информации между хорошо изученными зрительными, слуховыми и вибрационными анализаторами. На основе изложенной методики и предпосылок авторы провели ряд экспериментов по выяснению компонентного состава переработанной информации. Под компонентой вибрационного сигнала (вектора-сигнала) подразумеваются величины, определяющие такие параметры периодической функции-сигнала, которые являются основными носителями информации, — амплитуда, частота, фаза, форма колебаний и т. д. [16], полученные в результате разложения периодической функции в ряд Фурье.

Опыты проводились с помощью экспериментальной установки, на которой формировался сложный вибрационный сигнал определенного спектра. Испытуемый воспринимал этот сигнал при помощи фаланги пальцев на электромагнитном вибраторе. Вначале в качестве входного сигнала использовался амплитудно-модулированный сигнал, спектр которого определялся как

$$U(t) = U_0 [1 + m \sin \Omega t + \varphi_1] \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{m}{2} U_0 \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0 - \varphi_1] - \frac{m}{2} U_0 \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0 + \varphi_1],$$

где ω_0 — частота модулируемого сигнала;
 φ_0 — фаза модулируемого сигнала;
 U_0 — амплитуда модулированного сигнала;
 m — глубина модуляции;
 Ω — частота модулирующего сигнала;
 φ_1 — фаза модулирующего сигнала;
 U_1 — амплитуда модулирующего сигнала.



При амплитудной модуляции спектр такого сигнала состоит из основного тона и двух обертонов, отстоящих от основного тона на величину частоты модулирующего сигнала [17]. В этом случае фазовые соотношения сигнала были постоянны. В условиях эксперимента выдерживались соотношения $\omega_0 > \Omega$. Опыт заключался в следующем. На фалангу пальцев одной руки подавался модулированный сигнал, а на палец второй руки — чистый тон синусоидального сигнала. Испытуемый посредством чистого тона старался подобрать сигнал, оцениваемый как одинаковый с модулируемым сигналом. При этом проводились замеры амплитуды и частоты чистого тона, которые по необходимости регулировались.

Результаты экспериментов с десятью испытуемыми фиксировались в протоколах. Опыты показали, что вибрационный анализатор выделяет из спектра сигнал только той амплитуды и частоты, который попадает в область наибольшей чувствительности. При этом выделялась лишь одна гармоника спектра, амплитуда и частота которой совпадали с расчетной с точностью до 1,5%. Данные опыта приведены в таблице и на рисунке.

Как видно из таблицы, опытные данные можно разделить на три части.

1. В первой части опыта анализатор выделял обертоном разностной частоты, причем замеры производились по пороговой величине амплитуды ощущаемого сигнала.

2. Во второй части опыта кожный анализатор выделял основной тон сигнала.

3. В третьей части опыта анализатор выделял обертоном суммарной частоты.

Графа «Не ощущалось» может быть заполнена с увеличением мощности сигнала.

Номер опыта	$\frac{1}{2\pi} \omega_0$ гц	$\frac{1}{2\pi} \Omega$ гц	U_0 мв	Расчетные данные			Опытные данные		
				$\alpha - \frac{\omega_0}{2\pi}$	$-\frac{\omega_0}{2\pi}$	$\alpha + \frac{\omega_0}{2\pi}$	$f, гц$	$U_m, мв$	$-\frac{1}{U_m}$
1	1000	100	1000	900	1000	1100	Не ощущалось		
	1000	200	750	800	1000	1200	810	382	0,0026
	1000	300	600	700	1000	1300	705	303	0,0032
	1000	400	400	600	1000	1400	604	195	0,0051
	1000	500	190	500	1000	1500	502	97	0,0059
	1000	600	90	400	1000	1600	400	45	0,0222
	1000	700	70	300	1000	1700	298	34	0,0295
	1000	800	50	200	1000	1800	201	26	0,0385
	1000	900	35	100	1000	1900	100	17	0,059
	1000	1000	1000	0	1000	2000	Биения		—
2	100	40	20	60	100	140	100	18	0,055
	70	20	20	50	70	90	70	17	0,059
	50	20	20	30	50	70	50	19	0,053
	30	10	30	20	30	40	30	28	0,035
	10	5	50	5	10	15	10	51	0,0195
	5	5	1000	0	5	10	Биения		—
	5	1	75	4	5	6	5	73	0,0135
3	0,8	0,1	1000	0,7	0,8	0,9	—	—	—
	0,8	0,2	900	0,6	0,8	1,0	1,0	551	0,0018
	0,8	0,7	700	0,1	0,8	1,5	1,6	336	—
	0,8	0,8	1000	0	0,8	1,6	Биения		—

Графы «Биения» не давали четких и ясных ощущений в определении частоты и амплитуды сигнала. В дальнейшем под биениями будем понимать интерференционное явление, смысл которого — в периодическом изменении амплитуды фазы и частоты результирующего колебания, состоящего из двух простых синусоидальных колебаний с неравными частотами.

В связи с этим полезно провести дополнительные опыты для выяснения того, в каких пределах изменение фазовых соотношений влияет на восприятие амплитуды и частоты. Эксперимент показывает, что вибрационный анализатор ведет себя как настроенный резонатор. При этом четко фиксируются частота и амплитуда сигнала, величина которого превышает порог ощущения. Квазипостоянная разность фаз сигнала не влияет на качественную величину ощущения. Зависимость $\varphi = \frac{1}{U(f)}$, полученная в результате опыта, по своему характеру совпадает с пороговой кривой анализатора.

Цель второго эксперимента — определение спектральной полосы анализатора и влияния фазы на качественную оценку информации.

Опыт проводился по той же методике, но входным сигналом было избрано бигармоническое колебание, спектр которого определяется как

$$U(t) = U_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + U_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2).$$

При $\omega_2 > \omega_0$ общая амплитуда сигнала имеет вид

$$U_m = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos[(\omega_2 - \omega_1)t + \varphi_2 - \varphi_1]}.$$

а фаза —

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{U_1 \sin \varphi_1 + U_2 \sin \varphi_2}{U_1 \cos \varphi_1 + U_2 \cos \varphi_2} \approx \text{const.}$$

Эксперимент показал, что ощущения определялись только амплитудой и частотой основного тока. Основным тоном считалось гармоническое колебание, амплитуда которого больше. При этом фазовые соотношения не влияли на качество ощущения. Если амплитуды слагаемых колебаний были равны, испытуемые определяли ощущения по результирующей амплитуде, а частоту — как среднюю частоту колебания, т. е. при $U_1 = U_2$ тон постоянной средней частоты и амплитуда определялись равными $2U$.

Вторая половина опыта проводилась для случая, когда частота одного из слагаемых колебаний незначительно отличается от другого (биения). Для таких колебаний

$$U(t) = U_1 \cos(\omega t + \varphi) \text{ и } U(t) = U_2 \cos(\omega + \Delta\omega)t,$$

а суммарное колебание

$$U(t) = U_0 \cos(\omega t + \psi),$$

где

$$U_0 = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\Delta\omega t - \varphi)},$$

$$\Psi = \operatorname{arctg} \frac{U_1 \sin \varphi + U_2 \sin \Delta\omega t}{U_1 \cos \varphi + U_2 \cos \Delta\omega t},$$

т. е. амплитуда U_0 и фазовый угол φ не постоянны, а периодически изменяются во времени. Частота колебания

$$\Omega = \frac{d}{dt}(\omega t + \psi) = \omega + \delta\omega$$

в общем случае зависит от скорости изменения фазы

$$\delta\omega = \frac{d\psi}{dt} = \frac{U_2^2 + U_1U_2 \cos(\Delta\omega t - \varphi)}{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\Delta\omega t - \varphi)} \Delta\omega.$$

Таким образом, скорость изменения фазы влияет на количество вершин результирующего колебания [16]. Опыты с различным соотношением амплитуд, частот и фаз в спектре показали, что испытуемые при $\Delta\omega \ll \omega$ ощущали частоту колебаний той гармоникой, амплитуда которой выше. Для случая $\Delta\omega \approx \omega$ испытуемые отчетливо могли выделить два типа колебаний: гармонику колебания, амплитуда которой наибольшая, и низкочастотную составляющую спектра, которая определялась скоростью изменения фазы.

Как показали расчеты, если $\frac{d\psi}{dt} > 1$ гц/сек, то низкочастотная составляющая спектра ощущалась. Эти факты свидетельствуют о том, что кожный анализатор помимо амплитудно-частотного спектра воспринимает изменение фазы, которая ощущается как низкочастотное изменение амплитуды суммарного сигнала.

В связи с этим возникла необходимость проведения новых экспериментов определения влияния фазы на кожные ощущения. Методика опытов оставалась прежней, но испытуемые сравнивали два сигнала, состоящие из сумм двух гармоник, причем соответствующие гармоники обоих сигналов имели одинаковую амплитуду и частоту. Изменением фазы достигалось абсолютное равенство обоих сигналов. Испытуемые фиксировали субъективное равенство сигналов при любом соотношении

фаз. Вторая часть опыта проводилась при абсолютном равенстве амплитуды частот всех гармоник суммарного сигнала, изменялась только фаза одного из сигналов. Это вызывало качественное субъективное неравенство сигналов, особенно ощущавшееся при разности фаз $\frac{\pi}{2}$ и более. Такие же ощущения испытываемые наблюдали и при соотношении амплитуд $\frac{U_2}{U_1} = 0,7$ и более в суммарном сигнале, когда постановка опыта была аналогичной.

Итак, результаты опытов показали следующее:

1) вибрационный анализатор — хороший временной (частотный) анализатор, не зависящий от квазипостоянного изменения фазы;

2) чувство вибраций однокомпонентно и связано с выделением основного тона интенсивности вибраций, где $I(t)$ — зависящая переменная, а $f(t)$ — независимая переменная.

Однокомпонентность чувства вибраций находится в определенном соотношении информационных составляющих входного сигнала: $\frac{U_2}{U_1} < 0,7$ при $f_1 = f_2$ и $\frac{d\psi}{dt} < 1$ рад/сек. Указанные границы, определяющие этот диапазон характеристик входного сигнала, назовем линейным диапазоном.

На основании этих данных проводились более сложные эксперименты, которые дали возможность получить математические модели вибрационного анализатора: модель адаптации вибрационного анализатора, модель инерции вибрационного анализатора, модель однородных вибрационных ощущений и т. д. [18—19].

Можно полагать, что модели переработки информации, отражающие функционирование кожного анализатора, будут полезны при определении патологии вибрационного анализатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Стивенс. Экспериментальная психология. Изд-во иностр. лит., 1963.
2. Сб. «Теория связи в сенсорных системах». Изд-во «Мир», 1964.
3. Ю. А. Макаренко. Органы чувств и автоматы. Изд-во «Знание», 1966.
4. Ю. П. Шабанов-Кушнаренок. О задаче математического моделирования зрения человека. Сб. «Проблемы бионики», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1968.
5. Bekesy. Synchronism of nerve discharges and their demultiplication in pitch perception on the skin and hearing. J. Acoust. Soc. Amer., 1959, № 31.
6. Д. С. Двойченко. К вопросу о костной чувствительности. «Медицинское обозрение», 1900, № 54.
7. А. И. Вожжова. Вибрационная чувствительность в профпатологии. Труды ВММА, 1952, № 41.
8. Е. Ц. Андреева-Галанина. Вибрация и ее значение в гигиене труда. Медгиз, 1956.
9. М. С. Могилянский. Влияние вибрационных раздражителей на звуковую травму. Сб. трудов, посв. проф. Левинц, М., 1935.
10. Л. И. Переслени. Исследование восприятия речи через кожный анализатор. «Спец. школа», 1967, № 3.
11. Использование кожи в качестве канала передачи информации оператору. «Бионика вчера и сегодня (по материалам зарубежной печати)». Изд-во «Знание», 1967.
12. М. Ф. Ломов. Человек и техника. Изд-во «Сов. радио», 1966.
13. А. Г. Мурашко, В. В. Тищенко. Разработка прибора для исследования тактильной чувствительности человека. Труды II Всесоюзного традиционного научно-техн. семинара, М., 1968.
14. Г. Ф. Дюбко. Математическая модель статического преобразования интенсивности звука и громкости. Сб. «Проблемы бионики», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1968.
15. Ю. П. Шабанов-Кушнаренок, Г. Ф. Дюбко. Моделирование статической адаптации слуха. «Биофизика», 1968, № 4.
16. Ю. И. Иорис. Виброметрия. Гостехиздат, 1963.

17. А. А. Харкевич. Спектры и анализ. Физматгиз, 1962.

18. Г. Ф. Дюбко, В. В. Тищенко. Экспериментальные исследования математической модели адаптации вибрационной чувствительности кожного анализатора. Труды семинара «Нейробионика», вып. 1. Киев, 1968.

19. Г. Ф. Дюбко, В. В. Тищенко. Математическая модель статического преобразования интенсивности вибраций в вибрационное ощущение. Сб. «Проблемы бионики», вып. 4. Изд-во ХГУ, Харьков, 1970.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СГЛАЖИВАЮЩИХ СВОЙСТВ ЗРЕНИЯ

Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, Е. Г. Качко

Математическая модель инерции и иррадиации зрения предложена в [1]. Понимая инерцию и иррадиацию зрения как фильтр, подавляющий избыток информации во времени и поле зрения, данную модель можно считать моделью сглаживающих свойств зрения.

Дифференциальная форма модели—

$$a \frac{\partial S}{\partial t} - b^2 \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + S = kB, \quad (1)$$

где $B(x, y, t)$ — яркость зрительной картины;

$S(x, y, t)$ — светлота зрительного ощущения.

Функции $B(x, y, t)$ и $S(x, y, t)$ определены и ограничены при любых значениях x, y, t .

Интегральная форма модели имеет вид

$$S(x, y, t) = \frac{k}{4\pi b^2} \int_{-\infty}^t \iint_{-\infty}^{\infty} B(\xi, \eta, \tau) \frac{e^{-\frac{t-\tau}{a}}}{t-\tau} e^{-\frac{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2}{t-\tau}} d\xi d\eta d\tau. \quad (2)$$

В частном случае, когда зрительная картина однородна и нестационарна, т. е. когда яркость $B = B(t)$ изменяется лишь во времени и не зависит от координат поля зрения, выражение (2) может быть записано в виде

$$S(t) = \frac{k}{a} \int_{-\infty}^t B(\tau) e^{-\frac{t-\tau}{a}} d\tau. \quad (3)$$

Это соотношение совпадает с формулой, предложенной Луизовым для описания инерции зрения [2].

В случае стационарной неоднородной зрительной картины, т. е. когда яркость $B(x, y)$ изменяется лишь в поле зрения и не меняется во времени,

$$S(x, y) = \frac{k}{2\pi b^2} \iint_{-\infty}^{\infty} B(\xi, \eta) k_0 \left(\frac{\sqrt{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2}}{t-\tau} \right) d\xi d\eta, \quad (4)$$

где k_0 — функция Макдональда с нулевым индексом.

Наконец, когда яркость зрительной картины зависит лишь от координаты x , формула (2) принимает вид

$$S(x) = \frac{k}{2b} \int_{-\infty}^{\infty} B(\xi) e^{-\frac{|\xi-x|}{b}} d\xi. \quad (5)$$

Известно, что зрение человека подчиняется психофизическому закону Тальбота [3]. Различают временной и пространственный законы Тальбота.

Предъявим наблюдателю на одном поле сравнения однородную зрительную картину, яркость которой $B_T(t)$ меняется во времени по произвольному периодическому закону

$$B_T(t) = B_T(t - nT), \quad (6)$$

где T — период колебания яркости; n — произвольное целое число. Если период T колебания яркости взять достаточно малым, то благодаря инерции зрения мелькания сольются и наблюдатель увидит немигающее поле.

На втором поле сравнения сформулируем однородную и стационарную зрительную картину, характеризующуюся яркостью B_0 . Согласно временному закону Тальбота, для получения одинаковых зрительных ощущений на полях сравнения необходимо уровень яркости B_0 на втором поле сравнения принять равным среднему значению мелькающей яркости $B_T(t)$, т. е.

$$B_0 = \frac{1}{T} \int_0^T B_T(t) dt, \quad (7)$$

где T_0 — некоторый произвольно выбранный фиксированный период мельканий.

Для демонстрации пространственного закона Тальбота на одном поле сравнения сформируем зрительную картину в виде вертикальных полос. Яркость $B_X(x)$ этой картины является периодической функцией координаты x

$$B_X(x) = B_X(x - nX), \quad (8)$$

где X — период колебания яркости. При достаточно густом расположении эти полосы благодаря иррадиации зрения сольются в однородный фон.

Согласно пространственному закону Тальбота, для достижения тождественности зрительных ощущений на другом поле сравнения необходимо сформировать стационарную и однородную зрительную картину, яркость B_0 которой должна быть равна среднему значению изменяющейся в поле зрения яркости $B_X(x)$, т. е.

$$B = \frac{1}{X_0} \int_0^{X_0} B_X(x) dx. \quad (9)$$

Модель сглаживающих свойств зрения удовлетворяет как временно-му, так и пространственному законам Тальбота.

Докажем сначала выводимость из модели временного закона Тальбота.

Найдем выражение для светлоты зрительного ощущения $S(t)$, порождаемой зрительной картиной, яркость которой $B_T(t)$ изменяется во времени по произвольному периодическому закону. Используя зависимость (3), имеем

$$S(t) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^t B_T(\tau) e^{-\frac{t-\tau}{a}} d\tau = \frac{1}{a} e^{-\frac{t}{a}} \sum_{n=0}^{\infty} \int_{t-(n+1)T}^{t-nT} B_T(\tau) e^{\frac{\tau}{a}} d\tau. \quad (10)$$

После ряда тождественных преобразований получим

$$S(t) = \frac{1}{a} e^{-\frac{t}{a}} \left(\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{nT}{a}} \right) \int_{t-T}^t B_T(\tau) e^{\frac{\tau}{a}} d\tau. \quad (11)$$

Определим сумму бесконечно убывающей геометрической прогрессии

$$\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{nT}{a}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{T}{a}}}. \quad (12)$$

Окончательно формула для определения светлоты в случае периодически изменяющейся во времени яркости запишется в виде

$$S(t) = \frac{k}{a} \cdot \frac{e^{-\frac{t}{a}}}{1 - e^{-\frac{T}{a}}} \int_{t-T}^t B_T(\tau) e^{\frac{\tau}{a}} d\tau. \quad (13)$$

Воспользовавшись обобщенной теоремой о среднем [4] и заменив

$$\int_{t-T}^t B_T(\tau) d\tau = \int_0^T B_T(\tau) d\tau,$$

получим

$$S(t) = \frac{k}{a} \cdot \frac{e^{-\frac{\theta(t)T}{a}}}{1 - e^{-\frac{T}{a}}} \int_0^T B_T(\tau) d\tau. \quad (14)$$

Обозначим через T_0 некоторый произвольно выбранный фиксированный период мельканий и определим, во что превратится функция $S(t)$ при неограниченном уменьшении периода мельканий T , равного $T = \varepsilon T_0$, т. е. при $\varepsilon \rightarrow 0$.

Предел, к которому стремится последовательность функций $S(t)$ при устремлении ε к нулю, обозначим через S_0 .

Из (14) следует

$$S_0 = \frac{k}{a} \int_0^{T_0} B_{T_0}(\tau) d\tau. \quad (15)$$

Зрительное ощущение такой же светлоты можно получить при наблюдении однородной и стационарной зрительной картины яркости B_0 , равной

$$B_0 = \frac{1}{k} S_0. \quad (16)$$

Объединяя равенства (15) и (16), приходим к формуле (6), что доказывает соответствие модели временной формулировке закона Тальбота.

Факт выводимости закона Тальбота из формулы (3) для прямоугольных мельканий был доказан Луизовым [2].

Выведем теперь из модели пространственный закон Тальбота.

Найдем выражение для светлоты зрительного ощущения $S(x)$, порождаемого зрительной картиной, яркость которой $B_X(x)$ изменяется в поле зрения вдоль оси абсцисс по произвольному периодическому закону.

Используя зависимость (5), имеем

$$S(x) = \frac{k}{2b} e^{-\frac{x}{b}} \sum_{n=0}^{\infty} \int_{x-(n+1)X}^{x-nX} B_X(\xi) e^{\frac{\xi}{b}} d\xi + \frac{k}{2b} e^{\frac{x}{b}} \sum_{n=0}^{\infty} \int_{x+nX}^{x+(n+1)X} B_X(\xi) e^{-\frac{\xi}{b}} d\xi. \quad (17)$$

Из (17) и (8) следует, что

$$S(x) = \frac{k}{2b} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\frac{X}{b}}} \int_{x-X}^x B_X(\xi) e^{-\frac{|\xi-x|}{b}} d\xi. \quad (18)$$

После применения обобщенной теоремы о среднем и использования равенств

$$\int_{x-X}^x B(\xi) d\xi = \int_0^X B(\xi) d\xi; \quad \int_x^{x+X} B(\xi) d\xi = \int_0^X B(\xi) d\xi \quad (19)$$

формулу для определения $S(x)$ запишем в виде

$$S(x) = \frac{k}{2b} \cdot \frac{e^{\frac{\chi_1(x)X}{b}} + e^{\frac{\chi_2(x)X}{b}}}{1 - e^{\frac{X}{b}}} \int_0^X B_X(\xi) d\xi, \quad (20)$$

где $\chi_1(x)$ и $\chi_2(x)$ — некоторые функции координаты x , принимающие значения на интервале $[0, 1]$.

Обозначим через X_0 некоторый произвольно выбранный период и определим, во что превратится функция $S(x)$ при неограниченном уменьшении периода X , равного

$$X = \mu X_0, \quad (21)$$

т. е. при $\mu \rightarrow 0$.

Предел, к которому стремится последовательность функций $S(x)$ при устремлении μ к нулю, обозначим через S_0 :

$$S_0 = \lim_{\mu \rightarrow 0} S(x). \quad (22)$$

Из формул (20) — (21) следует, что

$$S_0 = \frac{k}{X_0} \int_0^{X_0} B(\xi) d\xi. \quad (23)$$

С учетом (16) приходим к формуле (9).

Следовательно, модель сглаживающих свойств зрения (2) удовлетворяет также и пространственной формулировке закона Тальбота.

Теперь поставим перед собой цель построения такой модели сглаживающих свойств зрения, которая в логическом отношении была бы равносильна закону Тальбота. Эта задача сводится к отысканию такого оператора преобразования функции $B(x, y, t)$ в функцию $S(x, y, t)$, чтобы из закона Тальбота вытекала справедливость этого оператора, и наоборот. Ясно, что в результате решения этой задачи мы должны прийти либо к оператору (2), либо к некоторому более общему оператору, включающему оператор (2) как частный случай. Закон Тальбота свидетельствует о том, что некоторые существенно различные входные сигналы преобразуются органом зрения в одинаковые выходные сигналы. Выясним, возможно ли построить какие-либо другие, не предусмотренные законом Тальбота множества входных сигналов, преобразуемых глазом в одинаковые выходные сигналы. Оказывается, что данная выше формулировка закона Тальбота не исчерпывает всех возможностей. Необходимо так обобщить закон Тальбота, чтобы с его помощью для двух любых входных сигналов органа зрения возможно было установить тождественность или различие соответствующих им выходных сигналов.

Рассмотрим временную формулировку закона Тальбота. Остановимся более подробно на входных сигналах органа зрения $B(t)$. Функции $B(t)$ удобно считать заданными на всей оси времени $(-\infty, \infty)$, поскольку инерционные процессы зрения весьма кратковременны и протекают в течение долей секунды, что несомненно со сроком существования глаза.

На любом конечном отрезке времени $[t_1, t_2]$ функции $B(t)$ локально суммируемы, поскольку интеграл

$$\int_{t_1}^{t_2} B(t) dt \quad (24)$$

пропорционален энергии излучения и, следовательно, имеет конечную величину.

Однако, кроме всевозможных локально суммируемых функций, глаз может воспринимать также некоторые другие функции. Одна из таких функций фигурирует в формулировке временного закона Тальбота. Она получается из периодической функции $B_T(t) = B_T(t - nT)$ при неограниченном уменьшении периода T колебаний яркости. Таким образом, входными функциями глаза могут выступать также некоторые предельные функции, определяемые бесконечной последовательностью локально суммируемых функций. Такого рода входные функции для нас весьма важны, поскольку в терминах именно этих функций формулируется закон Тальбота.

Для обобщения формулировки закона Тальбота на одном поле сравнения сформируем зрительную картину, описываемую некоторой произвольно выбранной локально суммируемой функцией $B(t)$, порождающей зрительное ощущение $S(t)$. На другом поле сравнения поочередно будем формировать ряд зрительных картин, каждая из которых описывается функцией из бесконечной последовательности $\{B_1(t), B_2(t), \dots, B_N(t), \dots\}$ локально суммируемых функций.

Пусть последовательность этих зрительных картин порождает последовательность зрительных ощущений $\{S_1(t), S_2(t), \dots, S_N(t), \dots\}$.

Опыт свидетельствует о возможности подбора таких последовательностей зрительных картин, при которых последовательности порождаемых ими зрительных ощущений сходились к зрительному ощущению $S(t)$ второго поля, т.е. $\lim_{N \rightarrow \infty} S_N(t) = S(t)$. Определение последовательностей зрительных картин, дающих в пределе зрительное ощущение $S(t)$, и последовательностей, не дающих этого, возможно из закона Тальбота в обобщенной формулировке.

Формула

$$\lim_{N \rightarrow \infty} S_N(t) = S(t) \quad (25)$$

справедлива в том и только том случае, если для любого конечного интервала времени $[t_1, t_2]$ будет иметь место равенство

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \int_{t_1}^{t_2} B_N(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} B(t) dt. \quad (26)$$

В выражении (26) сходимость имеет следующий смысл: каковы бы ни были t_1 и t_2 (но $|t_1 - t_2| \leq T_0$, где T_0 — некоторое фиксированное число), для любого N найдется число $\epsilon_N > 0$ такое, что

$$\left| \int_{t_1}^{t_2} [B_N(t) - B(t)] dt \right| \leq \epsilon_N, \quad (27)$$

причем при $N \rightarrow \infty$ $\epsilon_N \rightarrow 0$.

Таким образом, из обобщенного закона Тальбота следует, что если две зрительные картины, одна из которых достаточно быстро изменяется во времени, в среднем совпадают по яркости на любом отрезке времени, то порождаемые ими зрительные ощущения будут одинаковы.

При невыполнении этого условия зрительные ощущения будут различными.

Прежняя формулировка временного закона Тальбота является частным случаем новой, поскольку для периодических функций условие (26) переходит в условие (7).

Закон Тальбота можно обобщить также для случая неоднородных и нестационарных зрительных картин, когда яркость является функцией не только времени t , но и координат поля зрения x, y . Теперь формулировка закона Тальбота будет следующей:

Если и только если

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{t_1}^{t_2} B_N(x, y, t) dx dy dt = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{t_1}^{t_2} B(x, y, t) dx dy dt, \quad (28)$$

то

$$\lim_{N \rightarrow \infty} S_N(x, y, t) = S(x, y, t). \quad (29)$$

В обобщенной формулировке пространственно-временной закон Тальбота означает, по существу, следующее. Пусть имеются две зрительные картины, одна из которых достаточно быстро изменяется во времени и в поле зрения. Порождаемые этими картинками зрительные ощущения будут одинаковыми в том и только том случае, если на любом участке поля зрения и любом отрезке времени зрительные картины имеют одинаковую среднюю яркость.

С учетом трехкомпонентности зрения обобщенный закон Тальбота может быть сформулирован в следующем виде.

Зрительные ощущения совпадают в том и только том случае, если совпадают средние значения координат цвета соответствующих зрительных картин в произвольном пространственно-временном параллелепипеде $[x_1, x_2; y_1, y_2; t_1, t_2]$.

Иными словами,

если и только если

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{t_1}^{t_2} B_{iN}(x, y, t) dx dy dt = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{t_1}^{t_2} B_i(x, y, t) dx dy dt, \quad (30)$$

то

$$\lim_{N \rightarrow \infty} S_{iN}(x, y, t) = S_i(x, y, t) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (31)$$

в смысле равномерной сходимости по x, y, t .

С помощью закона Тальбота — (30), (31) — для любого входного сигнала органа зрения $b_\lambda(x, y, t)$ можно указать всевозможные последовательности входных сигналов $\{b_{\lambda N}(x, y, t)\}$, дающие в пределе одно и то же зрительное ощущение.

Предположение, согласно которому на одном из полей сравнения должна быть сформирована некоторая фиксированная зрительная картина $b_\lambda(x, y, t)$, не обязательно; возможно рассмотрение случая, когда на обоих полях сравнения формируются последовательности зрительных картин $\{b'_{\lambda N}(x, y, t)\}$ и $\{b''_{\lambda N}(x, y, t)\}$. При этом закон Тальбота может быть назван обобщенным и формулируется следующим образом.

Если и только если

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{t_1}^{t_2} B'_{iN}(x, y, t) dx dy dt = \lim_{N \rightarrow \infty} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{t_1}^{t_2} B''_{iN}(x, y, t) dx dy dt, \quad (32a)$$

то

$$\lim_{N \rightarrow \infty} S'_{iN}(x, y, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} S''_{iN}(x, y, t) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (32b)$$

в смысле равномерной сходимости по x, y, t .

Докажем, что обобщенный закон Тальбота равносильен оператору

$$V_i(x, y, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} B_{iN}(\xi, \eta, \tau) \frac{e^{-(t-\tau)}}{t-\tau} e^{-\frac{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2}{t-\tau}} d\xi d\eta d\tau, \quad (33a)$$

$$S_i(x, y, t) = \Phi_i[V_i(x, y, t)] \quad (i = 1, 2, 3), \quad (33b)$$

где Φ_i — произвольный взаимно-однозначный непрерывный оператор.

Для доказательства равносильности утверждений (32) и (33) нужно установить следующее.

1. Из справедливости утверждения (32) вытекает справедливость утверждения (33). Смысл доказательства — в подтверждении взаимной однозначности оператора Φ_i .

Докажем сперва, что при совпадении функций

$$S_i(x, y, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} S'_{iN}(x, y, t);$$

$$S_i(x, y, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} S'_{iN}(x, y, t) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (34)$$

совпадают также функции

$$\begin{aligned} V'_i(x, y, t) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} B'_{iN}(\xi, \eta, \tau) \frac{e^{-(t-\tau)}}{t-\tau} e^{-\frac{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2}{t-\tau}} d\xi d\eta d\tau; \\ V_i(x, y, t) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} B_{iN}(\xi, \eta, \tau) \frac{e^{-(t-\tau)}}{t-\tau} e^{-\frac{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2}{t-\tau}} d\xi d\eta d\tau. \end{aligned} \quad (35)$$

Вследствие равномерной сходимости по x, y, t формула (32a) по существу означает следующее.

Для любого числа N найдется такое $\varepsilon_N > 0$, что

$$\left| \int_{t_1}^{t_2} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} [B'_{iN}(\xi, \eta, \tau) - B_{iN}(\xi, \eta, \tau)] d\xi d\eta d\tau \right| \leq \varepsilon_N, \quad (36)$$

где $|t_2 - t_1| \leq T_0$; $|x_2 - x_1| \leq X_0$; $|y_2 - y_1| \leq Y_0$; T_0, X_0, Y_0 — фиксированные числа; а при $N \rightarrow \infty$ $\varepsilon_N > 0$.

Зададимся некоторой областью

$$\begin{aligned} \Omega_{kmn} &= \{x + kA_x \leq \xi \leq x + (k+1)A_x; y + mA_y \leq \eta \leq y + (m+1)A_y; \\ &\quad t - (n+1)A_t \leq \tau \leq t - nA_t\}, \end{aligned} \quad (37)$$

причем

$$0 < A_x < X_0; 0 < A_y < Y_0; 0 < A_t < T_0,$$

которая представляет собой произвольный параллелепипед со сторонами A_x, A_y, A_t . Тогда

$$\begin{aligned} &\int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} [B'_{iN}(\xi, \eta, \tau) - B_{iN}(\xi, \eta, \tau)] \frac{e^{-(t-\tau)}}{t-\tau} e^{-\frac{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2}{t-\tau}} d\xi d\eta d\tau = \\ &= \sum_k \sum_m \sum_n \int_{\Omega_{kmn}} [B'_{iN}(\xi, \eta, \tau) - B_{iN}(\xi, \eta, \tau)] \frac{e^{-(t-\tau)}}{t-\tau} e^{-\frac{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2}{t-\tau}} d\xi d\eta d\tau, \end{aligned} \quad (38)$$

причем m, k изменяются от $-\infty$ до ∞ ; n — от 0 до ∞ .

Обозначим

$$B'_{iN}(\xi, \eta, \tau) - B''_{iN}(\xi, \eta, \tau) = f_{iN}(\xi, \eta, \tau);$$

$$\frac{e^{-(t-\tau)}}{t-\tau} e^{\frac{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2}{t-\tau}} = g(\xi, \eta, \tau). \quad (39)$$

Перепишем формулу (38) с учетом принятых обозначений (39)

$$\int_{-\infty}^t \iint_{-\infty}^{\infty} f_{iN}(\xi, \eta, \tau) g(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau = \sum_k \sum_m \sum_n \iiint_{\Omega_{kmn}} f_{iN}(\xi, \eta, \tau) g(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau. \quad (40)$$

Рассмотрим

$$J_{ikmn}^{(N)} = \iiint_{\Omega_{kmn}} f_{iN}(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau g(\xi, \eta, \tau). \quad (41)$$

В результате тождественных преобразований получим

$$J_{ikmn}^{(N)} = g(\xi_k, \eta_m, \tau_n) \iiint_{\Omega_{kmn}} f_{iN}(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau + \iiint_{\Omega_{kmn}} [g(\xi, \eta, \tau) - g(\xi_k, \eta_m, \tau_n)] f_{iN}(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau, \quad (42)$$

где

$$g(\xi_k, \eta_m, \tau_n) = \inf_{\Omega_{kmn}} g(\xi, \eta, \tau).$$

Заметим, что

$$|f_{iN}(\xi, \eta, \tau)| \leq C, \quad (43)$$

так как каждая из функций $B'(\xi, \eta, \tau)$ и $B''(\xi, \eta, \tau)$ ограничена.

С учетом (36), (37), (42), (43) получим

$$J_{ikmn}^{(N)} \leq g(\xi_k, \eta_m, \tau_n) \varepsilon_N + \omega_{kmn} C A_x A_y A_t, \quad (44)$$

где ω_{kmn} — колебание функции $g(\xi, \eta, \tau)$ в области Ω_{kmn} , причем $\omega_{kmn} > 0$ и ограничено.

Подставив полученное значение $J_{ikmn}^{(N)}$ в (40), получим

$$\int_{-\infty}^t \iint_{-\infty}^{\infty} f_{iN}(\xi, \eta, \tau) g(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau \leq \sum_k \sum_m \sum_n g(\xi_k, \eta_m, \tau_n) \varepsilon_N +$$

$$+ \sum_k \sum_m \sum_n \omega_{kmn} C A_x A_y A_t. \quad (45)$$

Рассмотрим

$$\sum_k \sum_m \sum_n g(\xi_k, \eta_m, \tau_n) \varepsilon_N = \frac{\varepsilon_N}{A_x A_y A_t} \sum_k \sum_m \sum_n g(\xi_k, \eta_m, \tau_n) A_x A_y A_t; \quad (46)$$

$\int_{-\infty}^t \iint_{-\infty}^{\infty} g(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau$ существует, поэтому сумма $\sum_k \sum_m \sum_n g(\xi_k, \eta_m, \tau_n) A_x A_y A_t$ сходится как интегральная сумма для этого интеграла. Таким образом,

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_k \sum_m \sum_n g(\xi_k, \eta_m, \tau_n) \varepsilon_N = 0 \quad (47)$$

■, следовательно,

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^t \iint_{-\infty}^{\infty} f_{iN}(\xi, \eta, \tau) g(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau \leq \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_k \sum_m \sum_n \omega_{kmn} C A_x A_y A_t$$

при любых A_x, A_y, A_t .

Заметим, что из сходимости $\int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} g(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau$ следует, что $\sum_k \sum_m \sum_n \omega_{kmn} A_x A_y A_t \rightarrow 0$ при $A_x, A_y, A_t \rightarrow 0$ [4].

Таким образом, получаем

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} f_{iN}(\xi, \eta, \tau) g(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau = 0. \quad (48)$$

Это значит, что

$$\begin{aligned} \lim_{N \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} [B'_{iN}(\xi, \eta, \tau) - B''_{iN}(\xi, \eta, \tau)] \frac{e^{-(t-\tau)}}{t-\tau} e^{\frac{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2}{t-\tau}} d\xi d\eta d\tau = \\ = V'_i(x, y, t) - V''_i(x, y, t) = 0 \end{aligned} \quad (49)$$

в смысле равномерной сходимости по x, y, t .

Итак, доказано, что при совпадении функций $S'_i(x, y, t)$ и $S''_i(x, y, t)$ функции $V'_i(x, y, t)$ и $V''_i(x, y, t)$ также совпадают.

Докажем теперь обратное: при совпадении функций $V'_i(x, y, t)$ и $V''_i(x, y, t)$ также совпадают функции $S'_i(x, y, t)$ и $S''_i(x, y, t)$.

Действительно, пусть

$$V'_i(x, y, t) = V''_i(x, y, t). \quad (50)$$

В этом случае для любых x, y, t имеет место равенство

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} f_{iN}(\xi, \eta, \tau) \tilde{g}(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau = 0 \quad (51)$$

в смысле равномерной сходимости по x, y, t .

Рассмотрим функцию

$$r_{iN}(x, y, t) = \int_0^x \int_0^y \int_0^t f_{iN}(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau. \quad (52)$$

Из условия (43) следует, что

$$r_{iN}(x, y, t) \leq C |x y t|. \quad (53)$$

По лемме Больцано—Вейерштрасса, из условия (53) [4] в каждой точке (x, y, t) из последовательности $r_{iN}(x, y, t)$ можно выделить сходящуюся подпоследовательность. Пусть $r_i(x, y, t)$ — какой-либо частичный предел выбранной подпоследовательности.

Зафиксируем точку (x, y, t) и рассмотрим ее окрестность

$$S = \{\xi, \eta, \tau : \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (t-\tau)^2} \leq \epsilon\}, \quad (54)$$

где $\epsilon > 0$.

Если $0 \leq h \leq \epsilon$, то

$$r_i(x+h, y, t) - r_i(x, y, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \int_x^{x+h} \int_0^y \int_0^t f_{iN}(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau. \quad (55)$$

Из условия (43) следует, что

$$r_i(x+h, y, t) - r_i(x, y, t) \leq C |y h t|. \quad (56)$$

т. е. функция $r_i(x, y, t)$ удовлетворяет условиям Липшица.

Из условий (52) и (56) следует, что $r_i(x, y, t)$ имеет производную по x , т. е. существует $\frac{\partial r_i(x, y, t)}{\partial x}$.

Повторив аналогичные рассуждения, обнаруживаем существование производных $\frac{\partial r_i(x, y, t)}{\partial y}$ и $\frac{\partial r_i(x, y, t)}{\partial t}$.

Обозначим

$$f_i(x, y, t) \equiv \frac{\partial^3 r_i(x, y, t)}{\partial x \partial y \partial t} = \lim_{N \rightarrow \infty} f_{iN}(x, y, t). \quad (57)$$

Очевидно, что

$$\int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{t_1}^{t_2} f_i(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau = \lim_{N \rightarrow \infty} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{t_1}^{t_2} f_{iN}(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau, \quad (58)$$

т. е. для ограниченной последовательности функций $\{f_{iN}(\xi, \eta, \tau)\}$ существует функция $f_i(\xi, \eta, \tau)$ и выполняется условие (58).

Теперь рассмотрим выражение (51). Из доказанного выше следует, что существует функция $f_i(\xi, \eta, \tau)$.

Следовательно,

$$\int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} f_i(\xi, \eta, \tau) g(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau = 0. \quad (59)$$

Рассмотрим уравнение

$$\frac{\partial z_i(x, y, t)}{\partial t} - \frac{1}{4} \left(\frac{\partial^2 z_i(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z_i(x, y, t)}{\partial y^2} \right) + z_i(x, y, t) = \pi f(x, y, t). \quad (60)$$

Ограниченное решение для данного уравнения имеет вид

$$z_i(x, y, t) \equiv \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} f_i(\xi, \eta, \tau) g(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau, \quad (61)$$

т. е. полностью совпадает с (59).

Так как $z_i(x, y, t) \equiv 0$, то $f_i(x, y, t) \equiv 0$ и, следовательно,

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{t_1}^{t_2} f_{iN}(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau = 0. \quad (62)$$

Формула (62) совпадает с (32а) с учетом принятых обозначений (39).

Поскольку закон Тальбота выполняется, из выполнения условия (32а) следует выполнение условия (32б), т. е. равенство функций $S_i(x, y, t)$ и $\tilde{S}_i(x, y, t)$.

Итак, доказано, что при совпадении функций $V_i(x, y, t)$ и $\tilde{V}_i(x, y, t)$ функции $S_i(x, y, t)$ и $\tilde{S}_i(x, y, t)$ также совпадают.

Следовательно, оператор Φ_i взаимно-однозначный. Это значит, что из справедливости утверждения (32) вытекает справедливость утверждения (33).

2. Докажем теперь, что из справедливости утверждения (33) вытекает справедливость утверждения (32).

Предположим вначале, что выполняется условие (32а) и докажем, что при этом выполняется условие (32б), т. е. что функции $S_i(x, y, t)$ и $\tilde{S}_i(x, y, t)$ совпадают.

В силу взаимной однозначности оператора Φ_i достаточно показать совпадение функций $V_i(x, y, t)$ и $\tilde{V}_i(x, y, t)$. Следовательно, из условия

(32а) требуется вывести условие (51). Однако такой вывод был только что выполнен.

Теперь предположим, что функции $S'_i(x, y, t)$ и $S''_i(x, y, t)$ совпадают, т. е. что выполняется условие (32б), и докажем, что при этом выполняется также условие (32а).

В силу взаимной однозначности оператора Φ_i в данном случае совпадают также функции $V'_i(x, y, t)$ и $V''_i(x, y, t)$; следовательно, выполняется условие (51). Однако только что было доказано, что из условия (51) следует зависимость (32а).

Итак, доказано, что из справедливости утверждения (33) вытекает справедливость утверждения (32).

Этим завершается доказательство равносильности обобщенного закона Тальбота и математической модели сглаживающих свойств зрения. Таким образом, модель сглаживающих свойств зрения (33) является просто переформулировкой обобщенного закона Тальбота. Эта модель справедлива в той же мере, в какой справедлив обобщенный закон Тальбота. Модель (2) представляет собой частный случай модели (33).

Теперь приступим к экспериментальной проверке обобщенного закона Тальбота.

Были поставлены специальные опыты для проверки закона Тальбота в его обобщенной формулировке. Сущность опытов заключалась в следующем. Наблюдались такие зрительные картины, которые, согласно обобщенному закону Тальбота, должны вызывать одинаковые нестационарные зрительные ощущения.

В одном из опытов наблюдателю предъявлялись для сравнения две ахроматические картины $B_1(t)$ и $B_2(t)$, изменение яркости которых во времени показано на диаграммах (рис. 1, а и б).

На диаграммах B_6 и B_7 обозначают уровни яркости, соответствующие белому и черному цвету, с коэффициентами отражения 83 и 2%. Зрительная картина, отвечающая диаграмме (рис. 1, а), формировалась путем смены чередования во времени двух серых полей, имеющих яркости B' и B'' , соответствующие коэффициентам отражения 63 и 22%. Длительность T предъявления полей одинакова.

Диаграмме (рис. 1, б) соответствует зрительная картина, получаемая с помощью значительно более быстрых мельканий белых и черных полей. Соотношение длительности фаз этих быстрых мельканий выбиралось с таким расчетом, чтобы средняя яркость быстрых мельканий равнялась яркости медленных мельканий в том же интервале времени.

Согласно обобщенному закону Тальбота, обе зрительные картины должны выглядеть одинаковыми при условии слияния быстрых мельканий.

Опыты выполнялись с помощью диска Максвелла. Схема кружка, использовавшегося в опыте, изображена на рис. 2. На кружке имеются два соприкасающихся кольца. На внутреннем кольце сформирована

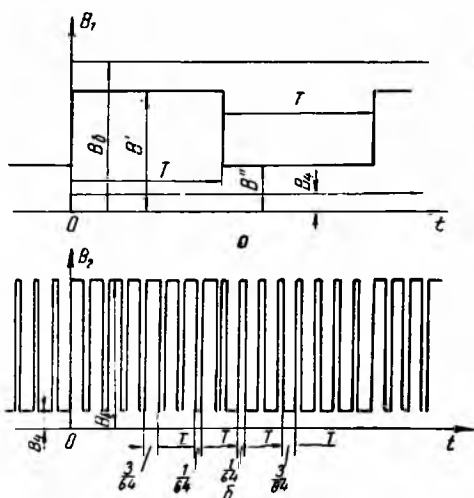


Рис. 1.

зрительная картина, соответствующая диаграмме на рис. 1, а, на внешнем — зрительная картина, соответствующая диаграмме (рис. 1, б). Частота смены яркости быстрых мельканий принята в 16 раз выше, чем медленных.

При постепенном раскручивании диска вертушки вначале на внешнем кольце заметны не только медленные, но и быстрые мелькания яркости. В этом случае заметно различие зрительных картин, наблюдаемых на соседних кольцах. Однако как только быстрые мелькания яркости на внешнем кольце перестают замечаться (это происходит при скорости вращения диска около 3 об/сек), обе зрительные картины становятся неотличимыми в полном соответствии с обобщенным законом Тальбота. При этом наблюдатель на обеих дорожках видит синфазные колебания светлоты. Дальнейшее повышение скорости вращения диска приводит к изменению характера колебаний светлоты на обоих полях, однако между соседними зрительными ощущениями все время сохраняется тождество. Так продолжается вплоть до полного слияния медленных мельканий при 40—50 об/сек. Во время проведения опытов освещенность диска вертушки изменялась в широких пределах (от 10 до 1000 лк).

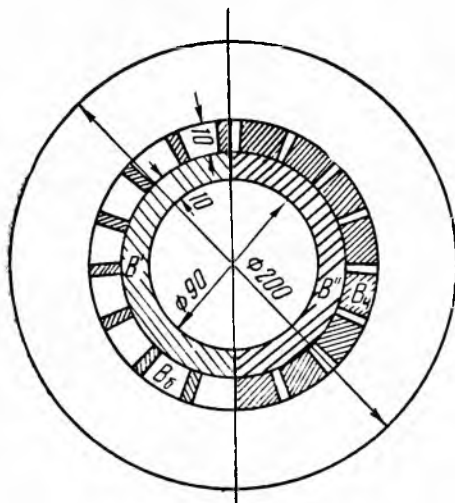


Рис. 2.

Подобные опыты выполнялись также при изменении яркости медленных мельканий во времени в виде синусоиды, суммы синусоид с различным периодом и др. Во всех этих экспериментах не было обнаружено каких-либо отклонений от обобщенного закона Тальбота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, В. Л. Рвачев, А. Г. Мурашко, Г. Д. Майстровский. Математическая модель инерции и иррадиации зрения. Сб. «Математические модели в биологии и бионике». КДНТП, 1965.
2. А. В. Луизов. Инерция зрения. Оборонгиз, 1961.
3. Н. Ф. Talbot. Experiment on light. Phil. Mag., 5 (1834).
4. Г. М. Фихтенгольц. Курс дифференциального и интегрального исчисления, изд. 6-е. Изд-во «Наука», 1966.

К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ МЕХАНИЗМОВ НОРМАЛИЗАЦИИ ЗРИТЕЛЬНЫХ ОБРАЗОВ

Е. П. Путятин, И. В. Шульгин, В. П. Юрченко, О. М. Абрамов

Введение

Пусть имеется некоторое множество M зрительных картин, заданных в виде функций распределения яркости $B(x, y)$ в поле зрения. Произведем разбиение множества M на подмножества $m_1, m_2, \dots, m_i$ так, что 1) $m_i = \emptyset$; 2) $U_{im_i} = M$; 3) m_i и m_j либо не пересекаются, либо совпадают. Зрительные картины $B_1, B_2 \in M$ будем считать эквивалент-

ными и обозначим $B_1 \sim B_2$, если существует такое m_i , что $B_1 \in m_i$ и $B_2 \in m_i$. Например, класс эквивалентности m_i может образовывать одинаковые, но смещенные по осям зрительные картины.

Если имеется некоторая зрительная картина B , подлежащая распознаванию, то в общем случае эта задача сводится к определению класса m_i , к которому принадлежит B . Фундаментальным алгоритмом распознавания является перебор. В этом случае элемент B сравнивают со всеми элементами множества M .

Задача распознавания существенно упрощается при сравнении не со всеми элементами M , а только с представителями в каждом классе эквивалентности m_i . Для осуществления данной возможности нужно построить оператор F , действующий из M в M , такой, что для каждого элемента $B \in m_i$ выполняется соотношение $F(B) = B_{i_0}$, где B_{i_0} — некоторый представитель, который будем называть эталоном или же нормальным элементом в классе эквивалентности m_i . В построении оператора F и состоит задача нормализации, которая решается в данной работе для сдвига, вращения и масштабных преобразований зрительных картин.

В литературе известны некоторые алгоритмы автоматической нормализации зрительных картин, например, метод интегральных моментов [1, 2]. В настоящей работе отмечаются необходимые и достаточные условия приведения эквивалентных картин к эталонному виду. Анализ этих условий позволяет говорить об известных алгоритмах как о частных случаях.

Математические модели нормализации

Пусть имеется некоторое множество преобразований G , обладающее свойствами группы с групповой операцией-суперпозицией. Построим разбиение множества M зрительных картин по заданной группе преобразований. В один класс эквивалентности m_i отнесем те и только те картины B_1 и B_2 , для которых существуют преобразования $S_1, S_2 \in G$ такие, что

$$B_1 \circ S_1 = B_2 \circ S_2. \quad (1)$$

Примерами групп преобразований являются следующие: G^1 — группа сдвигов зрительной картины $B_i \in M$ по одной из осей координат; G^2 — группа поворотов; G^3 — группа изменения масштаба по одной из осей; G^4 — группа преобразований подобия и др. Каждая группа G^i ($i = 1, \dots, 6$) порождает разбиение

$$M = \{m_1^i, m_2^i, \dots, m_t^i, \dots\}.$$

Все перечисленные группы являются однопараметрическими, т. е. каждому преобразованию S из группы соответствует одно и только одно вещественное число t , которое полностью определяет преобразование.

В классе эквивалентности, к которому принадлежат зрительные картины B_i , возьмем некоторую эталонную картину B_0 . Тогда для однопараметрической группы оператор F будет иметь вид

$$B_i \circ S_{t_i} = B_0 \circ S_{t_0}; \quad B_0 = B_i \circ S_{t_i} \circ S_{t_0}^{-1} = B_i \circ S_t, \quad (2)$$

где t_i и t_0 — вещественные числа, характеризующие преобразования S_i и S_0 зрительных картин. Параметр t является функционалом соответствующих зрительных картин

$$t = \Phi(B_i, B_0). \quad (3)$$

Аналогично для двух эквивалентных зрительных картин $B_1 \circ S_{t_1} = B_2 \circ S_{t_2}$ имеем

$$B_1 = B_2 \circ (S_{t_1} \circ S_{t_1}^{-1}) = B_2 \circ S_{t_1}. \quad (4)$$

Здесь параметр t зависит от t_1 и t_2

$$t = P(t_1, t_2) = P[\Phi(B_1, B_0), \Phi(B_2, B_0)], \quad (5)$$

где P — некоторая функция. Функционалы $\Phi(B_1, B_0)$ и $\Phi(B_2, B_0)$ отображают двумерное пространство функций яркости $B(x, y)$ в одномерное пространство вещественных чисел.

Рассмотрим некоторые конкретные группы преобразований.

1. *Группа G^1 сдвигов по одной из осей координат.* Пусть имеется зрительная картина $B(x, y)$, которая дважды подвергается преобразованиям сдвига по оси x : один раз на величину l_1 и второй — на величину l_2 . Очевидно, что результирующее преобразование S_l для

$$B \circ S_{l_1} \circ S_{l_2} = B \circ S_l$$

полностью характеризуется параметром l , равным сумме параметров преобразования l_1 и l_2 . Таким образом, группа сдвигов G^1 изоморфна группе вещественных чисел по сложению.

На основании соотношений (2) и (3) и учитывая изоморфизм по сложению, получаем необходимые и достаточные условия эквивалентности зрительных картин B при фиксированном эталоне B_0

$$\Phi(B) - \Phi(B_0) = l, \quad (6)$$

где l — величина сдвига для зрительных картин

$$B_0(x, y) = B(x - l, y). \quad (7)$$

Учитывая соотношение (2), оператор F автоматического приведения зрительной картины $B(x, y)$ к эталонному виду (оператор центрирования) будет записан в виде

$$B_0(x, y) = B[x + \Phi(B), y]. \quad (8)$$

В качестве функционалов $\Phi(B)$ могут быть приняты все те, для которых выполняется условие (6): центр тяжести

$$x_c = \frac{\iint_D B(\xi, \eta) \xi d\xi d\eta}{\iint_D B(\xi, \eta) d\xi d\eta}, \quad (9)$$

где D — область интегрирования зрительной картины; «логарифмический центр тяжести»

$$x_c = \ln \iint_D B(\xi, \eta) \xi^2 d\xi d\eta; \quad (10)$$

параметры любых соответствующих характерных точек на зрительной картине (углы излома, максимальная яркость и т. д.). Вопрос о выборе конкретного вида функционала $\Phi(B)$ приобретает первостепенное значение при технической реализации оператора центрирования.

Всевозможные смещения эталона $B(x, y)$ по двум координатам x и y образуют двухпараметрическую группу. Легко показать, что в этом случае оператор F центрирования зрительной картины $B(x, y)$ по двум координатам будет иметь вид

$$B_0(x, y) = B[x + \Phi_1(B), y + \Phi_2(B)]. \quad (11)$$

Функционалы $\Phi_1(B)$ и $\Phi_2(B)$ должны удовлетворять условиям

$$\begin{aligned}\Phi_1(B) - \Phi_1(B_0) &= l, \\ \Phi_2(B) - \Phi_2(B_0) &= p,\end{aligned}\quad (12)$$

где l и p — произвольные смещения зрительной картины B соответственно по координатам x и y относительно эталонной картины B_0 .

Конкретные виды функционалов $\Phi_1(B)$ и $\Phi_2(B)$ могут совпадать с выражениями (9) — (10) для x_c и y_c .

2. Группа вращений G^2 вокруг начала координат.

Если зрительная картина $B(x, y)$ подвергается последовательным преобразованиям поворота на углы Θ_1, Θ_2 , то результирующее преобразование S_0 , определяемое из

$$B \circ S_{\Theta_1} \circ S_{\Theta_2} = B \circ S_{\Theta},$$

характеризуется суммой $\Theta = \Theta_1 + \Theta_2$, т. е. группа вращений, как и группа сдвигов, изоморфна группе вещественных чисел по сложению.

Выберем эталонную зрительную картину $B_0(x, y)$, например, такую, что угол наклона некоторой ее оси к оси абсцисс будет равен нулю, т. е. $\Theta_0 = 0$. Тогда для зрительной картины $B(x, y)$, повернутой на угол Θ относительно эталонной, справедливо соотношение $B = B_0 \circ S_{\Theta}^{-1}$ или

$$B(x, y) = B_0(x \cos \theta + y \sin \theta, -x \sin \theta + y \cos \theta).$$

Оператор F автоматической «отстройки» от вращения имеет вид

$$B_{\theta}(x, y) = B[x \cos \Phi(B) - y \sin \Phi(B), x \sin \Phi(B) + y \cos \Phi(B)], \quad (13)$$

причем $\Phi(B) - \Phi(B_0) = \theta$, в частности, $\Phi(B_0)$ может выбираться равным нулю.

В полярной системе координат оператор (13) имеет более простой вид

$$B_{\theta}(\rho, \varphi) = B[\rho, \varphi + \Phi(B)], \quad (14)$$

где $\Phi(B)$ — вещественный функционал, вычисляемый в полярной системе координат и удовлетворяющий условию (6).

В декартовой системе координат в качестве функционалов $\Phi(B)$, удовлетворяющих (13), могут быть использованы, например,

$$\Phi(B) = \frac{\iint_D B(\xi, \eta) \arctg \frac{\xi}{\eta} d\xi d\eta}{\iint_D B(\xi, \eta) d\xi d\eta} \quad (15)$$

или

$$\Phi(B) = \log_a \iint_D B(\xi, \eta) a^{\arctg \frac{\xi}{\eta}} d\xi d\eta. \quad (16)$$

Для функционала в операторе (14) могут быть использованы выражения центра тяжести в полярной системе координат типа (9) или (10).

3. Группа G^3 изменения масштаба зрительной картины по одной из координат.

Пусть зрительная картина $B(x, y)$ дважды подвергается преобразованию масштаба по оси x : первый раз с коэффициентом λ_1 , второй — с коэффициентом λ_2 . Тогда результирующее преобразование S_{λ} , определяемое как $B \circ S_{\lambda} = B \circ S_{\lambda_1} \circ S_{\lambda_2}$, характеризуется произведением $\lambda = \lambda_1 \lambda_2$ и, следовательно, группа изменения масштаба по одной из осей изоморфна группе вещественных чисел по умножению.

Пользуясь соотношениями (4) и (5), запишем необходимое и достаточное условие эквивалентности зрительной картины $B(x, y)$ и некоторой эталонной $B_0(x, y)$ такой, что $B(x, y) = B_0(\lambda x, y)$,

$$\Phi(B_0) = \lambda \Phi(B), \quad (17)$$

а также вид оператора нормализации F

$$B_0(x, y) = B[x\Phi(B), y]. \quad (18)$$

Функционал для эталонной картины может быть выбран равным единице $\Phi(B_0) = 1$. В качестве $\Phi(B)$ можно принять обычные линейные функционалы вида

$$\Phi(B) = \iint_D B(\xi, \eta) \psi(\eta) d\xi d\eta, \quad (19)$$

где $\psi(\eta)$ — произвольная функция.

Условию (17) удовлетворяет также нелинейный функционал

$$\Phi(B) = \sqrt{\iint_D B(\xi, \eta) \xi \psi(\eta) d\xi d\eta}. \quad (20)$$

4. Группа G^4 подобия.

Ясно, что группа преобразований подобия изоморфна группе вещественных чисел по умножению. Условие эквивалентности зрительных картин будет определяться соотношением (17), а оператор F нормализации для картин типа $B(x, y) = B_0(\lambda x, \lambda y)$ имеет вид

$$B_0(x, y) = B[x\Phi(B), y\Phi(B)]. \quad (21)$$

Примером функционала $\Phi(B)$ является известное выражение [2]

$$\Phi(B) = \sqrt{\iint_D B(\xi, \eta) d\xi d\eta}. \quad (22)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Минг Куэй Ху. Математическая модель восприятия. Сб. «Проблемы бионики». Изд-во «Мир», 1965.
2. В. А. Махонин, В. П. Савельев. О моделировании константных свойств при опознании. Сб. «Проблемы инженерной психологии», вып. 4, Л., 1966.

РЕФЕРАТЫ

УДК 62.506.2

Оптимизация в явлениях спектральной чувствительности глаза. Сапожников Р. А. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 3—6.

Сформулированы условия оптимизации фотоприемника по спектральной чувствительности. Предложена математическая модель спектральной чувствительности.

Рисунков 1. Библиографических ссылок 11.

УДК 62.506.2

Ввод визуальной информации в цифровую вычислительную машину. Гога Г. Г. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 7—20.

Рассматриваются различные методы автоматического ввода визуальной информации в ЦВМ. Описывается функциональная схема устройства ввода визуальной информации в машину БЭСМ-2М.

Таблиц 3. Рисунков 8. Библиографических ссылок 8.

УДК 62.506.2

Математическое описание функционирования вкусового анализатора человека. Шабанов-Кушнаренок Ю. П., Марченко Ю. С., Бондаренко М. Ф. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 20—26.

Приводится аксиоматическое построение математической модели преобразования вкусового стимула во вкусовое ощущение органом вкуса человека. Результаты экспериментов доказывают справедливость данной аксиоматики.

Таблиц 4.

УДК 62.506.2

Моделирование функциональных систем зрительного восприятия пространства при управлении движущимися системами различного вида, Белник Я. Я. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 26—30.

Получена общая модель функциональной системы восприятия удаленности по видимой скорости ориентиров, основной способ восприятия — скольжение линии зора — выявлен в реальных условиях.

Таблиц 2. Библиографических ссылок 1.

УДК 62.506.2

Детектирование движения в сетчатке глаза лягушки. Зозуля Ю. И., Нефедов Ю. И., Червов В. Г., Бугай Ю. П. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 30—37.

В аналитической форме разбираются общие принципы детектирования движения в сетчатке глаза лягушки. На примере детектора движущихся краев рассматриваются пространственные и временные особенности рецептивных полей, выделяющих различные параметры движения стимулов: скорость, ускорение и направление. Для описания моделей использовался математический аппарат непрерывных многомерных сред.

Рисунков 5. Библиографических ссылок 10.

УДК 62.506.2

Об одном применении биологических принципов для автоматического анализа сложных геометрических изображений. Марченко С. Ф., Червов В. Г. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 37—43.

Приводится способ определения начальной точки отсчета при анализе сложных геометрических изображений. Даны примеры использования начальной точки отсчета для анализа некоторых рукописных цифр и развернутая функциональная схема устройства, работающего по описанному алгоритму.

Рисунков 4. Библиографических ссылок 4.

УДК 62.506.2

Об одном методе аналитического описания реограмм для обработки и анализа их на цифровой вычислительной машине. Пинчук С. А., Волошин П. В., Белик Г. И. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 43—50.

Дано аналитическое описание реограмм с помощью R -функций. Процесс построения функций-реограмм осуществляется автоматически на ЦВМ по мере ввода информации, поэтому метод может быть назван машинным.

Рисунков 6. Библиографических ссылок 6.

УДК 62.506.2

Об одной возможности создания быстродействующей электрохимической модели нейрона. Бых А. И., Воевода Л. В., Худенский Ю. К. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 50—53.

Рассматривается возможность использования импульсов свечения электрохемилуминесценций (ЭХЛ), возникающих при прохождении импульсных токов через растворы неводных электролитов, содержащих примесь люминесцирующих органических молекул, для исследования переноса энергии возбуждения в биологических системах.

Рисунков 2. Библиографических ссылок 7.

УДК 62.506.2

Синтез комбинационного сумматора на формальных нейронах. Мкртчян С. О., Потапов В. И. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 53—60.

Обоснована возможность построения сумматора ЦВМ и ФН и его схемная реализация. Схема может выполнять различные логические функции в зависимости от величины порога возбуждения.

Рисунков 10. Библиографических ссылок 3.

УДК 15.370.153

Разложение непрерывной функции в ряд из производных и дискретизация электрограмм. Пономарева И. Д., Цепков Г. В. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 61—62.

Предлагается алгоритм кодирования биоинформации. Приводится расчет электрограммы путем определения необходимых параметров АКД по спектральным характеристикам.

Библиографических ссылок 2.

УДК 62.506.2

Вопросы применения линейной модели к математическому описанию зрительного восприятия периодических мельканий яркости. Качко Е. Г. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 63—67.

Исследуется линейная модель инерции зрения. Показано, что модель Аллара — Лунова хорошо согласуется с экспериментальными данными при исследовании одиночных вспышек яркости.

Рисунков 4. Библиографических ссылок 7.

УДК 62.506.2

К вопросу о разработке электронного устройства для исследования индуктивных свойств зрения. Сердюченко В. Я., Галькевич А. А. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 68—71.

Рассматривается один из способов формирования зрительных картин на экране ЭЛТ с использованием стандартных узлов телевизоров и типовых блоков аналоговых машин. Обоснована необходимость подобных зрительных картин для исследования индуктивных свойств зрения.

Рисунков 3. Библиографических ссылок 2.

УДК 62.506.2

Образ и признаки в теории автоматического распознавания. Мясникова Е. Н. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 71—73.

Дается определение образа и его признаков на основе теории собственных значений операторов и собственных функций. Обобщение определения образа и признаков может быть использовано в теории автоматического распознавания.

Библиографических ссылок 2.

УДК 62.506.2

К вопросу об использовании данных патологии вкусового анализатора для машинной диагностики. Марченко Ю. С. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 74—78.

На большом фактическом материале показано, что расстройство вкуса — частый симптом ряда заболеваний человека. Знание свойств «среднего» вкусового анализатора и патологии органа вкуса может иметь значение для диагностики после соответствующей обработки и классификации.

Библиографических ссылок 21.

УДК 62.506.2

Влияние числа опознавательных признаков на память. Мельник И. М., Невельский П. Б. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 78—81.

Описано экспериментальное исследование зависимости воспроизведения от числа опознавательных признаков сложного символа. Подсчитаны критерии полноты, точности и надежности воспроизведения.

Таблиц 3. Библиографических ссылок 4.

УДК 62.506.2

Преобразование и запоминание информации в условиях ее кратковременного предъявления. Середа Г. К., Сиопик Б. И. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 81—83.

Излагаются результаты психологического эксперимента с целью изучения некоторых аспектов слуховой кратковременной памяти человека. Проведено исследование влияния различных преобразований информации, связанных с решением познавательных задач различной степени сложности, на объем слуховой кратковременной памяти (ОСКП) и число правильных решений (ЧПР).

Таблиц 1. Библиографических ссылок 3.

УДК 62.506.2

О возможности использования математических моделей вибрационной чувствительности для определения патологии вибрационного анализатора. Мурашко А. Г., Тищенко В. В. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 83—91.

Обосновывается возможность применения моделей частотного анализа вибраций для определения патологии вибрационного анализатора.

Таблиц 1. Рисунков 1. Библиографических ссылок 19.

УДК 62.506.2

Математическое описание сглаживающих свойств зрения. Шабанов-Кушнаренко Ю. П., Качко Е. Г. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 91—102.

Рассматривается математическая модель сглаживающих свойств зрительного анализатора. Доказывается, что эта модель логически эквивалентна обобщенному закону Тальбота. Описана экспериментальная проверка обобщенного закона Тальбота.

Рисунков 2. Библиографических ссылок 4.

УДК 62.506.2

К вопросу о моделировании механизмов нормализации зрительных образов. Путятин Е. П., Шульгин И. В., Юрченко В. П., Абрамов О. М. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5, 1970, стр. 102—106.

Рассматриваются общие вопросы нормализации зрительных картин. Приведены необходимые и достаточные условия построения вида операторов нормализации.

Библиографических ссылок 2.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Р. А. Сапожников. Оптимизация в явлениях спектральной чувствительности глаза	3
Г. Г. Гога. Ввод визуальной информации в цифровую вычислительную машину	7
Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, Ю. С. Марченко, М. Ф. Бондаренко. Математическое описание функционирования вкусового анализатора человека	20
Я. Я. Белик. Моделирование функциональных систем зрительного восприятия пространства при управлении движущимися системами различного вида	26
Ю. И. Зозуля, Ю. И. Нефедов, В. Г. Червов, Ю. П. Бугай. Детектирование движения в сетчатке глаза лягушки	30
С. Ф. Марченко, В. Г. Червов. Об одном применении биологических принципов для автоматического анализа сложных геометрических изображений	37
С. А. Пинчук, П. В. Волошин, Г. И. Белик. Об одном методе аналитического описания реограмм для обработки и анализа их на цифровой вычислительной машине	43
А. И. Бых, Л. В. Воевода, Ю. К. Худенский. Об одной возможности создания быстродействующей электрохимической модели нейрона	50
С. О. Мкртчян, В. И. Потапов. Синтез комбинационного сумматора на формальных нейронах	53
И. Д. Пономарева, Г. В. Цепков. Разложение непрерывной функции в ряд из производных и дискретизация электрограмм	61
Е. Г. Качко. Вопросы применения линейной модели к математическому описанию зрительного восприятия периодических мельканий яркости	63
В. Я. Сердюченко, А. А. Галькевич. К вопросу о разработке электронного устройства для исследования индуктивных свойств зрения	68
Е. Н. Мясникова. Образ и признаки в теории автоматического распознавания	71
Ю. С. Марченко. К вопросу об использовании данных патологии вкусового анализатора для машинной диагностики	74
И. М. Мельник, П. Б. Невельский. Влияние числа опознавательных признаков на память	78
Г. К. Середа, Б. И. Снопик. Преобразование и запоминание информации в условиях ее кратковременного предъявления	81
А. Г. Мурашко, В. В. Тищенко. О возможности использования математических моделей вибрационной чувствительности для определения патологии вибрационного анализатора	83
Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, Е. Г. Качко. Математическое описание сглаживающих свойств зрения	91
Е. П. Путятин, И. В. Шульгин, В. П. Юрченко, О. М. Абрамов. К вопросу о моделировании механизмов нормализации зрительных образов	102