

О ЗАДАЧЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗРЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Ю. П. Шабанов-Кушнаренко

Харьковский институт радиоэлектроники

В настоящее время наблюдается быстрое развитие информационно-вычислительных машин. Все более сложные требования предъявляются к устройствам ввода информации для этих машин. По-видимому, не слишком далеко то время, когда потребуются устройства ввода информации, не уступающие по степени совершенства органу зрения человека. Успешное решение задачи создания полноценного синтетического глаза будет во многом зависеть от того, насколько хорошо изучен натуральный орган зрения человека.

Исследования органа зрения человека важны не только с точки зрения перспектив более или менее отдаленного будущего. От уровня знаний в этой области в прямой степени зависит эффективность диагностики и лечения глазных болезней, рекомендации в области гигиены зрения. Важны эти знания и для технических целей. Глаз современного человека работает в контакте со многими техническими устройствами. К ним относятся установки телевидения, кино и радиолокации, пульта управления, измерительные приборы, светотехнические устройства, книги, различные знаки (например, дорожные), карты и многое другое. Все эти устройства строятся с учетом свойств человеческого зрения. Так, например, скорость развертки луча и количество строк в телевизионном изображении, размеры и форма шрифтов книг, частота смены кадров в кино, характер сигнальных огней, размеры и форма шкал, режимы освещения, — все это выбирается в зависимости от свойств человеческого зрения. Чем лучше и полнее мы будем знать эти свойства, тем эффективнее, проще и дешевле будут технические устройства, создаваемые для совместной работы с органом зрения человека.

Данные об органе зрения и его работе важны также и потому, что уже в настоящее время для различных технических целей создаются специальные устройства фотоввода информации. Это различного рода фотоприемные устройства для измерительных приборов и систем автоматики, телевизионные системы и системы радиолокации, устройства фотоввода информации в вычислительные, управляющие и информационные машины. Орган зрения человека также является фотоприемником информации. Будучи неизмеримо более совершенным, по сравнению с техническими приборами, орган зрения во многих отношениях может служить образцом при создании новых и усовершенствовании существующих устройств фотоввода информации.

Вернемся, однако, к задаче создания полноценного синтетического органа зрения и попытаемся представить, какого рода знания о глазе натуральном могут оказаться полезными для ее решения. Ясно, что син-

тетический глаз будет устройством, воспринимающим и перерабатывающим информацию, поступающую в него со световыми лучами. Поскольку любой процесс обработки информации, в конечном счете, сводится к вычислениям, синтетический орган зрения с полным правом можно рассматривать как вычислительное устройство. Следовательно, для построения синтетического глаза мы должны располагать такого рода информацией, которая необходима при создании любой вычислительной машины.

Какая же информация требуется для создания вычислительной машины? Эта информация четко делится на два вида. Во-первых, нужно знать алгоритм, по которому должна работать создаваемая вычислительная машина, т. е. систему операций, с помощью которых она будет перерабатывать информацию. Проще говоря, надо знать, какие вычисления должна выполнять машина. Во-вторых, необходимы сведения о способах осуществления этого алгоритма в реальном устройстве. Сюда относятся схемные решения, данные о типах и конструкциях используемых блоков и деталей, сведения о технологии изготовления машины в целом и ее элементов.

При исследовании органа зрения человека можно рассматривать его лишь как вычислительное устройство. Такой подход, возможно, является несколько односторонним, однако он вполне достаточен для нашей цели — добыть знания, которые могут быть полезны при создании синтетического глаза. В соответствии со сказанным выше исследованием органа зрения можно направить по двум путям. Первый путь состоит в установлении вычислительных алгоритмов, лежащих в основе работы глаза. При втором пути усилия должны быть направлены на изучение физиологических механизмов глаза, обеспечивающих его работу в соответствии с этими алгоритмами.

Если избрать первый путь, то мы придем к задаче расшифровки и исследования вычислительных алгоритмов, по которым работает глаз. Вопрос об анатомических структурах и физиологических механизмах, обеспечивающих выполнение этих вычислений, при такой постановке не будет затрагиваться вовсе.

Важно заметить, что без знания алгоритмов работы натурального глаза вряд ли возможно создание полноценного искусственного органа зрения. В то же время, располагая одними лишь алгоритмами работы натурального глаза, уже можно приступить к построению глаза синтетического. Дело в том, что эти алгоритмы могут быть реализованы с помощью технических устройств, построенных на принципах совершеннейших, чем те, которые заложены в глазе.

Чтобы лучше уяснить задачу об исследовании алгоритмов работы органа зрения человека, представим, что синтетический глаз уже создан и поступает на исследование лицам, знакомым с его устройством и принципами работы. Допустим, что такое исследование проведено и результате полностью выяснены реализуемые синтетическим глазом вычислительные алгоритмы. Однако имея эту информацию, мы все же получим полного представления о том алгоритме, который был положен в основу работы синтетического глаза. Дело в том, что любое реальное вычислительное устройство воспроизводит заложенный в него алгоритм не идеально точно, уже хотя бы в силу ограниченной точности и надежности его работы. Поэтому найденный алгоритм, по которому фактически работает синтетический орган зрения, будет иметь определенные дефекты, по существу не представляющие для нас никакого интереса. Таким образом, в нашу задачу должно входить, кроме изучения фактического алгоритма работы синтетического глаза, также выделение идеального алгоритма, который имел в виду конструктор при создании

синтетического глаза. Дефекты, обнаруженные в фактическом алгоритме, необходимо отбросить, как не представляющие интереса.

Аналогичное положение имеет место и при исследовании натурального глаза. Глаз обладает многими несовершенствами; алгоритмы, реализуемые глазом, также не во всем совершенны. Задача состоит в том, чтобы, исследовав реальные алгоритмы работы глаза, отбросить все то, что может быть отнесено к дефектам. Затем на этой основе нужно построить математическую модель работы органа зрения в виде комплекса идеальных алгоритмов. Такая модель может послужить отправным пунктом при построении синтетического глаза.

Наконец, необходимо определить метод исследования. Снова представим себе синтетический глаз, алгоритм работы которого нам нужно расшифровать. Возможны два принципиально различные пути решения этой задачи. Во-первых, мы можем разобрать синтетический глаз и исследовать, какие вычисления производит каждая из его частей. Полученная таким путем информация позволит составить суждение об алгоритме работы синтетического глаза в целом.

Другой путь состоит в том чтобы, не разбирая устройства, подавать на его вход различные сигналы, наблюдая при этом, какая информация появляется на его выходе. Это так называемый метод кибернетического «черного ящика». Он также может привести к расшифровке алгоритма работы синтетического глаза. Правда, при этом мы ничего не узнаем о внутренней структуре синтетического глаза.

В применении к исследованию работы натурального глаза первый путь представляет собой анатомио-физиологическое исследование глаза. Второй путь состоит в психофизическом исследовании органа зрения; при этом испытуемому предъявляются те или иные зрительные картины и ведется наблюдение за возникающими зрительными ощущениями.

Если придерживаться второго пути, т. е. вести исследование исключительно по методу «черного ящика» без существенного использования анатомио-физиологических сведений о глазе, то исходными данными будут служить лишь психофизические реакции глаза.

Для успешного исследования любого объекта по методу «черного ящика» необходимо выполнить следующие три условия: 1) входные сигналы должны быть управляемыми; это значит, что исследователь располагает возможностью по своему желанию подавать на вход изучаемого объекта любые сигналы в любой последовательности; 2) входные сигналы должны быть измеримыми; это означает, что имеется возможность получить любую интересующую нас информацию о подаваемых входных сигналах; 3) измеримыми должны быть также выходные сигналы исследуемого объекта, т. е. имеется доступ к выходным сигналам и о них может быть получена любая нужная информация.

Нетрудно видеть, что в применении к органу зрения первые два условия могут быть выполнены. Известно, что материальным носителем информации, поступающей в глаз, являются световые лучи, и только они. Наука о свете разработана настолько, что все те параметры света, которые могут нести информацию, поступающую в глаз, известны и могут быть измерены с помощью существующих светотехнических приборов. К таким параметрам относятся спектральный состав и уровень яркости света, исходящего из различных точек наблюдаемых объектов в различные моменты времени.

Более сложен вопрос о том, можно ли удовлетворить третьему условию, и мы его рассмотрим более подробно. Можно ли измерить и зарегистрировать сигналы, исходящие из органа зрения? Выходными сигналами органа зрения являются зрительные ощущения. В этом убеждает

простой психофизический эксперимент: если закрыть глаза, т. е. приостановить поступление информации в орган зрения, то зрительные ощущения исчезают. Они вновь появляются при открывании глаз. Человек, у которого по тем или иным причинам не возникают зрительные ощущения, не получает от органа зрения никакой информации. Следовательно, когда речь идет об измерении и регистрации выходных сигналов органа зрения, имеются в виду измерение и регистрация зрительных ощущений. В связи с этим может возникнуть возражение, заключающееся в том, что зрительные ощущения недоступны для внешнего наблюдения. До сих пор никому еще не удалось обнаружить и измерить с помощью физических приборов зрительные ощущения человека. Однако, кроме физических приборов, человек располагает еще одним прибором — собственным мозгом, который как раз и воспринимает, измеряет, регистрирует зрительные ощущения.

Зрительные ощущения, действительно недоступные постороннему наблюдателю, могут анализироваться интроспективно, «внутренним зрением» того лица, у которого эти ощущения возникают. В роли прибора, анализирующего зрительные ощущения, выступает само сознание наблюдателя. Информация о зрительных ощущениях, полученная наблюдателем, может быть им высказана в виде слов и фраз и зарегистрирована на бумаге.

Сказанное постараемся теперь переложить на язык вычислительной техники. Для этого представим, что уже создан не только полноценный синтетический орган зрения, но также и синтетический мозг, равноценный по степени совершенства человеческому мозгу. Этот синтетический мозг можно представить в виде грандиозной по сложности вычислительной машины, одним из входов которой служит синтетический орган зрения.

Подобно тому как это имеет место в вычислительных машинах, на выходе синтетического органа зрения можно представить регистр, в который передается информация, воспринятая синтетическим глазом. Назовем его зрительным регистром. По мере надобности вычислительная машина обращается к этому регистру (или даже только к его отдельным участкам) и считывает содержащуюся в нем информацию.

Эта информация может быть использована вычислительной машиной в тех вычислениях, которые она производит. В случае необходимости информация передается в запоминающее устройство машины. Кроме того, информация из этого регистра может быть выдана вычислительной машиной на выход, т. е. отпечатана, записана, высказана (в зависимости от того, какими выходными устройствами оборудована вычислительная машина). Условно выделим все механизмы, участвующие в считывании информации со зрительного регистра. Тогда схематически можно изобразить изложенное так, как показано на рис. 1.

Лучи света 1 попадают в одно из входных устройств вычислительной машины 2 — синтетический орган зрения 3. Синтетический орган зрения осуществляет отбор и преобразование информации, переносимой лучами света и характеризующей зрительную картину. В переработанном виде информация поступает на выходной — зрительный регистр 4 синтетического органа зрения.

Со зрительного регистра информация по каналу 5 воспринимается специальным считывающим устройством 6, которое осуществляет по каналу 7 передачу информации внутрь вычислительной машины. Считанная информация может также передаваться по каналу 8 на одно из устройств вывода 9 вычислительной машины. Устройство вывода выдает информацию о содержимом зрительного регистра из вычислительной машины во внешний мир. Эта информация обозначена на схеме стрел-

кой 10. Заметим, что в существующих вычислительных машинах выдача информации из того или иного регистра на печать осуществляется практически без искажений. Некоторое незначительное отличие выданной информации от считываемой может быть обусловлено неидеальной точностью и надежностью работы считывающего и передающих устройств.

Возвращаясь теперь к натуральному глазу и мозгу, нетрудно проследить их аналогию с только что рассмотренной вычислительной машиной. Аналогом информации, содержащейся в зрительном регистре машины, служит зрительное ощущение. Считывающему устройству можно поставить в соответствие сознание наблюдателя. Благодаря работе сознания мы воспринимаем зрительные ощущения, можем их осознать, запомнить, а также «выдать их на печать», т. е. высказать или записать.

Могут возникнуть сомнения в том, следует ли доверять той информации о зрительных ощущениях, которую доставляет нам сознание в качестве измерительного и регистрирующего прибора. Однако эти сомнения едва ли можно считать обоснованными, поскольку все сведения о внешнем мире мы получаем через ощущения.

Наконец, можно усомниться в том, что параметры зрительного ощущения измеряются сознанием с достаточной точностью. Действительно, точность замеров, осуществляемых сознанием человека, в ряде случаев намного ниже той, которую обычно обеспечивают физические приборы. Тем не менее, ее все же достаточно, чтобы успешно вести исследование органа зрения по методу «черного ящика». Дело в том, что для моделирования работы органа зрения и не требуется точность, более высокая, чем та, с которой мы можем регистрировать выходные сигналы органа зрения. Даже угадав с идеальной точностью алгоритмы переработки информации в органе зрения человека, нельзя проверить на опыте, так ли это.

Резюмируя сказанное, мы приходим к выводу, что в применении к органу зрения человека третье условие, необходимое для проведения исследования по методу «черного ящика», также может быть выполнено. Следовательно, нет принципиальных препятствий для математического моделирования зрения человека по методу «черного ящика».

Как было указано выше, основу при таком моделировании могут составлять входные и выходные сигналы. Поэтому мы должны определить, что представляют собой входные и выходные сигналы органа зрения человека, и дать их четкое математическое описание. Для рассмотрения этого вопроса воспользуемся схемой рис. 2. На ней дан эскиз преобразования информации в органе зрения человека. Перед глазом 1 расположена зрительная картина 2, созданная в поле зрения. Выделим в поле зрения точку фиксации o и проведем через нее горизонтальную и вертикальную оси. Координатами x и y произвольной точки M поля зрения будем называть соответственно углы $oo'a$ и $oo'b$:

$$x = \angle oo'a, \quad y = \angle oo'b. \quad (1)$$

Точка o' расположена внутри хрусталика глаза.

Каждой точке поля зрения соответствует входной сигнал E_λ , характеризующий зрительную картину в этой точке в данный момент времени.

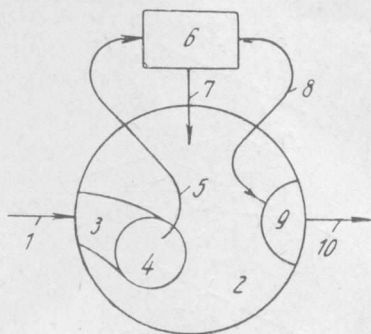


Рис. 1

Носителем информации о зрительной картине являются исходящие от нее световые лучи, попадающие в глаз наблюдателя. Световое излучение может быть охарактеризовано энергией W , которую оно в себе несет. Энергия светового излучения непосредственно измеряется специальными приборами, которые преобразуют ее в тепловую энергию.

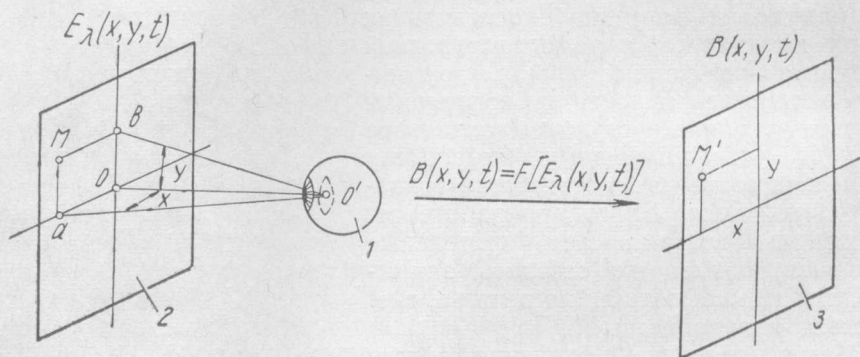


Рис. 2

Излучение поверхности объекта в данный момент времени характеризуется лучистым потоком F , представляющим собой производную энергии W по времени t :

$$F = \frac{dW}{dt}. \quad (2)$$

Излучение в данной точке поверхности объекта характеризуется плотностью излучения R , равной

$$R = \frac{dF}{ds}, \quad (3)$$

где ds — площадь элементарного участка, охватывающего данную точку поверхности, dF — поток, излучаемый с участка ds .

Излучение точкой поверхности объекта в заданном направлении характеризуется удельной силой излучения I , которая представляет собой плотность излучения dR , отнесенную к элементарному телесному углу $d\omega$, охватывающему заданное направление (рис. 3):

$$I = \frac{dR}{d\omega}. \quad (4)$$

Лучистая яркость определяется аналогично удельной силе излучения, с той лишь разницей, что принимается в расчет не площадка ds поверхности объекта, а ее проекция ds' на плоскость, перпендикулярную зрительной оси (рис. 4).

Лучистая яркость равна

$$E = \frac{1}{\cos \alpha} I, \quad (5)$$

где α — угол между нормалью к поверхности объекта и зрительной осью.

Уровень лучистой яркости полностью характеризует излучение, но лишь тогда, когда оно является монохроматическим. Если излучение имеет линейчатый спектр и представляет собой смесь колебаний, с ограниченным числом n различных длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, входной сигнал становится многомерным вектором $E\lambda$. Компонентами этого вектора бу-

дут яркости E_1, E_2, \dots, E_n отдельных монохроматических излучений, входящих в состав смешанного излучения.

Если же излучение имеет сплошной спектр, то входной сигнал превращается в вектор E_λ с бесконечно большим числом компонент, причем каждой длине волны излучения λ соответствует свой компонент E_λ , называемый спектральной интенсивностью лучистой яркости.

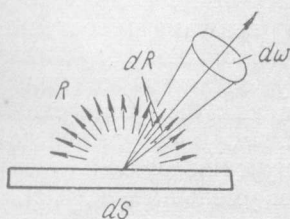


Рис. 3

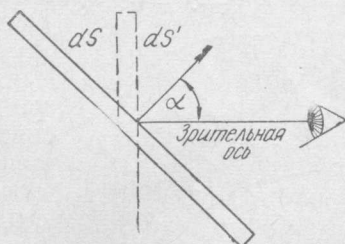


Рис. 4

Обозначим через dE лучистую яркость, присущую излучению в элементарной области спектра $d\lambda$, которая охватывает заданную длину волны λ . Тогда спектральная интенсивность лучистой яркости определится следующим выражением:

$$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda}. \quad (6)$$

Любая конкретная зрительная картина, заданная в поле зрения, может быть математически описана в виде функции входного сигнала E_λ от координат поля зрения x, y и времени t (рис. 2):

$$E_\lambda = E_\lambda(x, y, t). \quad (7)$$

Таким образом, в принципе можно математически описать любую зрительную картину, изменяющуюся в пространстве и времени.

В органе зрения человека осуществляется преобразование зрительной картины в зрительное ощущение Z (рис. 2). Зрительное ощущение также задано в двумерном поле. Точке M' зрительного ощущения приписываем координаты x, y соответствующей точки M зрительной картины.

Зрительное ощущение в каждой точке поля зрения характеризуется цветом. Считается, что цвет может быть разложен на три компонента: цветовой тон, насыщенность и светлоту. Цветовой тон обозначают словами: «красный», «синий», «зеленый», «фиолетовый» и т. д. Зрительные ощущения различного цветового тона можно получить, подавая на вход органа зрения монохроматические излучения с различной длиной волны. Каждой длине волны излучения соответствует свой цветовой тон зрительного ощущения. Так, например, излучению с длиной волны $0,40 \text{ мк}$ соответствует фиолетовый цветовой тон; $0,48 \text{ мк}$ — синий; $0,52 \text{ мк}$ — зеленый; $0,58 \text{ мк}$ — желтый; $0,70 \text{ мк}$ — красный. Электромагнитные колебания с длинами волн, выходящими за пределы $0,38 \div 0,77 \text{ мк}$, совсем не дают никаких зрительных ощущений.

Некоторые новые цветные тона можно получить, подавая на вход органа зрения смесь коротковолновых и длинноволновых излучений (например, монохроматические излучения с длинами волн $0,46$ и $0,63 \text{ мк}$). Изменяя пропорции лучистой яркости коротковолновых и длинноволновых излучений в смеси, мы получим пурпурные цветные тона — малиновый и сиреневый.

Опыт показывает, что множество всевозможных цветовых тонов сбразует замкнутый ряд: оно подобно множеству точек замкнутой линии. Следуя Ньютону, все цветовые тона изображают в виде точек окружности, причем каждой точке соответствует свой цветовой тон (рис. 5).

Подадим на вход органа зрения монохроматическое излучение с длиной волны 0,58 мк, что соответствует желтому цветовому тону, и добавим к нему излучение с длиной волны 0,48 мк, соответствующее синему цветовому тону. Если яркость второго излучения выбрана небольшой, мы увидим, что цветовой тон полученного цвета по-прежнему остается желтым, однако цвет становится как бы более выцветшим, менее насыщенным. При увеличении яркости второго излучения степень насыщенности цвета будет уменьшаться, пока, наконец, желтизна в нем вовсе не исчезнет, после чего цвет станет совершенно серым без примеси какого-либо цветового тона. Такой цвет называют ахроматическим.

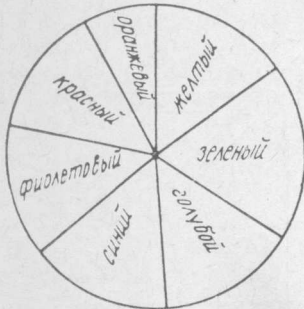


Рис. 5

На цветовом круге Ньютона (рис. 5) цветам одного и того же тона, но разной насыщенности соответствуют точки прямой, соединяющей центр круга с точкой на окружности, представляющей собой заданный цветовой тон. Центр круга соответствует ахроматическому цвету. Наиболее насыщенным цветам отвечают точки на окружности круга.

Подадим теперь на вход органа зрения некоторое произвольное излучение. В результате возникает цвет вполне определенного цветового тона и насыщенности, которому на цветовом круге соответствует *некоторая точка*. Не изменяя спектрального состава излучения, увеличим его лучистую яркость. При этом окажется, что новый цвет почти в точности сохраняет прежний цветовой тон и насыщенность, однако изменяется по светлоте, становясь светлее. При уменьшении яркости излучения светлота уменьшается и цвет темнеет.

Проведем прямую, перпендикулярную плоскости цветового круга, через точку, соответствующую цветовому тону и насыщенности возникающего цвета. Каждой точке этой прямой будет соответствовать цвет вполне определенной светлоты данного цветового тона и насыщенности. Зрительные ощущения могут изменяться по светлоте — от совершенно темного оттенка, при котором никакие объекты уже не различаются, до ослепительно яркого, едва выносимого глазом. Таким образом, линия, вдоль которой происходит изменение светлоты, ограничена как сверху, так и снизу.

Рассматривая цвета, изменяющиеся по светлоте при всевозможных цветовых тонах и насыщенностях, мы приходим к понятию цветового тела (рис. 6). Каждой точке внутри цветового тела соответствует свой цвет, обладающий вполне определенным цветовым тоном, насыщенностью и светлотой. Опыт показывает, что любому цвету зрительного ощущения может быть поставлена в соответствие только одна точка внутри цветового тела. Следует отметить, что в действительности множество всевозможных цветов образует не цилиндр, как показано на рис. 6, а тело неправильной формы, приблизительно соответствующей форме шара (шар Рунге).

Таким образом, зрительное ощущение в каждой точке поля зрения можно описать с помощью трехмерного вектора цвета B , компонентами которого служат светлота B_1 , насыщенность B_2 и цветовой тон B_3 (рис. 6),

Зрительное ощущение в целом, так же как и зрительная картина, описывается некоторой зависимостью цвета B от координат поля зрения x, y и времени t (рис. 2):

$$B = B(x, y, t). \quad (8)$$

После того как введены в рассмотрение входной $E_\lambda(x, y, t)$ и выходной $B(x, y, t)$ сигналы органа зрения, мы можем более строго и детально сформулировать задачу математического моделирования зрения человека. Она состоит в том, чтобы отыскать алгоритм F преобразования входного сигнала органа зрения в выходной (рис. 2):

$$B(x, y, t) = F[E_\lambda(x, y, t)]. \quad (9)$$

Этот алгоритм F преобразует бесконечномерную вектор-функцию $E_\lambda(x, y, t)$ трех переменных x, y, t в трехмерную вектор-функцию $B(x, y, t)$ тех же переменных. Можно считать, что алгоритм F есть некоторый оператор, который ставит в соответствие вектор-функциям $E_\lambda(x, y, t)$ вектор-функции $B(x, y, t)$. Исходя из повседневного опыта зрения, можно заключить, что этот оператор непрерывен, поскольку всегда при непрерывном изменении зрительной картины $E_\lambda(x, y, t)$ мы наблюдаем непрерывное изменение зрительного ощущения $B(x, y, t)$.

Даже не опираясь на специальные эксперименты, а используя повседневную практику зрения каждого человека, можно заключить, что искомый оператор зрения F не будет очень простым. Напротив, легко прийти к выводу о его большой сложности. Этот оператор должен воспроизводить разнообразные свойства цветового зрения, инерции и иррадиации зрения, адаптации и контраста.

В связи с этим имеет смысл разбить общую задачу об отыскании оператора F на ряд более простых задач.

Наиболее простой будет постановка задачи, если ограничить класс входных сигналов лишь однородными и стационарными зрительными картинами. Однородной мы называем такую зрительную картину, у которой излучения во всех ее точках одинаковы. В этом случае входной сигнал E_λ не зависит от координат поля зрения x, y , а зависит лишь от времени t : $E_\lambda = E_\lambda(t)$.

Стационарной назовем такую зрительную картину, у которой излучения во всех точках поля зрения не меняются со временем. Иными словами, функция E_λ , описывающая зрительную картину, не зависит от времени, а лишь от координат поля зрения, т. е. $E_\lambda = E_\lambda(x, y)$.

Функция, описывающая однородную и стационарную зрительную картину, не зависит от координат поля зрения и времени и является спектром излучения $E_\lambda = E(\lambda)$. Эта картина представляет собой равномерное поле сигналов, не меняющееся со временем. Опыт показывает, что таким зрительным картинам соответствует зрительное ощущение, также являющееся однородным и стационарным, т. е. не зависящим от координат поля зрения. Зрительное ощущение имеет вид равномерного фона одного цвета, заполняющего все поле зрения. Выходной сигнал представляет собой трехмерный вектор B .

Далее можно усложнить задачу, расширив класс входных сигналов

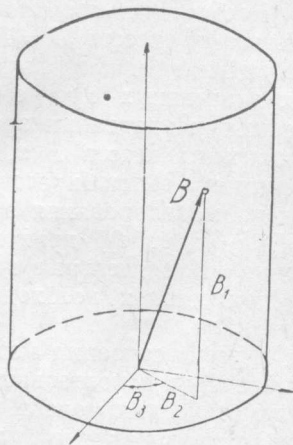


Рис. 6

за счет введения нестационарных зрительных картин. В этом случае входной сигнал становится функцией времени, т. е. $E_\lambda = E_\lambda(t)$. Опыт показывает, что и зрительное ощущение будет представлять собой функцию времени и не будет зависеть от координат поля зрения, т. е. $B = B(t)$. Зрительное ощущение в этом случае имеет вид равномерного фона, цвет которого меняется со временем. Точно так же допускают изолированное рассмотрение задачи о связи $E_\lambda(x)$ и $B(x)$, $E_\lambda(y)$ и $B(y)$. Затем могут быть изолированно рассмотрены задачи о связи сигналов $E_\lambda(x, y)$ и $B(x, y)$, $E_\lambda(x, t)$ и $B(x, t)$, $E_\lambda(y, t)$ и $B(y, t)$. Наконец, мы приходим к общей задаче о связи между сигналами $E_\lambda(x, y, t)$ и $B(x, y, t)$.

Построение математической модели стационарных и однородных зрительных процессов $B = F[E_\lambda]$, должно основываться на фактах так называемой «низшей», и «высшей» метрики цвета. Исследование нестационарных зрительных процессов $B(t) = F[E_\lambda(t)]$ требует рассмотрения явлений инерции и адаптации зрения. Математическая модель неоднородных зрительных процессов $B(x, y) = F[E_\lambda(x, y)]$ может быть построена на основе изучения фактов иррадиации зрения и явлений зрительного контраста. Задача моделирования зрительных процессов в общем случае $B(x, y, t) = F[E_\lambda(x, y, t)]$ приводит к необходимости изучения реакций органа зрения на зрительные картины произвольной сложности. Таким образом, мы приходим к необходимости освоения обширного экспериментального материала.

При построении математических моделей зрения представляется целесообразным использовать следующую методику. Вначале конструируется математическая модель, хотя бы в качественном отношении воспроизводящая ту или иную область фактов зрения. Затем на основе этой модели чисто дедуктивным путем определяются предсказываемые зрительные реакции, которые сравниваются с фактическими реакциями глаза. Модель считается заслуживающей внимания, если хотя бы некоторые из предсказаний, полученных на ее основе, совпадают с фактическими реакциями органа зрения. После этого решается задача построения такой новой модели, которая была бы в логическом отношении равносильна следствиям из прежней модели, которые оправдали себя на опыте. Новая модель отличается от первоначальной тем, что в ней устранены детали, справедливость которых не удалось подтвердить на опыте. В тех случаях, когда такая задача решена, мы получаем модель, логически вытекающую из надежно установленных экспериментальных законов, принимаемых в качестве аксиом. Степень достоверности такой модели определяется лишь надежностью установления соответствующих экспериментальных законов.

Полное осуществление изложенной программы означало бы получение достоверной и исчерпывающей информации об операторе человеческого зрения $B(x, y, t) = F[E_\lambda(x, y, t)]$.