

007(06)
П 78

ПРОБЛЕМЫ

МАШИНЫ

БЮЖЕ

800%4

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР
ХАРЬКОВСКИЙ ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

007(06)
П 78

ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

Республиканский
межведомственный
научно-технический
сборник

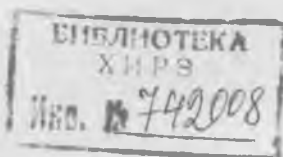
Выпуск 20

Основан в 1968 г.

ХНУРЕ Problemv byonyky



742008



Харьков
ИЗДАТЕЛЬСТВО ПРИ ХАРЬКОВСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
ИЗДАТЕЛЬСКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ «ВИЩА ШКОЛА»
1978

УДК 62.506.2

Проблемы бионики, вып. 20. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, 157+4 с.

Сборник посвящен вопросам математического и физического моделирования процессов переработки информации на различных уровнях нервной системы. Обсуждаются различные аспекты интеллектуальной деятельности человека. Описываются результаты исследований процессов переработки словесной информации, распознавания зрительных образов, психологические аспекты деятельности операторов сложных систем. Рассматриваются вопросы кодирования биомедицинской информации, математические модели спектральной чувствительности органа зрения человека.

Предназначен для научных работников и специалистов в области кибернетики, вычислительной техники, инженерной психологии, биологии и медицины.

Списки лит. в конце статей.

Редакционная коллегия: *Н. М. Амосов, Ю. П. Бугай* (отв. секр.), *А. А. Волков, В. А. Грабина, А. В. Дабалян, К. А. Иванов-Муромский, А. Г. Мурашко, Е. П. Пуятин, В. Г. Червов* (зам. отв. ред.), *Ю. П. Шабанов-Кушнарченко* (отв. ред.).

Адрес редакционной коллегии: Харьков, пр. Ленина, 14, институт радиоэлектроники. Тел. 40-96-45.

Редакция естественнонаучной литературы

30501 — 515
П — М226(04) — 78 414 — 78

© Издательское объединение «Вища школа», 1978.

УДК 62—501.72

*А. А. КРЮКОВ, А. Б. КАРУНИН,
Ю. И. КЛЫКОВ, М. В. ВОЛЧЕНКО*

ПРИНЦИПЫ ОБУЧЕНИЯ В СИСТЕМАХ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Создание ситуационных систем искусственного интеллекта связано с исследованием механизмов формирования семиотических моделей в процессе обучения и разработкой соответствующих алгоритмов. Построение семиотических моделей предполагает наличие двух уровней представления информации в обучающейся системе: микроуровня, служащего для фиксации эмпирических знаний об исследуемых объектах, и макроуровня, на котором формируется теория.

К ситуационным системам, обладающим этим свойством, могут быть применены два способа обучения: обучение через примеры и обучение через описание. Первое состоит в том, что в результате демонстрации на микроуровне конкретных примеров происходит формирование единичных понятий макроуровня, составляющих базис для последующего индуктивного обобщения. Обучение через описание предполагает наличие языка, достаточно богатого для введения новых объектов через указание их свойств или отношений к другим объектам.

Двум уровням представления информации соответствуют микроязык и макроязык: микроязык служит для представления значений (объемов) понятий, а соответствующие имена и смыслы (содержания) этих понятий представлены в макроязыке. При этом процесс обучения рассматривается как такое взаимодействие указанных языков, в результате которого в макроязыке формируются новые понятия.

Структурно-функциональный анализ этого взаимодействия дает возможность наиболее полно выявить элементы процесса обучения, непосредственно связанные с семантическим и прагматическим аспектами процедуры формирования понятий. В результате такого анализа формулируются требования к структуре и способу функционирования обучающейся системы. Таким образом, рассматриваемые здесь принципы построения ситуационных обучающихся систем существенно отличаются от

принципов, описанных, например, в [1, 2, с. 107—112]. Данная работа является развитием теории, изложенной в [3, 4, 5, с. 10—18]. При этом акцент делается на тех аспектах построения программ-конструкторов семиотических моделей, которые непосредственно связаны с формированием этими программами правил корреляции ситуаций.

Микроязык. Под ситуацией в микроязыке (языке графов) понимают множество базовых понятий с заданным на нем множеством базовых отношений. Поступление информации на микроуровень интерпретируется как показ конкретных примеров. Поэтому в режиме обучения на микроуровень поступают примеры конкретных обучающих пар, состоящих из исходной и целевой ситуаций. На этих примерах происходит выделение указанных учителем n -х элементов, образующих ситуативные структуры. В режиме исполнения (рабочем режиме) на микроуровень поступают исходная и целевая ситуации задачи и фиксируются возникающие в процессе преобразований текущие ситуации.

Макроязык. В качестве макроязыка используется язык прикладного исчисления предикатов. На макроуровень поступает та часть входной информации, которая ассоциируется со словесным описанием. Выражениям микроязыка соответствуют единичные понятия макроязыка. Кроме того, на макроуровень заносят схемы аксиом, отражающих свойства базовых отношений, в терминах которых происходит формирование правил корреляции и трансформации ситуаций.

Взаимодействие языков. Два указанных уровня не являются независимыми. Программа-конструктор содержит алгоритм отображения, ставящего в соответствие элементам множества базовых понятий, представленных в микроязыке, константы (имена) макроязыка, отношениям — предикатные символы, соотношениям между фиксированными элементами множества базовых понятий — атомарные формулы, свободные от переменных, и, наконец, произвольным фрагментам ситуаций (подструктурам) — соответствующие формулы, описывающие эти фрагменты, возможно, с точностью до изоморфизма.

Программа содержит также алгоритмы, ставящие в соответствие формулам макроязыка, выражающим содержания понятий, объемы этих понятий, выделяемые на микроуровне. Усвоение материала при обоих видах обучения требует подключения программ обработки материала обоих уровней. Действительно, при обучении через примеры главной задачей является установление содержания понятия о ситуативных структурах на основе выделения учителем элементов объема этих понятий во множестве обучающих ситуаций.

Задачи, возникающие при обучении через описание, связаны с рассмотрением статической и динамической структур системы объяснений, с выявлением ее возможной неполноты и последую-

щим пополнением. Такое пополнение может осуществляться путем анализа контекста отдельно взятого элементарного объяснения или расширения макроописания как за счет информации, поступающей от учителя непосредственно на макроуровень, так и за счет обращения к микроуровню. Поскольку в обоих случаях конечной целью обучения является формирование программы действий с объектами внешнего мира, фиксируемой в терминах некоторых понятий, необходимо ввести два информационных уровня. При этом микроуровень содержит детальную информацию о структуре и последовательных этапах функционирования исследуемых объектов, а макроуровень — в основном ту информацию, которая необходима для формирования указанных понятий.

Обучение через примеры. Далее рассмотрим один из видов обучения — обучение через примеры. Основанием для выбора данного объекта исследований явились следующие соображения. Во-первых, использование определений через примеры является необходимым компонентом обучения языку, в особенности на начальном этапе, когда устанавливается соответствие между знаком и обозначаемым им объектом. В связи с этим естественно начинать исследование процесса обучения машинной программы именно с данного вида обучения. Во-вторых, процесс усвоения при данном виде обучения, несмотря на его относительную простоту, требует обработки материала обоих информационных уровней, тем самым во многом определяя требования к структуре и объему базовой сферы знаний.

В этом случае процесс обучения программы складывается из двух основных этапов, различающихся по доминирующей роли одного из языков. Микроязык, дающий на первом этапе возможность демонстрировать конкретные ситуации и способы установления ситуативных отношений, недостаточно богат для выделения и описания общих свойств и закономерностей исследуемой системы. Поэтому следующим этапом является переход к соответствующим описаниям в макроязыке. На этом шаге устанавливается взаимно-однозначное соответствие между структурами микроязыка и формулами некоторого фрагмента макроязыка. Речь идет лишь об определенном фрагменте, поскольку в дальнейшем используются не все средства макроязыка.

Последующее рассмотрение процесса обучения через примеры проводится в рамках следующих основных предположений. 1. Целевая ситуация задается на микроуровне, т. е. на том же языке, что и исходная ситуация. 2. Рассматриваются стратегии преобразования ситуаций, для описания которых существенны лишь те отношения, которые входят в структуру данной пары текущей и целевой ситуаций. 3. Базовые отношения, вычленение которых необходимо для описания стратегии на произвольном шаге решения задачи преобразования ситуаций, явно

представлены в структурах исходной и целевой ситуаций. Кроме того, в целях упрощения принято предположение о том, что в рассматриваемых системах имеет место одноуровневый процесс формирования производных понятий, при котором каждой ситуативной структуре отвечает соотношение между базовыми понятиями, связанное с возможностью или необходимостью применения к паре этих понятий одного из преобразующих операторов.

Опишем основные функции программы-конструктора в рассматриваемом случае обучения с учетом указанных ограничений. С этой целью рассмотрим по отдельности два аспекта построения обучающейся программы, связанные с решением ею двух различных подзадач в период обучения — подзадачи формирования правил корреляции и подзадачи формирования трансформационных правил. В рамках предположения об одноуровневости процесса формирования понятий процедура построения правил корреляции непосредственно сводится к нахождению условий применимости операторов, осуществляющих трансформацию ситуаций на нижнем уровне. Поскольку исходным пунктом в установлении этих правил является множество конкретных обучающих ситуаций, эти условия могут быть выявлены только в результате обобщения конкретных примеров образования ситуативных структур.

Указанные учителем примеры демонстрируют возможность применения операторов к элементам, образующим данные структуры в ситуациях обучающей совокупности. Таким образом, задача построения условий применимости операторов сводится к установлению связи ситуативных отношений, демонстрируемых учителем на отдельных примерах, с известными базовыми отношениями. Установление этой связи состоит в формировании описаний ситуативных отношений и соотнесении этих описаний в качестве содержания терминам, вводимым учителем при именовании ситуативных структур.

Множество неструктурированных обучающих ситуаций микроуровня представляет собой класс моделей теории, язык которой содержит предикатные буквы, являющиеся общими именами для однотипных базовых отношений в этих ситуациях, и аксиомами которой есть априорно заданные аксиомы базовых отношений. Процесс структурирования (установления ситуативных отношений) на микроуровне заключается в выделении учителем в ситуациях обучающей совокупности пар элементов множества базовых понятий, образующих ситуативные отношения. При этом происходит переход от рассмотрения класса исходных моделей к классу моделей, обогащенных ситуативными отношениями.

Соответственно на макроуровне имеет место переход от теории исходного класса к теории класса структурированных моделей, содержащей в качестве своих аксиом аксиомы для базовых

вых отношений, а также аксиомы, вводящие новые предикатные символы с помощью определений, построенных из символов базовых отношений. Это является следствием предположения о том, что ситуативные отношения могут быть выражены в терминах базовых отношений, явно представленных в структуре исходной и целевой ситуаций. Таким образом, задачей системы при обучении через примеры на этапе формирования правил корреляции является построение соответствующих аксиом на макроуровне в результате анализа операций микроуровня, порождающих константные частные случаи различных следствий таких аксиом.

Поясним сказанное более подробно. При переходе к описаниям в макроязыке элементарным структурам микроязыка ставятся в соответствие формулы

$$R_i(a), R_j(a, b) \quad (1)$$

или

$$\exists \xi R_k(\xi, a), \exists \xi R_l(a, \xi), \exists \xi R_m(\xi, b), \exists \xi R_n(b, \xi), \quad (2)$$

содержащие константы, которые являются именами выделенных учителем элементов, причем все переменные, входящие в эти формулы, связаны кванторами существования.

Пусть A, B, C — описания некоторых ситуаций, представляющие собой конъюнкции формул (1), (2). Общую схему таких описаний можно представить в виде

$$\exists \xi_1 \dots \exists \xi_p \exists \xi_{p+1} \dots \bar{\exists} \xi_{p+k} C(\xi_1, \dots, \xi_{p+k}, a, b), \quad (3)$$

где слева указаны все входящие в данное описание кванторы, а в скобках перечислены все индивидуальные константы и переменные. Тогда формулы, описывающие примеры установления ситуативного отношения S между выделенными элементами a и b , принимают вид

$$A \supset S(a, b). \quad (4)$$

Формулы типа (4) имеют место в случае «положительных» примеров, т. е. примеров на установление ситуативных отношений. Однако важную функцию в обучении выполняют также «отрицательные» примеры, указывающие на случаи, в которых установление таких отношений невозможно. Действительно, для дальнейшего формирования обобщенных правил установления ситуативных отношений на некотором множестве ситуаций в общем случае необходимо не только «строить» это множество изнутри, но и ограничивать его извне с помощью отрицательных примеров. В макроязыке таким примерам соответствуют формулы

$$B \supset \bar{S}(a, b). \quad (5)$$

Результатом демонстрации обучающих примеров обоих типов является формирование в макроязыке двух списков формул:

$$A_1 \supset S(a_1, b_1), \dots, A_m \supset S(a_m, b_m), \quad (6)$$

$$B_1 \supset \bar{S}(a'_1, b'_1), \dots, B_n \supset \bar{S}(a'_n, b'_n). \quad (7)$$

На этом процесс накопления базисной информации заканчивается.

Первый этап обобщения состоит в замене константных имен переменными. Поскольку $a_1, \dots, a_m, a'_1, \dots, a'_n$ и $b_1, \dots, b_m, b'_1, \dots, b'_n$ представляют собой имена соответственно первого и второго элементов пары, относительно которой утверждается лишь наличие или отсутствие некоторого бинарного отношения S , то для всех $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$ первые элементы пар (a_i, b_i) и (a'_j, b'_j) заменяются на x , а вторые элементы — на y . При этом все остальные вхождения $a_i(b_i)$ в A_i также заменяются на $x(y)$. Аналогичная замена производится для вхождений a'_j, b'_j в B_j . В дальнейшем следует обратить внимание на взаимодействие индуктивных и дедуктивных элементов в процессе обучения: предлагаемая модель обучения позволяет достаточно четко выявить их соотношение на различных этапах этого процесса. В данном случае дедукция используется для приведения формул, полученных на первом этапе обобщения, к выражению вида

$$(A_1 \vee \dots \vee A_m) \text{ und } (\bar{B}_1 \vee \dots \vee \bar{B}_n) \supset S(x, y), \quad (8)$$

и для последующего приведения левой части этого выражения к некоторой эквивалентной ему дизъюнктивной форме Φ .

Второй этап обобщения состоит во введении кванторов общности по всем свободным переменным полученной формулы (8), что дает

$$\forall x \forall y (\Phi \supset S(x, y)). \quad (9)$$

И, наконец, на третьем этапе в формуле (9) производится замена импликации на эквивалентность.

Таким образом, по окончании обучения на макроуровне описания ситуаций должны быть построены формулы исчисления предикатов, имеющие в общем случае вид

$$\forall x \forall y (S_j(x, y) \sim \Phi_j(u_1(x), \dots, u_{s_j}(x), v_1(y), \dots, v_{s_j}(y), w_1(x, y), \dots, w_{s_j}(x, y))), \quad (10)$$

где u, v, w — некоторые унарные и бинарные предикатные символы, соответствующие «базовым признакам» элементов, образующим ситуативные структуры в задачах некоторого класса. Эти символы замещают формулы вида (2), (3). Существенно, что в наиболее общем случае заранее не принимается никаких предположений относительно этих признаков, т. е. вид их должен быть установлен в процессе обучения. Однако вряд ли такой общий подход всегда целесообразен.

В различных системах можно предусмотреть, в зависимости от обстоятельств, различную степень жесткости первоначально заданной в машине процедуры выделения полезных признаков, в соответствии с которой кое-какие базовые признаки считаются принадлежащими заранее фиксированному множеству, другие же формируются в процессе обучения. В частности, в данной работе используется предположение о том, что применяемая учителем при структурировании процедура сопоставления текущей и целевой ситуаций является известной, т. е. заранее заложена в машину в виде некоторых алгоритмов.

Предполагается также, что принятый учителем способ сличения ситуаций основан на выделении отдельных фрагментов в этих ситуациях и последующем сопоставлении выделенных фрагментов по заданному правилу. Это означает разделение базовых признаков на два подмножества: первое подмножество, содержащее признаки, построенные только с использованием имен предикатов, заданных в текущей ситуации (так называемые семантические признаки), и второе подмножество, содержащее прагматические признаки. Прагматическими здесь названы те признаки, в описания которых входят также имена базовых отношений, заданных в целевой ситуации.

Поскольку установление значения произвольно взятого прагматического признака можно трактовать как частичный результат, характеризующий некоторую процедуру сопоставления, то, в силу ранее сделанных предположений, установление структуры существенных прагматических признаков сводится лишь к обобщению заданного типа описаний, фиксируемых на макроуровне. А именно: обобщаются описания, возникающие на этом уровне при определении значений фиксированной в машине совокупности свойств. Эти свойства устанавливаются учителем для элементов, входящих в состав ситуативных структур, заданных на микроуровне.

Предполагается также, что вид семантических признаков должен определяться программой-конструктором в результате обобщения описаний макроуровня для выделенных учителем фрагментов ситуаций микроуровня. Это означает необходимость выделить те фрагменты текущих ситуаций, вхождение в которые элементов, образующих ситуативные структуры, обуславливает формирование ситуативных структур. Такие фрагменты указываются учителем лишь с помощью перечисления входящих в них элементов. При этом выделение соответствующих подструктур, построенных на данных элементах, определение возможности их расширения с сохранением ситуативных отношений, а также описание этих подструктур и возможных ограничений на контекст в макроязыке производится программой-конструктором.

В рамках предположения об одноуровневости процесса формирования понятий условия применимости операторов должны

формироваться учителем в терминах базовых отношений непосредственно за один шаг. В таком случае стратегия учителя не может содержать этапов формирования каких-либо других понятий, отличных от понятий о ситуативных структурах, связанных с возможностью применения этих операторов. Поэтому элементарными сомножителями дизъюнктивной формы Φ , не содержащими символов отношений, заданных в цели, могут быть либо атомарные формулы вида

$$R_{i_1}(x), \dots, R_{i_k}(x), R_{i_{k+1}}(x, y), \dots, R_{i_l}(x, y), \\ R_{i_{l+1}}(y), \dots, R_n(y), \quad (11)$$

выражающие простейшие индивидуальные или взаимные свойства элементов x, y , входящих в ситуативные структуры, либо формулы

$$\overline{\exists} \xi R_i(\xi, x), \overline{\exists} \xi R_j(x, \xi), \overline{\exists} \xi R_k(\xi, y), \overline{\exists} \xi R_l(y, \xi), \quad (12)$$

служащие для ограничения контекста, в который могут входить эти элементы. Наличие более сложных выражений для «базовых признаков» потребовало бы дополнительных этапов формирования производных понятий вопреки сделанному предположению.

Таким образом, для выделяемых учителем базовых элементов микроуровня x и y при данном рассмотрении формируются описания макроуровня, содержащие формулы семантических признаков только типа (11), (12). Такое ограничение на возможный вид семантических признаков в определенной мере регламентирует состав фиксируемой системы предикатов, отвечающей прагматическим признакам в задачах исследуемого класса. Действительно, в силу характера приведенных формул совокупность семантических признаков может включать признаки, носящие наиболее общий характер, т. е. выражающие свойства элементов ситуативных структур, релевантные произвольным понятиям, характеризующим включение этих элементов в контексте исходной ситуации. Естественно потребовать той же степени общности и в отношении прагматических признаков. Эта общность достигается в результате того, что сличение ситуаций (или отдельных их фрагментов) происходит с использованием свойства «совпадения», определенного на парах ситуаций и имеющего два значения: «полное совпадение» и «несовпадение». При этом в качестве сопоставляемых фрагментов могут выступать или сами обучающие ситуации в целом, или некоторые окрестности элементов, образующих ситуативные структуры, или сами эти элементы (окрестности нулевого уровня).

Поскольку в систему введены и используются недедуктивные правила, то полученные в результате их применения формулы типа (10) требуют проверки на контрольных примерах, которые предполагают сведение общих положений к их частным

случаям. Следует отметить, что усиление требований к базису (большее количество демонстрируемых примеров или дополнительные методы их отбора учителем) уменьшают вероятность ошибки, но одновременно снижают «творческие» возможности системы. До проверки каждая из формул типа (10) является гипотезой. Контрольный пример может показать, что гипотеза неверна (т. е. в данном случае ситуативное отношение не возникает там, где оно должно было возникнуть). Тогда данный пример присоединяется к первоначальному списку примеров и исходя из дополненного таким образом базиса формируется новая гипотеза.

Что касается механизма формирования трансформационных правил, то в простейшем случае он представляет собой алгоритм установления отношений предпочтения на множестве ситуативных структур $S_i(x, y)$, каждая из которых представлена своим типом и при фиксированном типе, соответствующим способом формирования. Каждому способу образования ситуативной структуры соответствует свое слагаемое в дизъюнктивной форме Φ , полученной на предыдущем этапе построения семиотической модели.

Конкретный пример. В качестве иллюстрации изложенных выше принципов рассмотрим способ построения и функционирования обучающейся программы, ориентированной на формирование семиотических моделей систем, описание ситуаций в которых требует задания лишь одного базового отношения — объединения древесных порядков. Пусть на конечном множестве M задано отношение $P \subset M \times M$ типа «объединения отношений древесного порядка». Пусть D — редукция этого отношения. Графом отношения D является совокупность ориентированных деревьев (ордеревьев). Ниже для обозначения графов и соответствующих им бинарных отношений используются одни и те же символы.

Пусть имеется также другая совокупность ордеревьев с вершинами из $M^0 \subset M$ — целевая совокупность D^0 , которой соответствует отношение древесного порядка P^0 , заданное на M^0 . На множестве пар вершин произвольной совокупности ордеревьев определим операторы O_1 и O_2 следующим образом. Оператор O_1 применим к любой паре смежных вершин дерева и преобразует его, удаляя дугу, соединяющую эти две вершины. O_2 — оператор, обратный к O_1 : он применим к паре вершин графа D , лежащих на различных деревьях, в том случае, если одна из этих вершин является корнем. Результатом применения O_2 является ордереву.

Очевидно, что, последовательно применяя операторы O_1 и O_2 , можно множеством различных способов осуществить преобразование исходной совокупности ордеревьев в целевую, при отсутствии каких-либо дополнительных ограничений на способ преобразования. Пусть имеется некоторая стратегия из числа стратегий (удовлетворяющих перечисленным выше требованиям) преобразо-

вания исходной совокупности ордеревьев в целевую с применением лишь операторов O_1 и O_2 .

Применяющий эту стратегию учитель демонстрирует ее на серии конкретных примеров. Задачей обучающейся программы является описание этой стратегии, так же как и любой другой стратегии, принадлежащей выделенному классу, и использование ее в процессе преобразования произвольно выбранной исходной совокупности ордеревьев в соответствующую ей целевую совокупность. Ясно, что решение этой задачи обеспечивает описание стратегий преобразования в различных предметных областях. При этом элементам множества M становятся в соответствие базовые понятия предметной области; совокупности деревьев D — конкретное отношение на множестве базовых понятий, а последовательности применения операторов O_1, O_2 — цепочка преобразований, переводящая исходную ситуацию в целевую. Заметим, что из условия одноуровневости формирования понятий в данном случае следует образование только двух типов ситуативных структур:

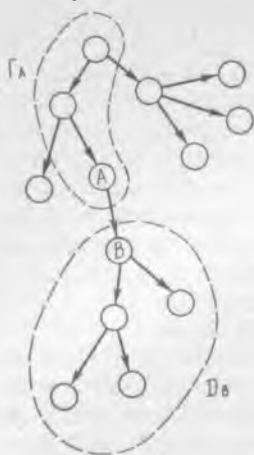


Рис. 1.

$xS_1y \equiv$ «к паре точек x, y можно применить оператор O_1 »;

$xS_2y \equiv$ «к паре точек x, y можно применить оператор O_2 », причем каждое из соответствующих им правил может быть сформулировано лишь в терминах отношений P, P^0, D, D^0 .

В дальнейшем будем считать выполненными следующие два дополнительных требования:

а) применение правил корреляции типа (10) совместно с правилами трансформации в задачах q -го класса ($q = 1, 2, \dots, Q$) за конечное число шагов приводит к достижению цели для произвольной пары объединений ордеревьев (D, D^0) ;

б) включение пары (x, y) в ситуативное отношение S_i происходит в соответствии со структурой фрагментов текущей ситуации, построенных на элементах множества M , сравнимых с x, y по отношению P .

Рассмотрим в качестве одного из обучающих примеров ордеревья D с вершинами из $M_D \subseteq M$ и соответствующее ему целевое дерево D^0 . Пусть пара смежных вершин дерева D связана ситуативным отношением «к паре точек A, B можно применить оператор O_1 » (см. рис. 1). Обозначим через Γ_A путь, ведущий из корня K дерева D в вершину A ; (A, B) — дугу, имеющую своим началом A и концом B ; D_B — максимальное поддеревья ордеревья D , имеющее B своим корнем. Представление пары ориентированных графов D, D^0 и ситуативного отношения, включающего (A, B) , реализуется на микроуровне так, как это описано выше. Соот-

ветствующее описание макроуровня строится на базе формул вида (1), (2), а также на базе высказываний, порождаемых процедурой сличения ситуаций. В данном случае процедура сличения основана на выделении окрестностей Γ_A и D_B точек A, B в исходном дереве и сопоставлении их со структурной ситуационной цели. При этом свойство «совпадение», определенному на множестве пар ситуаций, соответствует разбиение этого множества на подмножества «совпадающих», «частично совпадающих» и «полностью несовпадающих» ситуаций.

В том случае, когда D_B является подструктурой D^0 , имеет место совпадение; если ни одна из вершин ордерова D_B не входит в M^0 , имеет место полное несовпадение; в остальных случаях ситуации частично совпадают. Для каждой пары «выделенная окрестность — целевая ситуация» фиксируется ее принадлежность к одному из перечисленных подмножеств. Для этого процедура порождения генерирует в макроязыке истинные высказывания, утверждающие наличие или отсутствие свойств точек x и y , а также отношений между этими точками, представимых следующей системой предикатов:

1) «принадлежать цели» (x);

2) $D^0(x, y)$;

3) «являться корнем сформированного фрагмента цели» (x) \equiv

$$\equiv \forall \xi_1 \forall \xi_2 (((P(x, \xi_1) \sim P^0(x, \xi_1)) \text{ und } (P(x, \xi_2) \sim$$

$$\sim P^0(x, \xi_2)) \text{ und } ((P(x, \xi_1) \text{ und } P(x, \xi_2) \text{ und } P^0(x, \xi_1) \text{ und } P^0(x, \xi_2)) \supset \\ \supset (P(\xi_1, \xi_2) \sim P^0(\xi_1, \xi_2))));$$

4) «являться висячей вершиной сформированного пути» (x) \equiv

$$\equiv \forall \xi_1 \forall \xi_2 (((P(\xi_1, x) \sim P^0(\xi_1, x)) \text{ und } (P(\xi_2, x) \sim P^0(\xi_2, x)) \text{ und} \\ \text{und } ((P(\xi_1, x) \text{ und } P(\xi_2, x) \text{ und } P^0(\xi_1, x) \text{ und } P^0(\xi_2, x)) \supset \\ \supset (P(\xi_1, \xi_2) \sim P^0(\xi_1, \xi_2)))));$$

5) $\exists \xi (P(x, \xi) \text{ und «принадлежать цели» } (\xi))$;

6) $\exists \xi (P(\xi, x) \text{ und «принадлежать цели» } (\xi))$.

Такой способ сличения ситуаций, при котором свойство «совпадение» имеет три различных значения, позволяет обучающей программе в рамках используемого языка отличать описания множества ситуаций, в которых необходимо формировать ситуативные структуры, от тех описаний, где цель либо достигнута, либо вообще не сформулирована.

В соответствии с указанной выше последовательностью преобразований формируются правила корреляции и трансформации ситуаций. Если в результате успешно решается достаточно большая серия контрольных примеров, т. е. устанавливаются ситуативные отношения всюду, где они должны иметь место по смыслу задачи, то этап построения правил корреляции считается законченным, и множество правил фиксируется в качестве одного из блоков формируемой семиотической модели. Решению

контрольных примеров предшествует упрощение выражений типа (10). Дело в том, что процедура порождения генерирует множество всех утверждений, которые могут быть использованы для описания каждого из предъявленных конкретных примеров установления ситуативных отношений, но не все из которых являются существенными. В результате индуктивного обобщения появляется возможность выявления действительно суще-

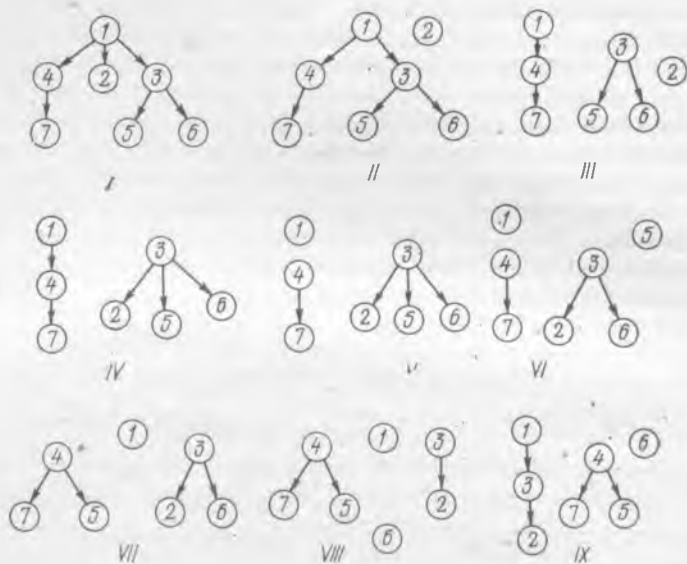


Рис. 2.

ственных признаков, образующих совокупность базовых предикатов для решения задач рассматриваемого класса. С этой целью осуществляется упрощение дизъюнктивной формы по методу, аналогичному методу Квайна — Мак-Класки [6.].

Программная реализация. Данная программа построена по блочному принципу. Каждый блок является логически независимым и реализует одну из функций, описанных ранее. Программа работает в режиме обучения и в рабочем режиме (т. е. режиме решения задач преобразования), используя результаты, полученные на данном этапе обучения. Режим обучения осуществляется в два этапа: этап формирования правил образования ситуативных структур и этап формирования правил трансформации ситуаций. На рис. 2 представлен сформированный машиной пошаговый процесс решения задачи преобразования ситуации в среде, где отношение $P(x, y)$ интерпретируется как «предмет x находится внутри предмета y ». Таким образом, оператор O_1 производит «изъятие» предмета x из пред-

мета y ; действие оператора O_2 интерпретируется как «помещение» предмета x внутрь предмета y . При этом свойства объектов рассматриваемой среды таковы, что предмет x можно изъять из предмета y только в том случае, если x находится непосредственно внутри y и не существует такого предмета z_y , что y находится внутри z_y . Аналогичным образом предмет x можно поместить внутрь предмета y только в том случае, когда не существует таких z_x и z_y , внутри которых находились бы предметы x и y соответственно. Преобразования, представленные на рис. 2, осуществляются в соответствии с правилами корреляции, полученными в машине в процессе обучения. Приведем в качестве примера одно из таких правил:

$$\forall x_1 \forall x_2 (\bar{D}(x_1, x_2) \text{ und } \bar{D}(x_2, x_1) \text{ und } D^0(x_2, x_1) \text{ und} \\ \text{und } \exists \xi D(x_1, \xi) \text{ und } \exists \xi D(x_2, \xi) \text{ und}$$

(«являться корнем сформированного фрагмента цели» $(x_2) \sim$ «к паре точек x_1, x_2 применить оператор O_2 »).

Описанная программа реализована на ЭВМ «Минск-32» на языке Рефал. Объем программы после трансляции 12 000 кодов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бенерджи Р. Теория решения задач. М., «Мир», 1972. 212 с.
2. Гладун В. П., Ващенко Н. Д. Методы формирования понятий на ЦВМ. — «Кибернетика», 1975, № 2, с. 107—112.
3. Поспелов Д. А., Пушкин В. Н. Мышление и автоматы. М., «Сов. радио», 1973. 224 с.
4. Клыкков Ю. И. Ситуационное управление большими системами. М., «Энергия», 1974. 135 с.
5. Карунин А. Б., Крюков А. А., Клыкков Ю. И. Задачи обучения в системах ситуационного управления. — «Вопросы кибернетики. Вып. 15. Ситуационное управление. Теория и практика». Часть 3. АН СССР. Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика», 1977, с. 10—18.
6. Поспелов Д. А. Логические методы анализа и синтеза схем. М., «Энергия», 1968. 328 с.

Поступила 3 ноября 1976 г.

УДК. 62.506.2

Ю. П. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО, д-р техн. наук,
В. Я. СЕРДЮЧЕНКО, канд. техн. наук, В. А. ГРАБИНА, канд. техн. наук

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ИНДУКТИВНОГО ЦВЕТОВОГО КОНТРАСТА

Настоящая работа является продолжением статьи [1], в которой описана модель индуктивных свойств зрения, отличительной особенностью которой является то, что она получена из некоторой системы аксиом дедуктивным путем.

Эта модель имеет вид

$$y = \Phi(B_1, B_2) = J[\alpha_k(B_1), \alpha_k(B_2)], \quad k = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где B_1, B_2 — функции $B(\lambda, x, y)$, описывающие распределение спектра излучения в каждой точке поля зрения; J — функция сравнения, значение которой (0 или 1) определяется условиями конкретной экспериментальной процедуры; $\alpha_k(B)$ — линейные функционалы, характеризующие с точностью до взаимно-однозначного соответствия преобразование, осуществляемое в органе зрения человека при одновременном цветовом контрасте.

Известно, что при аксиоматическом построении модели ее справедливость полностью определяется достоверностью аксиом. Здесь описываются опыты по проверке аксиом аддитивности, размерности и непрерывности, из которых была получена модель одновременного цветового контраста.

Аксиома аддитивности. Если $\Phi(B'_1, B'_1) = 1$ и $\Phi(B'_2, B'_2) = 1$, то

$$\Phi(B'_1 + B'_2, B'_1 + B'_2) = 1. \quad (2)$$

Аксиома размерности. Существует набор функций $\{e_k\}$, $e_k = B_k - B_k$, $B_k, B_k \in K$, $k = 1, 2, 3$ такой, что для всякой функции найдется единственная совокупность чисел α_k , $k = 1, 2, 3$, удовлетворяющая условиям

$$\Phi(B, \sum_k \alpha_k e_k) = 1. \quad (3)$$

Аксиома непрерывности. Непрерывному изменению функции $B(\lambda, x, y)$ соответствует непрерывное изменение чисел α_k , существование и единственность которых следует из свойства размерности.

Остановимся на основных положениях методологии проведения экспериментов при изучении цветовой индукции. Первый вопрос касается трехкомпонентности зрения. Известно, что при некоторых условиях зрение может быть двух- и даже однокомпонентным. Это наблюдается при восприятии изображений очень малой и очень большой яркости, а также на периферийных участках поля зрения. Если проводить эксперименты в таких условиях, то оказывается, что набор чисел α_k (из аксиомы размерности), обеспечивающих равенство цветов в точках сравнения, не единственен. Наиболее интересным является изучение одновременного цветового контраста при трехкомпонентности зрения. Поэтому мы исключили из рассмотрения сумеречное зрение и процессы на периферии поля зрения. В опытах участвовали также только трихроматы с клинически нормальным зрением.

Эти же условия выполняются при исследовании модели стационарных и однородных процессов [2, с. 50—54]. В этой же работе указывается еще ряд особенностей, возникающих при

(1) исследовании цветового зрения, связанных, например, с наличием «зоны нечувствительности», внутри которой можно изменять числа α_i без изменения результата опыта. Неточности в проведении экспериментов, связанные с наличием «зоны нечувствительности», также имеют место при исследовании индуктивных свойств зрения. В опытах по индукции зрения считаем также неточности несущественными.

Экспериментальная проверка аксиом проводилась на дисках Максвелла. В опытах использовались две вертушки, на каждой из которых формировалась зрительная картина с определенным распределением цвета в поле зрения. Известно, что этот метод позволяет проводить исследования с одномерными зрительными картинами, которым соответствуют функции вида $V(\lambda, x)$. В нашем случае зрительные картины представляют собой фоны с произвольным распределением цвета вдоль радиуса диска; на этих фонах формируются узкие полоски, цвет которых отличается, в общем случае, от цвета фона. При предъявлении таких зрительных картин органу зрения испытуемого у него возникает эффект цветовой индукции, заключающийся в изменении цвета полосок под влиянием окружающего фона. Степень проявления этого эффекта будет различной, в зависимости от соотношения угловых размеров полоски и фона, спектров излучений фона и полоски, их яркости и некоторых других факторов. Угловые размеры полоски желательно выбирать поменьше, чтобы не возникли неоднородности ощущения по ширине полоски, связанные с явлениями яркостного краевого контраста. Опыт показывает, что для этого ширина полоски не должна превышать величину в 1—2 угл. град. Формировать полоску слишком малой ширины тоже нельзя, так как трудно будет оценивать ее цвет. В опытах, описания которых приведены в работах [3, 4], использовались зрительные картины в виде полей прямоугольной формы с размерами ($2^\circ \times 2^\circ$, $20^\circ \times 25^\circ$) и ($1,5^\circ \times 1^\circ$, $23,5^\circ \times 14,5^\circ$).

В опытах по проверке аксиом одновременного цветового контраста мы выбирали ширину полоски, равную 1° , а размер фона — 20 угл. град. Для получения возможности изменения спектральных излучений фона и полоски в опытах применялись разрезные диски различных диаметров, изготовленные из цветной бумаги. Все они вставлены своими прорезями в прорези белых бумажных кружков и установлены на вертушке, как показано на рис. 1. Известно, что такой составной диск допускает регулировку спектра, благодаря изменению угловых размеров его секторов.

В опытах использовались белые, черные, красные, зеленые и синие кружки. На рис. 1 все кружки обозначены соответствующими буквами: б — белый, ч — черный, к — красный, з — зеленый, с — синий.

В качестве белого использовался кружок с коэффициентом отражения $\rho_b = 0,83$, в качестве черного — кружок с $\rho_c = 0,0$. Коэффициенты отражения и координаты цветности определялись на колориметре КНО-3 в лаборатории цветных измерений ВНИСИ.

В опытах применялись кружки, имеющие следующие координаты цветности:

красный: $x = 0,607$; $y = 0,336$; $\rho = 0,344$;

синий: $x = 0,258$; $y = 0,248$; $\rho = 0,078$;

зеленый: $x = 0,283$; $y = 0,526$; $\rho = 0,320$.

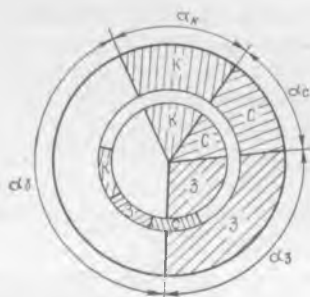


Рис. 1.



Рис. 2.

При проверке аксиомы аддитивности необходимо иметь возможность производить сложение двух зрительных картин. Для выполнения этой операции изготавливался дополнительно разрезной кружок ($\varnothing 200$ мм) из черного бархата ($\rho_{чб} = 0,2\%$). Этот кружок вставлялся в прорези остальных кружков, как показано на рис. 2.

Изготовленные таким способом диски устанавливаются на двух вертушках и приводятся во вращение со скоростью, близкой к 50 об/сек. Наблюдатель должен сравнить цвета полосок двух зрительных картин $B_1(\lambda, x)$ и $B'_1(\lambda, x)$ (на полное колориметрическое равенство). При неравенстве цветов разрешается изменять зрительные картины до тех пор, пока цвета полосок не сравняются (для удобства регулирования цвета полоски на вертушке устанавливается дополнительно один кружок желтого цвета).

Аналогично добиваются равенства ощущений в той же точке для зрительных картин B_2 и B''_2 .

Затем складывают попарно указанные зрительные картины $B_1 + B_2$ и $B'_1 + B'_2$. Для этого разрезные кружки, образующие зрительную картину B_2 , вставляют в прорези кружков, образующих картину B_1 , таким образом, что цветные сектора кружков B_2 становятся на место сектора из черного бархата картины B_1 .

Это значит, что новая зрительная картина B'_3 будет отличаться от $B_1 + B_2$ по яркости, но отличие незначительное, так как коэффициент отражения черного бархата ($\rho_{\text{ч}} \sigma = 0,2\%$) существенно меньше коэффициентов отражения цветной бумаги.

Таким же способом осуществлялось сложение зрительных картин B'_1 и B'_2 .

В результате сложения получаем кружки, позволяющие формировать зрительные картины, которым соответствуют функции

$$B'_3(x) = B'_1(x) + B'_2(x) \text{ и } B''_3(x) = B''_1(x) + B''_2(x).$$

Испытуемому вновь предлагается сравнить ощущение в тех же фиксированных точках зрительных картин B'_3 и B''_3 .

В табл. 1 приведены результаты одного из опытов с испытуемым Г. В опыте углы α' фиксированы, а равенство ощущений достигается за счет изменения углов α'' , определяющих цвет полосы зрительной картины B'' . В таблице указаны значения угловых размеров секторов, при которых наступает равенство ощущений, для двух пар изображений B'_1, B''_1 и B'_2, B''_2 .

В строке « $B_1 + B_2$ » таблицы указаны соответствующие размеры секторов дисков, формирующие зрительные картины B_3 и B'_3 , полученные после суммирования исходных картин. Сравнивая эти изображения, испытуемый отмечал равенство цветов в точке фиксации.

В экспериментах принимали участие 7 испытуемых. С каждым из них были проведены опыты для зрительных картин с произвольным распределением спектра излучений фона (напрямую, в виде «скачка», «двойного скачка» и т. д.).

Все проведенные эксперименты подтвердили справедливость аксиомы аддитивности.

Методика проведения опытов по проверке аксиомы размерности не отличалась от той, которая применялась при проверке аксиомы аддитивности. Только в этом случае на одном из полей сравнения формировалась произвольная зрительная картина B'' , а на другом — картина B' в виде равномерного фона, цвет которого сравнивался с цветом картины B'' в выбранной точке фиксации.

В одном из опытов зрительная картина B'' выбиралась в виде фона с полоской, цвет которой отличался от цвета фона.

На рис. 3 показана схема кружков, используемых в этом опыте.

На одной из вертушек устанавливался набор разрезных цветных кружков, позволяющих регулировать цвет фона и полоски картины B'' . Углы соответствующих секторов обозначены: $\alpha''_{\text{фк}}$, $\alpha''_{\text{фз}}$, $\alpha''_{\text{фс}}$, $\alpha''_{\text{фж}}$ — для изменения цвета фона; $\alpha''_{\text{пк}}$, $\alpha''_{\text{пз}}$, $\alpha''_{\text{па}}$, $\alpha''_{\text{пж}}$ — для изменения цвета полоски.

Таблица 1

Наименование картин			
Участок	B'_1 , град	B'_2 , град	$B'_1 + B'_2$, град
Фон	$\alpha'_{ж} = 50$	$\alpha'_3 = 60$	$\alpha'_{ж} = 50$
	$\alpha'_6 = 40$	$\alpha'_6 = 40$	$\alpha'_3 = 60$
	$\alpha'_{чб} = 270$	$\alpha'_{чб} = 260$	$\alpha'_6 = 80$ $\alpha'_{чб} = 170$
Полоска	$\alpha''_0 = 50$	$\alpha'_{ж} = 70$	$\alpha'_0 = 50$
	$\alpha''_6 = 40$	$\alpha'_6 = 30$	$\alpha'_{ж} = 70$
	$\alpha''_{чб} = 270$	$\alpha'_{чб} = 260$	$\alpha'_6 = 70$ $\alpha'_{чб} = 170$
	B''_1	B''_2	$B''_1 + B''_2$
Фон	$\alpha''_к = 50$	$\alpha''_к = 60$	$\alpha''_к = 110$
	$\alpha''_6 = 40$	$\alpha''_6 = 40$	$\alpha''_6 = 80$
	$\alpha''_{чб} = 270$	$\alpha''_{чб} = 260$	$\alpha''_{чб} = 170$
	$\alpha''_0 = 46,5$	$\alpha''_{ж} = 73$	$\alpha''_0 = 46,5$
	$\alpha''_ч = 10$	$\alpha''_к = 7$	$\alpha''_{ж} = 73$
	$\alpha''_6 = 33,5$	$\alpha''_6 = 20$	$\alpha''_к = 7$
	$\alpha''_{чб} = 270$	$\alpha''_{чб} = 260$	$\alpha''_6 = 53,5$
			$\alpha''_ч = 10$
			$\alpha''_{чб} = 170$

На другой вертушке установлен набор цветных кружков, сектора которых обозначены α_0 , $\alpha_к$ и α_3 . Эти кружки позволяют плавно изменять цвет картины B' .

Диски вращаются со скоростью 50 об/сек. Испытуемому предлагается установить равенство цветов полоски на правой половине поля сравнения и фона B' , для чего разрешается изменять угловые размеры секторов α_0 , $\alpha_к$ и α_3 . Цель опытов состояла в установлении возможности выравнивания этих цве-

тов при единственной совокупности значений углов α_{ϕ}^k , α_{π}^n и α_k , α_c , α_z .

Опыты показали, что в некоторых случаях трудно добиться равенства цветов регулировкой углов α_c , α_z и α_k . В этом случае приходится добавлять к кружкам, формирующим зрительную картину B'' , секторы α_c , α_k и α_z , как показано на рис. 3.

В табл. 2 приведены усредненные результаты по данным 5 опытов для испытуемого II при различных зрительных картинах B'' .

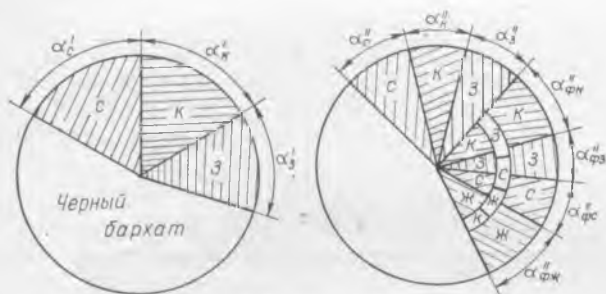


Рис. 3.

В графе «Левое поле сравнения» указаны угловые размеры цветных секторов, формирующих зрительную картину B' .

В графе «Правое поле сравнения» приведены величины секторов, определяющих цвет фона (α_{ϕ}^n) и цвет полосы (α_{π}^n), а также угловые размеры секторов α^n .

В опытах принимали участие 7 испытуемых. Результаты проведенных экспериментов подтвердили справедливость аксиомы размерности.

Аксиома непрерывности выполняется в колориметрических опытах всегда [2].

Все опыты проводились при освещенности $E = 300$ лк. Варьирование освещенности в пределах 50 ÷ 700 лк не вносило значительных изменений в результаты экспериментов. Ввиду сложности проведения экспериментов по достижению полного колориметрического равенства двух зрительных картин в точке фиксации в опытах принимали участие обученные испытуемые.

Кроме того, так как в этой работе не ставилась задача определения количественных характеристик цветовой индукции зрения, то при проведении опытов не исследовался вопрос о возможности усреднения данных нескольких испытуемых (например, гипотеза об однородности ряда дисперсии по G критерию).

Из справедливости аксиом аддитивности, размерности и непрерывности следует достоверность модели одновременного цветового контраста (1).

Номер опыта					
Поля сравнения	1	2	3	4	5
Левое поле	$\alpha'_0 = 190^\circ$	$\alpha'_k = 9^\circ$	$\alpha'_0 = 142^\circ$	$\alpha'_c = 220^\circ$	$\alpha'_3 = 26^\circ$
	$\alpha'_3 = 25$	$\alpha'_0 = 144$	$\alpha'_k = 5$	$\alpha'_3 = 150$	$\alpha'_c = 191$
	$\alpha'_{чб} = \text{остальное}$	$\alpha'_3 = 24$	$\alpha'_3 = 37$		
Правое поле	$\alpha''_{фж} = 180^\circ$	$\alpha''_{фк} = 175^\circ$	$\alpha''_{фк} = 175^\circ$	$\alpha''_{фк} = 180^\circ$	$\alpha''_{фк} = 176^\circ$
	$\alpha''_{по} = 180$	$\alpha''_{по} = 175$	$\alpha''_3 = 14$	$\alpha''_{пс} = 180$	$\alpha''_{по} = 176$
	$\alpha''_3 = 48$		$\alpha''_k = 5$	$\alpha''_k = 5$	$\alpha''_3 = 19$
	$\alpha''_{чб} = \text{остальное}$		$\alpha''_{пс} = 175$		
	6	7	8	9	10
Левое поле	$\alpha'_3 = 15^\circ$	$\alpha'_c = 310^\circ$	$\alpha'_c = 230^\circ$	$\alpha'_3 = 22^\circ$	$\alpha'_3 = 16^\circ$
	$\alpha'_c = 345$	$\alpha'_3 = 17$	$\alpha'_3 = 8$	$\alpha'_c = 274$	$\alpha'_c = 208$
Правое поле	$\alpha''_{фк} = 180^\circ$	$\alpha''_{фк} = 255^\circ$	$\alpha''_{фк} = 160^\circ$	$\alpha''_{фк} = 315^\circ$	$\alpha''_{фк} = 239^\circ$
	$\alpha''_{пс} = 180$	$\alpha''_{пс} = 255$	$\alpha''_{пс} = 160$		
	$\alpha''_k = 5$			$\alpha''_{по} = 315$	$\alpha''_{по} = 239$
	$\alpha''_c = 125$	$\alpha''_3 = 7$	$\alpha''_3 = 160$		
	11	12	13	14	15
Левое поле	$\alpha'_3 = 18^\circ$	$\alpha'_0 = 178^\circ$	$\alpha'_c = 160^\circ$	$\alpha'_k = 174^\circ$	$\alpha'_3 = 50^\circ$
	$\alpha'_c = 297$	$\alpha'_k = 7$	$\alpha'_3 = 137$	$\alpha'_3 = 24$	$\alpha'_k = 138$
		$\alpha'_3 = 4$		$\alpha'_c = 112$	
Правое поле	$\alpha''_{фк} = 270^\circ$	$\alpha''_{фк} = 140^\circ$	$\alpha''_{фк} = 142^\circ$	$\alpha''_{фз} = 134^\circ$	$\alpha''_{фс} = 101^\circ$
	$\alpha''_{пс} = 270$	$\alpha''_{по} = 140$	$\alpha''_{пз} = 142$	$\alpha''_{пк} = 134$	$\alpha''_{пч} = 101$
			$\alpha''_0 = 6$	$\alpha''_0 = 165$	$\alpha''_0 = 85$

Вопрос применимости модели для любых зрительных картин, а также определения ядер интегральных преобразований (1) требует дальнейшего изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шабанов-Кушнаренко Ю. П., Сердюченко В. Я., Грабина В. А. Математическое моделирование индуктивного цветового контраста.—В кн.: Проблемы бионики. Вып. 17, Харьков, 1976, с. 3—8.
2. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. Математическое моделирование некоторых функций человеческого зрения. Автореф. дис. на соиск. учен. степени д-ра техн. наук. Харьков, 1970, с. 12—14.
3. Nayatani Y. Estimation of color induction by simultaneous color contrast.—«Proc. Int. Color Meeting «Color 69», Stockholm, 1969, vol. 1, p. 219—228.
4. Heinrich F. Untersuchungen zum farbigen Simultankontrast.—«Optik», 1965, 22, № 3, S. 162—168.

Поступила 25 ноября 1976 г.

УДК 62.506.2

В. П. ПЧЕЛИНОВ

ДЕДУКТИВНЫЙ ВЫВОД МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОРГАНА ЗРЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА. СООБЩЕНИЕ I

Согласно современной трехкомпонентной теории цветового зрения человека, процесс преобразования излучений в цветовые образы можно описать с помощью математических выражений:

$$\bar{S} = \varphi(\bar{B}), \quad (1)$$

$$B_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} b(\lambda) e_i(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где $b(\lambda)$ — функции спектральной плотности лучистой яркости, т. е. входные сигналы органа зрения; $e_i(\lambda)$ ($i = 1, 2, 3$) — функции сложения цвета; \bar{B} — вектор с компонентами B_1, B_2, B_3 ; \bar{S} — вектор цвета, имеющий компоненты: цветовой тон s_1 , насыщенность s_2 и светлоту s_3 ; φ — взаимно-однозначная функция; λ_1, λ_2 — длины волн излучений, соответствующие началу и концу светового диапазона.

Проблема состоит в том, что эти выражения до сих пор не являются строго обоснованными. Впервые вывод интегральных соотношений (2) был сделан Шредингером [1], однако в работе [2] убедительно показано, что этот вывод опирается на субъективные понятия и содержит ошибку «логического круга», поэтому имеет гипотетический характер и не является достаточно убедительным.

Наиболее полно вопросы доказательства математической модели рассматриваемого процесса описаны в работе [2] и все же ряд из них требует дальнейшего решения.

Сюда относятся такие аспекты, как введение математического понятия цвета, упрощение аксиоматики, используемой при выводе модели, дальнейшее расширение этой аксиоматики для различных видов множеств входных сигналов органа зрения, приведение ее к виду, позволяющему осуществлять экспериментальную проверку по методике, дающей объективные данные, разработка более строгого метода вывода модели, основанного лишь на математических преобразованиях без привлечения физических данных и др.

Все это позволит получить указанную модель чисто дедуктивным способом и обосновать ее достоверность.

Трудность решения этой задачи состоит в том, что хотя входные сигналы органа зрения — функции $b(\lambda)$ и являются измеримыми физическими величинами, однако выходные — это цветовые образы, которые нельзя измерить никакими приборами.

Поэтому приходится разрабатывать специальные методы исследования. Наиболее приемлемым здесь оказывается метод «черного ящика», который состоит в том, что вначале формулируются аксиомы, хорошо проверенные в экспериментах, из которых затем выводится требуемая модель и доказываются эквивалентность полученной модели и используемых аксиом, т. е. их полнота.

Рассмотрим вначале методику проведения экспериментов, которой должны удовлетворять эти аксиомы. Известно, что наиболее точные результаты можно получить в опытах, когда орган зрения человека используется в качестве нуля-органа.

Пусть имеется испытуемый, которому предъявляется два поля сравнения, являющихся однородными стационарными зрительными картинками, т. е. описываемые функциями спектральной плотности лучистой яркости соответственно $b_1(\lambda)$ и $b_2(\lambda)$. Ему предлагается ответить на вопрос: одинаковы цвета этих полей сравнения или нет? Если одинаковы, то он должен зафиксировать 1, а если нет — то 0. Поскольку испытуемому можно предъявить множество таких пар полей сравнения (обозначим это множество через B), то получим множество ответов $U \{0, 1\}$.

Схематично эту ситуацию можно изобразить, как показано на рис. 1, где Φ — функция, которую реализует испытуемый при сравнении цветов полей сравнения, причем $\Phi(b_1(\lambda), b_2(\lambda)) \in U$.

Тогда можно сказать, что эта функция является отображением множества B на множество U , т. е. $\Phi: B \rightarrow U$.

Заметим, что для постороннего наблюдателя (например, для исследователя) входные сигналы испытуемого — функции $b(\lambda)$, а также выходные — 0 и 1 являются категориями объективных, поскольку их можно фиксировать, регистрировать, воспроизводить и т. д.

Поэтому если исходя только из указанных сигналов нам удастся расшифровать вид функции Φ , то полученная модель будет иметь объективный характер.

Эксперименты с испытуемыми, проведенные по описанной методике, показывают, что для входных сигналов органа зрения — функций $b(\lambda)$ выполняются следующие условия.

1. Если на обоих полях сравнения, предъявляемых испытуемому, сформировать одинаковые излучения, то он зафиксирует равенство их цветов. Это можно записать в виде

$$\Phi [b(\lambda), b(\lambda)] = 1 \text{ (рефлексивность)}. \quad (3)$$

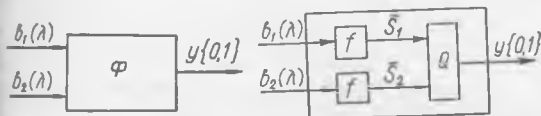


Рис. 1.

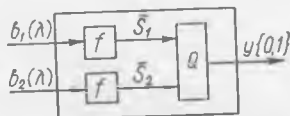


Рис. 2.

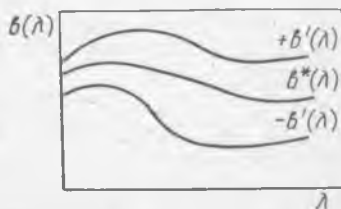


Рис. 3.

2. Если испытуемому предъявить пару полей сравнения и он зафиксирует равенство их цветов, то при перемене мест этих полей сравнения его ответ не изменится, т. е.

$$\text{если } \Phi [b_1(\lambda), b_2(\lambda)] = 1, \text{ то } \Phi [b_2(\lambda), b_1(\lambda)] = 1 \text{ (симметричность)}. \quad (4)$$

3. Если предъявить испытуемому пару полей сравнения, характеризуемых функциями $\langle b_1(\lambda), b_2(\lambda) \rangle$, на которые он дает ответ 1, а затем два поля сравнения, характеризуемые функциями $\langle b_2(\lambda), b_3(\lambda) \rangle$, для которых он также зафиксирует равенство цветов, то для полей сравнения, описываемых функциями $\langle b_1(\lambda), b_3(\lambda) \rangle$, его ответ также будет положительным, т. е.

$$\text{если } \Phi [b_1(\lambda), b_2(\lambda)] = 1 \text{ и } \Phi [b_2(\lambda), b_3(\lambda)] = 1, \text{ то } \Phi [b_1(\lambda), b_3(\lambda)] = 1 \text{ (транзитивность)}. \quad (5)$$

Отсюда можно сделать заключение, что функция Φ удовлетворяет условиям рефлексивности, симметричности и транзитивности, а значит, она является отношением эквивалентности [3] на множестве входных сигналов B . Следовательно, существует отображение F множества B на множество классов эквивалентности K , т. е. $F: B \rightarrow K$, которое ставит в соответствие каждому элементу множества B его класс. К одному классу эквивалентности относятся излучения, если $\Phi [b_1(\lambda), b_2(\lambda)] = 1$, и к разным классам, если $\Phi [b_1(\lambda), b_2(\lambda)] = 0$.

Задача состоит в том, чтобы найти решение системы уравнений (3), (4), (5) относительно функции Φ .

Как показано в работе [4], это решение может быть записано в виде

$$\Phi [b_1(\lambda), b_2(\lambda)] = Q [F(b_1(\lambda)), F(b_2(\lambda))], \quad (6)$$

где Q — функция сравнения, заданная на некотором множестве S и определяемая из условий

$$Q(\bar{a}_1, \bar{a}_2) = \begin{cases} 0, & \text{если } \bar{a}_1 \neq \bar{a}_2; \\ 1, & \text{если } \bar{a}_1 = \bar{a}_2; \end{cases} \quad (7)$$

$(\bar{a}_1, \bar{a}_2 \in S);$

F — некоторая функция, определенная на множестве B с областью значений на множестве S , т. е. это отображение $F: B \rightarrow S$, причем

$$\bar{a}_1 = F[b_1(\lambda)], \quad \bar{a}_2 = F[b_2(\lambda)]. \quad (8)$$

Заметим, что конкретную функцию Φ однозначно определяют выбор множества S и функции F .

Обратное утверждение, однако, неверно, поскольку если задана функция Φ , то это еще не значит, что мы можем однозначно определить единственное множество S и функцию F , для которых выполняется равенство (6). Оказывается, что одна и та же функция Φ , удовлетворяющая условиям (3), (4), (5), может быть представлена различными способами.

Для более строгого доказательства этого утверждения абстрагируемся от конкретной интерпретации функций $b(\lambda) \in B$ и будем считать их, как и другие используемые величины, абстрактными математическими понятиями.

Допустим, имеются две функции $F'(b)$ и $F''(b)$ с областью определения на множестве B и со значениями на множествах соответственно S' и S'' .

Введем функции Φ' и Φ'' , удовлетворяющие условиям рефлексивности, симметричности и транзитивности, т. е. представимые в виде

$$\Phi'(b_1, b_2) = Q[F'(b_1), F'(b_2)], \quad (9)$$

$$\Phi''(b_1, b_2) = Q[F''(b_1), F''(b_2)]. \quad (10)$$

Эти функции совпадают в том и только в том случае, если существует взаимно-однозначное отображение $\varphi: S' \rightarrow S''$ такое, что для всех $b \in B$

$$F'(b) = \varphi[F''(b)]. \quad (11)$$

Пусть функции Φ' и Φ'' совпадают. Рассмотрим отношение φ_1 , заданное на декартовом произведении $S' \times S''$, представляющем множество всех пар вида $\langle F'(b), F''(b) \rangle$, где b — произвольный элемент из множества B .

Докажем, что φ — это биекция, т. е. взаимно-однозначная функция.

Если $b_1, b_2 \in B$ таковы, что $F'(b_1) = F''(b_2)$, то в силу (11) $\Phi'(b_1, b_2) = 1$, а значит, и $\Phi''(b_1, b_2) = 1$, т. е. $F'(b_2) = F''(b_1)$. Таким образом, отношение φ есть функция.

Пусть теперь $b_1, b_2 \in B$ таковы, что $F'(b_2) = F''(b_1)$. Тогда $\Phi'(b_1, b_2) = 1$ и $\Phi''(b_1, b_2) = 1$ и поэтому $F'(b_1) = F''(b_2)$.

Значит, φ — взаимно-однозначная функция. Следовательно, если Φ' и Φ'' совпадают, то существует взаимно-однозначная функция такая, что

$$F'(b) = \varphi[F''(b)].$$

Пусть теперь биекция φ существует. Докажем, что в этом случае функции Φ' и Φ'' совпадают.

Если $b_1, b_2 \in B$ таковы, что $\Phi'[b_1, b_2] = 1$, то $F'(b_1) = F'(b_2)$ и поэтому $F''(b_1) = F''(b_2)$, т. е. $\Phi''[b_1, b_2] = 1$.

Если же $b_1, b_2 \in B$ таковы, что $\Phi'[b_1, b_2] = 0$, то $F'(b_1) \neq F'(b_2)$, а значит, $F''(b_1) \neq F''(b_2)$, в силу взаимной однозначности φ в выражении (11). Поэтому $\Phi''(b_1, b_2) = 0$.

Таким образом, мы доказали наше утверждение и, кроме того, установили, что любую функцию, представляемую в виде (6), можно записать также в виде

$$\Phi[b_1(\lambda), b_2(\lambda)] = Q[\varphi(F(b_1(\lambda))), \varphi(F(b_2(\lambda)))], \quad (12)$$

где φ — произвольно выбранная взаимно-однозначная функция.

Конкретизируя полученное выражение для условий, рассматриваемых в данной статье, приходим к выводу, что оно описывает процесс распознавания и сравнения цветов испытуемым в экспериментах по ранее описанной методике, причем

$$Q(\bar{S}_1, \bar{S}_2) = \begin{cases} 0, & \text{если } \bar{S}_1 \neq \bar{S}_2, \\ 1, & \text{если } \bar{S}_1 = \bar{S}_2; \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_1 &= f[b_1(\lambda)] = \varphi[F(b_1(\lambda))], \\ \bar{S}_2 &= f[b_2(\lambda)] = \varphi[F(b_2(\lambda))], \end{aligned} \quad (14)$$

где \bar{S}_1, \bar{S}_2 — векторы цвета полей сравнения, являющиеся элементами множества цветов S ; $F[b(\lambda)]$ — функция, ставящая в соответствие каждому излучению некоторый вектор $\bar{a} = F[b(\lambda)]$.

Отсюда следует, что множество классов эквивалентности K , функции F и множество цветов S связаны между собой взаимно-однозначной функцией. Математическая модель в виде соотношений (12), (13), (14) описывает процесс распознавания цвета с точностью до взаимно-однозначного соответствия или до кодов. Однако для математического описания любого объекта принцип кодирования не играет существенной роли. Схематично эту модель можно изобразить, как показано на рис. 2.

Дальнейшей задачей вывода модели спектральной чувствительности органа зрения является определение конкретного вида функции F в выражении (12).

С этой целью необходимо сначала определить вид пространства входных сигналов.

Рассмотрим линейные свойства функций $b(\lambda)$. Для того чтобы их множество можно было считать линейным пространством, необходимо выполнение следующих условий [4]:

1. Для любых $b_1(\lambda), b_2(\lambda) \in B$, $b_1(\lambda) + b_2(\lambda) \in B$, причём

а) $b_1(\lambda) + b_2(\lambda) = b_2(\lambda) + b_1(\lambda)$;

б) $b_1(\lambda) + (b_2(\lambda) + b_3(\lambda)) = (b_1(\lambda) + b_2(\lambda)) + b_3(\lambda)$;

в) $b(\lambda) + 0 = b(\lambda)$;

г) существует $-b(\lambda)$ и $b(\lambda)$, причём $b(\lambda) + (-b(\lambda)) = 0$

2. Для любого $b(\lambda) \in B$ и числа α $\alpha b(\lambda) \in B$, причём:

д) $\alpha_1(\alpha_2 b(\lambda)) = (\alpha_1 \alpha_2) b(\lambda)$;

е) $\alpha(b_1(\lambda) + b_2(\lambda)) = \alpha b_1(\lambda) + \alpha b_2(\lambda)$;

ж) $(\alpha_1 + \alpha_2) b(\lambda) = \alpha_1 b(\lambda) + \alpha_2 b(\lambda)$;

з) $1b(\lambda) = b(\lambda)$,

где $\alpha, \alpha_1, \alpha_2$ — произвольные числа.

Анализируя эти условия, можно прийти к выводу, что выполняется условие г), поскольку не существует отрицательного излучения, так как в природе нет отрицательных энергий, а условия д), е) и ж) выполняются лишь для положительных чисел $\alpha, \alpha_1, \alpha_2$.

Поэтому мы не можем утверждать, что множество функций образует линейное пространство. Однако в математике имеется понятие положительного конуса [5], которое определяется как множество K элементов линейного пространства, имеющих положительный знак, не содержащее отрицательных элементов и удовлетворяющее условию: для любого $b(\lambda) \in K$, $\alpha b(\lambda) \in K$, где $\alpha \geq 0$.

Поскольку функции $b(\lambda)$ удовлетворяют этому требованию, то они образуют положительный конус K линейного пространства.

Как уже отмечалось, функции $b(\lambda)$ являются измеримыми физическими величинами, поэтому каждой из них можно поставить в соответствие некоторое число-норму $\|b\|$. Однако в линейном пространстве норма может быть введена различным способом, который выбирается исходя из конкретных задач исследования.

Для нас решающим обстоятельством является то, что мощность светового потока, воздействующего на избирательную систему (которой, в частности, является и орган зрения) со спектральной характеристикой $g(\lambda)$, можно определить с помощью скалярного произведения

$$(b, g) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} b(\lambda) g(\lambda) d\lambda, \quad (15)$$

представляющего собой линейный функционал от функции $b(\lambda)$. Согласно теореме Рисса [4], линейный функционал, записываемый в виде скалярного произведения, может иметь место в гильбертовом пространстве, частным случаем которого является пространство функций, суммируемых с квадратом $L_2[0, 1]$.

По определению функция $b(\lambda)$ может являться элементом пространства L_2 , если

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} b^2(\lambda) d\lambda < \infty. \quad (16)$$

Так как функции $b(\lambda)$ имеют физический смысл и принимают только конечные значения, в силу конечных значений энергий, их вызывающих, то в выполнении этого условия нет никаких сомнений.

Поэтому можно сказать, что множество входных сигналов, описываемых функциями $b(\lambda)$, образует положительный конус K пространства $L_2[\lambda_1, \lambda_2]$.

Заметим, что интервал $[\lambda_1, \lambda_2]$ не накладывает каких-либо дополнительных ограничений на использование понятия пространства L_2 , так как его легко можно привести к виду $[0, 1]$, введя новую независимую переменную по формуле

$$\tau = \frac{\lambda - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (17)$$

Норма функции $b(\lambda)$ в пространстве L_2 определяется из выражения

$$\|b\| = \sqrt{\langle b, b \rangle} = \sqrt{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} b^2(\lambda) d\lambda}, \quad (18)$$

а расстояние между двумя функциями $b_1(\lambda)$, $b_2(\lambda)$

$$\rho(b_1, b_2) = \|b_1 - b_2\| = \sqrt{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [b_1(\lambda) - b_2(\lambda)]^2 d\lambda}. \quad (19)$$

Поскольку функции $b(\lambda)$ образуют положительный конус линейного вещественного пространства, то нетрудно видеть, что все требования нормы [4] выполняются, т. е.

- 1) $\|b\| \geq 0$, причем $\|b\| = 0$ лишь тогда, когда $b(\lambda) = 0$;
- 2) $\|b_1 + b_2\| \leq \|b_1\| + \|b_2\|$;
- 3) $\|\alpha b\| = |\alpha| \cdot \|b\|$.

Отождествляя множество входных сигналов с положительным конусом $K \subset L_2[\lambda_1, \lambda_2]$, заметим, что такая абстракция на практике не всегда оказывается удовлетворительной, так как согласно определению конуса, если $b(\lambda) \in K$, то $\alpha b(\lambda) \in K$, каким бы большим или малым не было число α .

Содержательно это означает, что глаз человека должен различать цветовые оттенки при сколь угодно большой или малой мощности излучения. На самом деле это не так, поскольку известно, что при малых (менее 10 нит) и слишком больших излу-

чениях нормальное цветовосприятие органа зрения нарушается. Более того, мощность излучения можно увеличить настолько, что глаз может выйти из строя.

Поэтому если при исследовании цветового зрения нас интересует вся область зрительных стимулов, включая ее границы, то придется отказаться от абстракции конуса и перейти к понятию выпуклого множества.

Множество M , являющееся подмножеством линейного пространства (в частности пространства L_2), называется выпуклым, если для любых двух его элементов $b_1(\lambda)$, $b_2(\lambda)$ выполняется условие $mb_1(\lambda) + (1 - m)b_2(\lambda) \in M$ ($0 \leq m \leq 1$), т. е. все точки отрезка, соединяющего эти элементы, также принадлежат множеству M .

Анализ входных сигналов органа зрения показывает, что совокупность действительно образует выпуклое множество, поэтому если цветовое зрение исследуется на всем диапазоне зрительных стимулов, то следует пользоваться именно этой моделью, которая является наиболее общей, хотя и наиболее сложной. С помощью такой модели можно искусственно ограничить любую область множества входных сигналов и проводить исследования с излучениями, входящими именно в данную область и не выходящими за ее границы.

Если же такое исследование проводится на довольно обширной области множества функций $b(\lambda)$, однако вопрос о границах этого множества нас не интересует, поскольку заведомо известно, что зрительные стимулы находятся внутри области нормального цветовосприятия и на достаточном удалении от ее границ, то можно предположить, что эти границы находятся в бесконечности. Тогда целесообразно воспользоваться моделью конуса, как более простой и удобной.

Вопрос об использовании той или иной абстракции множества входных сигналов зависит от конкретных условий и задач исследования цветового зрения человека.

На практике представляет интерес также модель множества входных сигналов в виде всего пространства L_2 . Применение ее целесообразно в том случае, если исследуется сравнительно небольшая область зрительных стимулов в непосредственной близости от некоторого фиксированного излучения, спектр которого для всех длин волн светового диапазона имеет значения, достаточно удаленные от нуля. К таким излучениям относятся, например, свет солнца, лампочки накаливания и др. При небольших вариациях вблизи заданного излучения мы никогда не дойдем до пределов множества входных сигналов ни в одном из направлений. Поэтому можно принять, что это множество неограниченно распространяется во все стороны от выбранной точки. В таком случае целесообразно принять данное фиксированное излучение за нуль отсчета, а отклонения других излучений от заданного использовать в качестве математической

характеристики входных сигналов органа зрения, которые можно записать в виде

$$b(\lambda) = b'(\lambda) - b^*(\lambda), \quad (20)$$

где $b^*(\lambda)$ — фиксированное излучение, принятое за нуль отсчета; $b'(\lambda)$ — излучение из его окрестности; $b(\lambda)$ — математическая характеристика входных сигналов органа зрения.

Схематично эти сигналы показаны на рис. 3.

Нетрудно убедиться, что при таком определении зрительных стимулов все требования линейного нормированного пространства, приведенные ранее, будут выполняться и их можно рассматривать как элементы всего пространства $L_2[\lambda_1, \lambda_2]$. Такая модель входных сигналов оказывается наиболее простой, и поэтому, если позволяют условия, ее удобно использовать при исследовании цветового зрения.

Итак, мы установили, что в зависимости от конкретных условий входные сигналы органа зрения можно рассматривать как элементы выпуклого множества $M \subset L_2[\lambda_1, \lambda_2]$, положительного конуса $K \subset L_2[\lambda_1, \lambda_2]$ и всего пространства $L_2[\lambda_1, \lambda_2]$. Отметим иерархическую структуру этих множеств.

Из определений каждой из них очевидно, что наиболее общими свойствами обладают элементы выпуклого множества, затем идет положительный конус и далее — все пространство L_2 . Отсюда следует, что свойства выпуклого множества $M \subset L_2$ могут распространяться на элементы положительного конуса $K \subset L_2$ и всего пространства $L_2[\lambda_1, \lambda_2]$, однако обратное утверждение не имеет места, поскольку если элементы выпуклого множества $M \subset L_2$ должны обязательно удовлетворять требованиям элементов пространства L_2 , то для элементов всего пространства L_2 не обязательны требования выпуклого множества.

Это же можно сказать и об элементах положительного конуса. Указанные обстоятельства обязывают нас дифференцированно подходить к построению математической модели спектральной чувствительности органа зрения человека, учитывая различные свойства множеств входных сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schrodinger E. Grundlinien einer Theorie der Farbenmetrie im Tagessehen. — «Ann. d. Phys.», 1920, Bd. 63, S. 397—456, 481—520.
2. Шабанов-Кушнаренок Ю. П. Аксиоматическое построение модели цветового зрения. — В кн.: Проблемы бионики. Вып. 4., Харьков, 1970, с. 30—50.
3. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. М., «Наука», 1972. 496 с.
4. Шульгин И. В., Лопатченко Б. К., Пильщиков Б. В. Математическое моделирование монокулярного зрительного восприятия. В кн.: Проблемы бионики. Вып. 9, Харьков, 1972, с. 40—44.
5. Функциональный анализ. Из серии «Справочная математическая библиотека», под ред. Р. Г. Крейна. М., «Наука», 1972. 544 с.

Поступила 26 августа 1976 г.

ДЕДУКТИВНЫЙ ВЫВОД МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОРГАНА ЗРЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА. СООБЩЕНИЕ 2

Входные сигналы органа зрения — функции $b(\lambda)$ в общем случае состоят из бесконечно большого числа компонент [1], т. е. их множество представляет собой множество бесконечномерных векторов, определенных на интервале длин волн светового диапазона $[\lambda_1, \lambda_2]$.

Цветовые же образы, каждый из которых можно описать с помощью вектора \bar{S} , имеющего компоненты: цветовой тон s_1 , насыщенность s_2 и светлоту s_3 , образуют множество трехмерных векторов.

В работе [2] установлено, что каждый из этих векторов связан взаимно-однозначной зависимостью с определенным классом эквивалентности функций $b(\lambda)$, порождаемым функцией F . Последняя входит в состав полученной математической модели спектральной чувствительности органа зрения человека.

Поскольку каждый класс эквивалентности может быть представлен своим элементом [3] и поэтому сам отождествляется как новый элемент некоторого множества, то функция F представляет собой сжимающее отображение множества входных сигналов органа зрения в фактор-множество классов эквивалентности.

Рассмотрим вопрос об определении вида этой функции. Чтобы не снижать общности получаемых результатов (так как они могут быть полезны не только при исследовании цветового зрения человека), дальнейшие выводы будем делать на абстрактном математическом уровне с последующей их интерпретацией для конкретных условий. Поскольку входные сигналы органа зрения могут быть представлены тремя различными видами множеств [2] (выпуклого множества пространства L_2 , положительного конуса и всего пространства L_2), то функцию F необходимо определить для каждого из них.

Сначала рассмотрим этот вопрос для элементов выпуклого множества.

Пусть M — выпуклое множество в некотором линейном пространстве H , а Z — произвольное множество этого пространства.

Теорема 1. Пусть имеется отображение $F: M \rightarrow Z$, удовлетворяющее условию: если $F(x_1) = F(y_1)$, $F(x_2) = F(y_2)$, то

$$F(tx_1 + (1-t)x_2) = F(ty_1 + (1-t)y_2). \quad (1)$$

Тогда существует подпространство $S \subset H$ такое, что сжатие h_s пространства H по модулю S ($h_s: H \rightarrow H/S$) обладает свойством:

$$\text{если } F(x) = F(y), \text{ то } h_s(x) = h_s(y), \quad (2)$$

и обратно,

$$\text{если } h_s(x) = h_s(y), \text{ то } F(x) = F(y), \quad (3)$$

где $x, x_1, x_2, y, y_1, y_2, mx_1 + (1-m)x_2, my_1 + (1-m)y_2 \in M$; $0 \leq m \leq 1$.

Доказательство. Обозначим через S множество всех элементов ξ из H , которые можно представить в виде

$$\xi = \beta(x - y), \quad (4)$$

где β — произвольное число, $x, y \in M$, причем $F(x) = F(y)$.

Покажем сначала, что S — подпространство линейного пространства H . Для этого, как известно [3], достаточно доказать, что для любых $\xi_1, \xi_2 \in S$ будет выполняться условие $\beta_1\xi_1 + \beta_2\xi_2 \in S$ при каких-либо β , т. е. замкнутость этого подпространства относительно сложения и умножения на число.

Замкнутость S относительно умножения очевидна из определения элементов $\xi \in S$, поэтому требуется лишь доказать, что для любых $\xi_1, \xi_2 \in S$ $\xi_1 + \xi_2 \in S$.

Возьмем два произвольных элемента $\xi_1, \xi_2 \in S$. Согласно (4), их можно представить в виде $\xi_i = \beta_i(x_i - y_i)$ и $F(x_i) = F(y_i)$ ($i = 1, 2$). Без ограничения общности можно считать, что $\beta \geq 0$, так как если $\beta < 0$, то ξ_i запишем так:

$$\xi_i = |\beta_i|(x_i - y_i). \quad (5)$$

Рассмотрим выражение

$$\begin{aligned} \frac{\xi_1 + \xi_2}{\beta_1 + \beta_2} &= \frac{\beta_1}{\beta_1 + \beta_2}(x_1 - y_1) + \frac{\beta_2}{\beta_1 + \beta_2}(x_2 - y_2) = \\ &= \frac{\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2}{\beta_1 + \beta_2} - \frac{\beta_1 y_1 + \beta_2 y_2}{\beta_1 + \beta_2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Обозначив $m = \frac{\beta_1}{\beta_1 + \beta_2}$, получим

$$\beta_2 = \frac{\beta_1 - m\beta_1}{m} = \frac{\beta_1(1-m)}{m}. \quad (7)$$

Подставив этот результат в (6), запишем

$$\begin{aligned} \frac{\beta_1 x_1 + \frac{\beta_1(1-m)}{m} x_2}{\beta_1 + \frac{\beta_1(1-m)}{m}} - \frac{\beta_1 y_1 + \frac{\beta_1(1-m)}{m} y_2}{\beta_1 + \frac{\beta_1(1-m)}{m}} &= (mx_1 + (1-m)x_2) - \\ &- (my_1 + (1-m)y_2). \end{aligned} \quad (8)$$

Но по условию теоремы $F(mx_1 + (1-m)x_2) = F(my_1 + (1-m)y_2)$,

следовательно, $\frac{\xi_1 + \xi_2}{\beta_1 + \beta_2} \in S$. Тогда $\xi_1 + \xi_2 \in S$. Таким образом, S — подпространство H . Покажем теперь, что если $\xi \in S$, число β' и функции $x', y' \in M$ таковы, что $\xi = \beta'(x' - y')$, то $F(x') = F(y')$.

Действительно, так как $\xi \in S$, то найдутся функции $x, y \in M$ и число β такие, что $\xi = \beta(x - y)$ и $F(x) = F(y)$. Тогда $\xi = \beta(x - y) = \beta'(x' - y')$, т. е.

$$\beta x + \beta' y' = \beta y + \beta' x'. \quad (9)$$

Положив $\tau = \frac{\beta'}{\beta - \beta'}$, получим $\beta = \frac{(1 - \tau)\beta'}{\tau}$, и уравнение (9) примет вид

$$\frac{(1 - \tau)\beta'}{\tau} x + \beta' y' = \frac{(1 - \tau)\beta'}{\tau} y + \beta' x',$$

который можно также представить как

$$(1 - \tau)x + \tau y' = (1 - \tau)y + \tau x'. \quad (10)$$

Это уравнение выразит равенство отрезков, соединяющих точки x, y' и y, x' , поэтому

$$F[(1 - \tau)x + \tau y'] = F[(1 - \tau)y + \tau x']. \quad (11)$$

Если ввести обозначения: $x_1 = (1 - \tau)x + \tau y'$, $y_1 = (1 - \tau)y + \tau x'$, то получим $F(x_1) = F(y_1)$.

Таким образом, если $x, y \in M$, $F(x) = F(y)$, то $x - y \in S$ и $h_s(x) = h_s(y)$. И, наоборот, если $h_s(x) = h_s(y)$, то $\xi = x - y \in S$ и $F(x) = F(y)$. Теорема доказана. Значит, функция F является сжатием, если выполняются условия теоремы.

Рассмотрим теперь условия линейности этой функции на выпуклом множестве.

Пусть $H = L_2[t_1, t_2]$, где t_1, t_2 — произвольные независимые переменные, а M — выпуклое множество в $L_2[t_1, t_2]$.

Теорема 2. Для того чтобы оператор F был линейным на выпуклом множестве $M \subset L_2$, необходимо и достаточно, чтобы он удовлетворял условиям:

1) если $F(x_1) = F(y_1)$ и $F(x_2) = F(y_2)$, то

$$F[mx_1 + (1 - m)x_2] = F[my_1 + (1 - m)y_2], \quad (12)$$

где $x_1, x_2, y_1, y_2, mx_1 + (1 - m)x_2, my_1 + (1 - m)y_2 \in M$, $0 \leq m \leq 1$;

2) существует набор элементов $\{g_i\}$ ($g_i \in M$) такой, что для всякого $x \in M$ найдется единственная совокупность чисел $\{\alpha_i\}$, удовлетворяющая условию

$$F\left[mx + (1 - m) \sum_i \alpha_i(x) g_i\right] = F\left[\sum_i \alpha_i(x) g_i\right], \quad (13)$$

где $\alpha_i(x) = \bar{\alpha}_i(x) - \alpha_i(x)$; $\sum_i \bar{\alpha}_i(x) = \sum_i \alpha_i(x) = 1$; $0 \leq m \leq 1$;

3) $\alpha_i(x)$ — непрерывные функционалы.

Доказательство. Необходимость очевидна. Докажем достаточность.

Пусть $x(t), y(t) \in M \subset L_2[t_1, t_2]$. Тогда, согласно (13),

$$F\left[mx + (1 - m) \sum_i \alpha_i(x) g_i\right] = F\left[\sum_i \alpha_i(x) g_i\right],$$

$$F \left[my + (1 - m) \sum_i \alpha_i(y) g_i \right] = F \left[\sum_i \alpha_i(y) g_i \right].$$

(9) Учитывая (12), получим

$$F \left[m(mx + (1 - m) \sum_i \alpha_i(x) g_i + (1 - m)(my_2 + (1 - m) \sum_i \alpha_i(y) g_i) \right] = \\ = F \left[m \sum_i \alpha_i(x) g_i + (1 - m) \sum_i \alpha_i(y) g_i \right]. \quad (14)$$

Возьмем теперь $Z = mx + (1 - m)y$. Согласно (13), для нее также можно написать, что

$$F \left[mz + (1 - m) \sum_i \alpha_i(z) g_i \right] = F \left[\sum_i \alpha_i(z) g_i \right]. \quad (15)$$

Подставляя в это выражение вместо функции z ее значения, получим

$$F \left[m(mx + (1 - m)y) + (1 - m) \sum_i \alpha_i(mx + (1 - m)y) g_i \right] = \\ = F \left[\sum_i \alpha_i(mx + (1 - m)y) g_i \right]. \quad (16)$$

В силу единственности чисел $\{\alpha_i = \alpha_i - \alpha_i\}$ в формулах (14) и (16) можно записать, что

$$\sum_i [m\alpha_i(x) + (1 - m)\alpha_i(y)] = \sum_i \alpha_i(mx + (1 - m)y); \\ \sum_i [m\alpha_i(x) + (1 - m)\alpha_i(y)] = \sum_i \alpha_i(mx + (1 - m)y), \quad (17)$$

где $m\alpha_i(x) + (1 - m)\alpha_i(y) = \alpha_i(mx + (1 - m)y)$. Отсюда следует, что α_i — это аддитивные и непрерывные (с учетом условия 3 теоремы 2), а значит, линейные функционалы в L_2 . Согласно теореме Рисса об общем виде линейного функционала [3] получим

$$\alpha_i(x) = F(x) = \int_{t_1}^{t_2} x(t) e_i(t) dt, \quad (18)$$

где $e_i(t)$ — фиксированные линейно-независимые функции из M . Теорема доказана. Отсюда следует, что условия теоремы определяют конкретный вид функции F как линейного оператора на данном множестве функций.

На практике может представлять интерес также и другая система условий линейности этой функции.

Теорема 3. Для того чтобы оператор F был линейным на выпуклом множестве $M \subset L_2$, необходимо и достаточно, чтобы для него выполнялись условия:

$$1) \text{ если } F(x_1) = F(y_1) \text{ и } F(x_2) = F(y_2), \text{ то} \\ F(mx_1 + (1 - m)x_2) = F(my_1 + (1 - m)y_2); \quad (19)$$

$$2) \text{ если } x_n \rightarrow x, y_n \rightarrow y \text{ и } F(x_n) = F(y_n), \text{ то} \\ F(x) = F(y), \quad (20)$$

где $x, x_1, x_2, x_n, y, y_1, y_2, y_n, mx_1 + (1-m)x_2, my_1 + (1-m)y_2 \in M$; $0 \leq m \leq 1$.

Необходимость очевидна. Для доказательства достаточности заметим, что подпространство S , рассмотренное в теореме 1, будет подпространством в L_2 как в линейном нормированном пространстве, т. е. замкнуто.

Действительно, пусть $\xi_n \in S$ и $\xi_n \rightarrow \xi$. Положим

$$x_n = \frac{|\xi_n| + \xi_n}{2}; \quad y_n = \frac{|\xi_n| - \xi_n}{2}; \quad x = \frac{|\xi| + \xi}{2}; \quad y = \frac{|\xi| - \xi}{2}.$$

Тогда $\xi_n = x_n - y_n$; $\xi = x - y$. Но $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x$; $\lim_{n \rightarrow \infty} y_n = y$, согласно

условию (20). Тогда очевидно, что $x_n, y_n \in M$, в силу условия (20) $F(x_n) = F(y_n)$. Поэтому $F(x) = F(y)$, т. е. $\xi \in S$ и S — замкнутое подпространство. Но S является классом эквивалентности фактор-пространства L_2/S [3].

Пусть $\{g_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) — базис в L_2/S . Тогда существует набор линейных функционалов $\{\alpha_i(x)\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), для которых равенства $F(x) = F(y)$ и $\alpha_i(x) = \alpha_i(y)$ равносильны. Этот базис может быть конечномерным или счетным [3].

На основании теоремы Рисса об общем виде линейного функционала получаем, что

$$\alpha_i(x) = F(x) = \int_{t_1}^{t_2} x(t) e_i(t) dt, \quad (2)$$

где $e_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) — фиксированные линейно-независимые функции. Поскольку других видов линейных функционалов в L_2 не существует [3], то функция F будет иметь лишь этот единственный вид. Теорема доказана.

Таким образом, мы определили две независимые системы условий линейности функции F на выпуклом множестве пространства L_2 , из которых вытекает одинаковая и единственная форма записи.

Рассмотрим вопрос о линейной независимости функций $e_i(t)$. Для условий, сформулированных в теореме 2, она вытекает из единственности набора чисел $\{\alpha_i(x)\}$, определенных согласно (18). Это можно показать следующим образом. Допустим, система функций $\{e_i(t)\}$ — конечномерна. Допустим также, что функции $e_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) линейно зависимы. Тогда хотя бы одна из них можно записать в виде линейной комбинации остальных, например:

$$e_1(t) = k_2 e_2(t) + k_3 e_3(t) + \dots + k_n e_n(t), \quad (2)$$

где k_2, k_3, \dots, k_n — вещественные числа. Согласно (18), линейный функционал имеет вид

$$\alpha_1(x) = \int_{t_1}^{t_2} x(t) e_1(t) dt.$$

Используя (27), полученное выражение запишем в виде

$$\begin{aligned} \alpha_1(x) &= \int_{t_1}^{t_2} x(t) (k_2 e_2(t) + k_3 e_3(t) + \dots + k_n e_n(t)) dt = \\ &= k_2 \alpha_2(x) + k_3 \alpha_3(x) + \dots + k_n \alpha_n(x). \end{aligned}$$

Значит, для некоторой функции $x(t)$ набор чисел $\{\alpha_i(x)\}$ не будет единственным, что противоречит условию 2 теоремы. Таким образом, в формуле (18) функции $e_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) являются линейно-независимыми.

Для условий теоремы 3 линейная независимость функций $e_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) в формуле (21) вытекает из конечномерности базиса, с помощью которого может быть задана любая система в пространстве L_2 . Но если известен базис системы $\{g_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), то каждый ее элемент $x(t)$ единственным образом представим [3] в виде

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i(x) g_i, \quad (23)$$

где $\alpha_i(x)$ — линейные функционалы, определяемые с помощью формулы (21).

Из единственности представления этого элемента следует единственность набора чисел $\{\alpha_i(x)\}$. Дальнейшее доказательство линейной независимости функций $e_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) аналогично ранее приведенному. Теперь мы можем констатировать, что все элементы, входящие в состав рассматриваемой модели, определены. Остается установить лишь адекватность данной модели и каждой из систем условий линейности, сформулированных в теоремах 1 и 2. Для этого, как известно, достаточно из модели вывести указанные условия.

Рассмотрим вывод условий теоремы 2. Для вывода условия (12) возьмем две произвольные пары функций $x_1(t), y_1(t), x_2(t), y_2(t) \in M \subset L_2[t_1, t_2]$, для которых выполняются соотношения:

$$\Phi(x_1, y_1) = Q[\varphi(F(x_1)), \varphi(F(y_1))] = 1; \quad (24)$$

$$\Phi(x_2, y_2) = Q[\varphi(F(x_2)), \varphi(F(y_2))] = 1. \quad (25)$$

Введем обозначения:

$$\xi_1 = \varphi[F(x_1)]; \quad \eta_1 = \varphi[F(y_1)], \quad (26)$$

$$\xi_2 = \varphi[F(x_2)]; \quad \eta_2 = \varphi[F(y_2)]. \quad (27)$$

Тогда, согласно (24) и (25), будут выполняться равенства

$$\xi_1 = \eta_1 \text{ и } \xi_2 = \eta_2. \quad (28)$$

Для каждой из взятых функций, в соответствии с (18), можно написать соотношения:

$$F(x_j) = \alpha_j(x_j) = \int_{t_1}^{t_2} x_j(t) e_i(t) dt, \quad (29)$$

$$F(y_j) = \alpha_j(y_j) = \int_{t_1}^{t_2} y_j(t) e_i(t) dt; \quad (i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2). \quad (30)$$

В связи с тем, что в формулах (26), (27) φ — это функция взаимно однозначного соответствия, то согласно (28) получим

$$F(x_1) = F(y_1) \text{ и } F(x_2) = F(y_2). \quad (31)$$

По определению выпуклого множества [2] каждая пара функций, являющихся ее элементами, должна удовлетворять условию $mx_1 + (1 - m)x_2 \in M$; $my_1 + (1 - m)y_2 \in M$. Каждое из этих выражений представляет собой некоторую функцию, поэтому их линейные функционалы имеют вид

$$\begin{aligned} \alpha_i(mx_1 + (1 - m)x_2) &= F(mx_1 + (1 - m)x_2) = \\ &= m \int_{t_1}^{t_2} x_1(t) e_i(t) dt + (1 - m) \int_{t_1}^{t_2} x_2(t) e_i(t) dt = \\ &= mF(x_1) + (1 - m)F(x_2), \quad (i = 1, 2, \dots, n). \end{aligned} \quad (32)$$

Аналогично

$$\begin{aligned} \alpha_i(my_1 + (1 - m)y_2) &= F(my_1 + (1 - m)y_2) = \\ &= mF(y_1) + (1 - m)F(y_2). \end{aligned} \quad (33)$$

Согласно (31), слагаемые правых частей равенств (32) и (33) попарно равны, поэтому равны и их левые части, т. е.

$$F(mx_1 + (1 - m)x_2) = F(my_1 + (1 - m)y_2). \quad (34)$$

Таким образом, мы доказали, что если выполняются равенства (31), то будет выполняться и (34), а это и есть условие (12). Для вывода условия 2 рассматриваемой теоремы запишем выражение (13) в виде

$$\beta_j [mx + (1 - m) \sum_i \alpha'_i(x) g_i] = \beta_j [\sum_i \alpha''_i(x) g_i], \quad (35)$$

где $\beta_j (j = 1, 2, \dots, p)$ — линейные функционалы, определяемые по формуле (18).

Раскроем скобки в этом выражении:

$$m\beta_j(x) + (1 - m) \sum_i \alpha'_i(x) \beta_j(g_i) = \sum_i \alpha''_i(x) \beta_j(g_i) \quad (36)$$

или

$$\sum_i [\alpha''_i(x) - (1 - m) \alpha'_i(x)] \beta_j(g_i) = m\beta_j(x) \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (37)$$

Нам нужно показать, что существуют числа $\alpha'_i(x)$ и $\alpha''_i(x)$, для которых выполняется равенство (37), причем разность $\alpha''_i(x) - \alpha'_i(x) = \alpha_i(x)$ определена однозначно.

Рассмотрим систему уравнений

$$\sum_i \alpha_i(x) \beta_j(g_i) = m\beta_j(x). \quad (38)$$

Заметим, что в ней система функционалов $\{\beta_j(g_i)\}$ линейно-независима, в силу линейной независимости функций $e_j(t)$ ($j =$

$= 1, 2, \dots, p$), входящих в выражения, описывающие линейные функционалы, как это было показано ранее. Поэтому существуют такие g_1, g_2, \dots, g_n , что определитель, состоящий из элементов $\{\beta_j(g_i)\}$ ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p$), отличен от нуля, а значит, существует единственное решение этой системы относительно $\alpha_i(x)$ ($i = 1, 2, \dots, n$), т. е. единственный набор чисел $\{\alpha_i(x)\}$ при данной совокупности функций $\{g_i(t)\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), что и требовалось доказать.

Условие 3 рассматриваемой теоремы вытекает непосредственно из того факта, что формула (18) описывает линейные функционалы. Отсюда следует, что система условий теоремы 2 и математическая модель, описанная в [2] с учетом (18), — адекватные понятия. Адекватность этой модели и системы условий теоремы 3 доказывается аналогичным образом, поскольку условие 1 из модели выводится точно так же, как соответствующее условие теоремы 2, а условие 2 вытекает из линейности функционала $\alpha_i(x)$, описываемого согласно (21).

Таким образом, из каждой рассмотренной системы условий линейности функции F можно вывести (с привлечением свойств рефлексивности, симметричности и транзитивности) только данную модель и ничто иное.

Аналогичные системы условий для элементов положительного конуса $K \subset L_2[t_1, t_2]$ и всего пространства сформулированы и доказаны в работе [4].

В этой работе нет лишь доказательства системы условий, аналогичной условиям теоремы 2 для положительного конуса.

Теорема 4. *Для того чтобы оператор F был линейным на положительном конусе $K \subset L_2$, необходимо и достаточно, чтобы он удовлетворял условиям:*

1) если $F(x_1) = F(y_1)$ и $F(x_2) = F(y_2)$, то

$$F(x_1 + x_2) = F(y_1 + y_2) \\ (x_1, x_2, y_1, y_2 \in K); \quad (39)$$

2) существует набор элементов $\{g_i\}$ ($g_i \in K$) такой, что для всякого $x \in K$ найдется единственная совокупность чисел $\{\alpha_i(x)\}$, удовлетворяющая условию

$$F\left[x + \sum_i \alpha_i(x) g_i\right] = F\left[\sum_i \alpha_i(x) g_i\right], \quad (40)$$

где $\alpha_i = \alpha_i^* - \alpha_i$; $\alpha_i^*, \alpha_i \geq 0$;

3) $\alpha_i(x)$ — непрерывные функционалы.

Нетрудно видеть, что эти условия проще аналогичных условий, сформулированных в теореме 2, поэтому доказательство их мы опускаем. По той же причине мы опускаем доказательство адекватности этих условий и рассматриваемой математической модели.

Другую систему условий для конуса, как показано в [4], можно сформулировать следующим образом.

Теорема 5. Для того чтобы функция F была линейной на положительном конусе $K \subset L_2$, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись условия:

1) если $F(x_1) = F(y_1)$ и $F(x_2) = F(y_2)$, то

$$F(\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2) = F(\beta_1 y_1 + \beta_2 y_2); \quad (41)$$

2) если $x_n \rightarrow x$, $y_n \rightarrow y$ и $F(x_n) = F(y_n)$, то

$$F(x) = F(y), \quad (42)$$

где $x, x_1, x_2, x_n, y, y_1, y_2, y_n \in K \subset L_2[t_1, t_2]$; β_1, β_2 — вещественные, положительные числа.

Для всего пространства $L_2[t_1, t_2]$ эти системы можно сформулировать в виде следующих теорем, доказанных в [4].

Теорема 6. Для того чтобы проектор F был линейным, необходимо и достаточно, чтобы он удовлетворял следующим условиям:

1) если $F(x_1) = F(y_1)$ и $F(x_2) = F(y_2)$, то

$$F(x_1 + x_2) = F(y_1 + y_2) \quad (x_1, x_2, y_1, y_2 \in L_2); \quad (43)$$

2) существует набор элементов $\{g_i\}$ ($g_i \in L_2$) такой, что для произвольной функции $x \in L_2$ найдется единственная совокупность чисел $\{\alpha_i(x)\}$, удовлетворяющая условию

$$F(x) = F\left(\sum_i \alpha_i(x) g_i\right); \quad (44)$$

3) $\alpha_i(x)$ — непрерывные функционалы. Как видно, эта система условий еще проще, чем аналогичная система для положительного конуса.

Вторая система условий для элементов L_2 отличается от условий, сформулированных в теореме 5, лишь принадлежностью функций не положительному конусу, а всему пространству L_2 . Ее вывод также вытекает из вывода теоремы 5, поскольку он сделан для воспроизводящего конуса. Согласно теореме Рисса о продолжении линейного функционала [3], этот вывод распространяется и для элементов пространства $L_2[t_1, t_2]$.

Заметим, что из каждой рассмотренной системы условий следует одинаковая форма записи функции F в виде соотношения (18), т. е. одинаковый вид рассматриваемой модели. Поскольку доказательство адекватности этой модели и всех рассмотренных систем условий осуществляется по ранее описанной методике, то мы его опускаем.

Таким образом, мы доказали две независимые системы условий линейности проектора F , входящего в состав ранее рассмотренной математической модели спектральной чувствительности органа зрения человека для всех видов множеств входных сигналов, описанных в [2]. Заменяя в каждом из этих условий абстрактные переменные на конкретные — функции спектральной интенсивности лучистой яркости $b(\lambda)$ в соответствии с требованиями об их принадлежности к тому или иному виду множеств, получаем аксиомы, описывающие цветоразличительные

свойства зрительной системы человека при раздельном и суммарном воздействии на нее различных световых стимулов. Назовем их аксиомами цветового зрения человека.

Аналогичные свойства были известны и ранее. Они назывались законами Грассмана. Различные формулировки этих законов приведены в работе [5].

Анализируя полученные нами аксиомы цветового зрения, легко видеть, что они существенно отличаются от всех известных законов Грассмана не только по форме, но и по содержанию.

Назовем наиболее существенные отличительные признаки.

1. Ни в одной из сформулированных в данной статье аксиом не используется понятие цвета или операции сложения цветов и умножения их на постоянные числа. Предметом их рассмотрения являются только излучения или отклонения излучений от заданного, т. е. объективные физические величины.

2. Экспериментальная проверка этих аксиом является наиболее простой и предусматривает использование органа зрения человека лишь в качестве нуль-органа по методике, описанной в [2], позволяющей получить объективные данные об их выполнении. Анализ многочисленных колориметрических экспериментов, проводимых ранее различными авторами и описанных в литературе [6], показывает, что все они выполняются с высокой степенью достоверности.

3. Формулировка аксиом сделана на строгом математическом языке, что значительно облегчает использование их при выводе модели.

4. Хотя из каждой системы в отдельности математически выводится модель цветового зрения человека, однако для всех видов множеств входных сигналов сформулировано по две системы аксиом. Это позволяет наиболее полно описать известные способы воздействия зрительных стимулов на орган зрения при проведении колориметрических экспериментов, а также значительно повышает достоверность полученной модели.

Запишем окончательный вид рассматриваемой модели:

$$\Phi [b_1, b_2] = Q [\varphi (F (b_1 (\lambda))), \varphi (F (b_2 (\lambda)))], \quad (45)$$

$$Q (\bar{S}_1, \bar{S}_2) = \begin{cases} 1, & \text{если } \bar{S}_1 = \bar{S}_2; \\ 0, & \text{если } \bar{S}_1 \neq \bar{S}_2; \end{cases} \quad (46)$$

$$\bar{S}_1 = \varphi [F (b_1 (\lambda))]; \quad \bar{S}_2 = \varphi [F (b_2 (\lambda))], \quad (47)$$

$$F (b) = a_i (b) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} b (\lambda) e_i (\lambda) d\lambda, \quad (48)$$

где $e_i (\lambda)$ ($i = 1, 2, 3$) — функции сложения цвета. Остальные обозначения те же, что и в работе [2].

Особенностью этой модели является то, что из нее непосредственно не вытекает вид функций $e_i (\lambda)$, а следует только то, что

эти функции должны быть линейно-независимыми, что позволяет использовать данную модель при исследовании цвета в различных колориметрических системах. Для конкретного определения функций сложения необходима постановка дополнительных экспериментов.

В заключение отметим, что поскольку эта модель получена путем строгих математических доказательств без привлечения каких-либо гипотетических предпосылок и на основании аксиом, использующих только объективные данные, то она также имеет объективный характер.

Высокая степень достоверности данной модели вытекает из строгости ее вывода и из того факта, что она опирается на две независимые системы аксиом для каждого вида множеств входных сигналов органа зрения, хорошо проверенных в многочисленных опытах и описывающих практически все известные способы преобразования зрительных стимулов при постановке колориметрических экспериментов.

Таким образом, рассматриваемая модель свободна от недостатков, описанных в работе [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич М. М. Введение в фотометрию. Л. «Энергия», 1968. 244 с.
2. Пчелинов В. П. Дедуктивное построение математической модели спектральной чувствительности органа зрения человека. Сообщение 1 (см. статью в настоящем сборнике).
3. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. М., «Наука», 1972. 496 с.
4. К вопросу математического описания линейных психофизических систем.— В кн.: Проблемы бионики. Вып. 8. Харьков, 1972, с. 56—58. Авт.: Л. М. Майстровская, В. П. Пчелинов, Е. Г. Качко и др.
5. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. Аксиоматическое построение модели цветового зрения.— В кн.: Проблемы бионики. Вып. 4, Харьков, 1970, с. 30—50.
6. Мешков В. В. Основы светотехники, ч. II. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961. 416 с.

Поступила 29 сентября 1976 г.

УДК 62.506.2

В. Ф. АНАНИН

МОЗГ КАК БИОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

В технике под системой в реальном масштабе времени имеется в виду система, использующая вычислительную машину для определения характеристик технических процессов, когда данные, поступающие в произвольное время (измеряемые величины, характеристики процессов), немедленно поступают в вы-

числительную машину и оцениваются независимо от того, какая в данный момент решается задача [1].

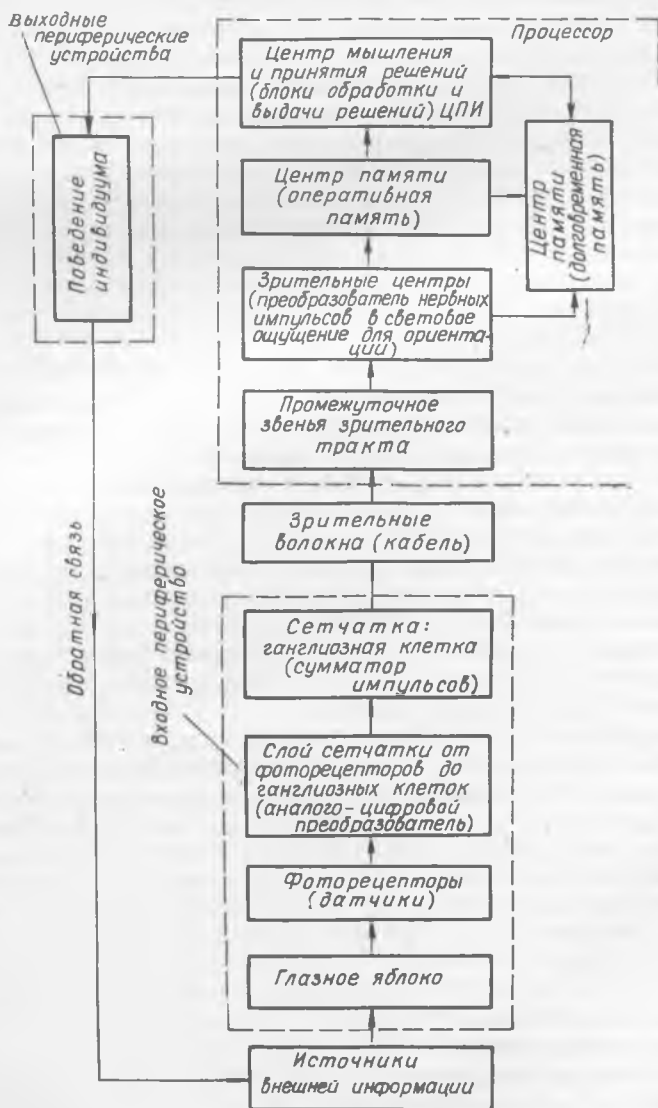
Мозг с его периферическими «устройствами» имеет определенные признаки сходства с подобными системами и в отдельных частных случаях его можно рассматривать как биологический вариант системы в реальном масштабе времени. На возможность оценки системы, включающей рецепторы, проводящие пути и мозг как единое целое, указывали многие исследователи. Так, И. П. Павлов [2] рассматривал подобную систему как «самонастраивающуюся», а П. К. Анохин считал, что «воспринимающие периферические аппараты и рабочие ответные органы составляют вместе с ЦНС динамическое единство, в котором только для отдельных случаев можно говорить с определенностью о доминировании того или другого». Именно этот вид систем в первую очередь привел П. К. Анохина к понятию функциональной системы [3].

Пытаясь установить аналогию подобной сложной биологической системы с наиболее сходной, по нашему мнению, технической системой в реальном масштабе времени, мы понимаем, что это сравнение грубое. Тем не менее между ними имеется целый ряд, на наш взгляд, общих принципиальных сторон в структурной организации и в назначении отдельных узлов системы. Составными звеньями системы в реальном масштабе времени являются периферийные датчики различного вида, фиксирующие те или иные изменения контролируемых объектов, устройства сопряжения с ЭВМ, ЭВМ со своими блоками памяти, арифметических устройств, логики и внешние устройства, которые приводятся в движения в соответствии с командами, поступающими из ЭВМ.

У мозга также имеются свои датчики, роль которых выполняют органы чувств: зрение, слух, обоняние, осязание и др. Через них мозг принимает афферентную информацию о внешнем мире, которая затем фиксируется в его памяти, обрабатывается, т. е. осмысливается, принимается решение и выдается команда на внешние устройства, определяющие, в конечном итоге, поведение индивидуума. На рисунке в виде блок-схемы по аналогии с технической системой мозг представлен как биологический вариант системы в реальном масштабе времени.

Рассмотрим работу этой системы на примере лишь одной ее подсистемы — зрительного аппарата. В данном случае роль датчика выполняет фоторецептор, на уровне которого происходит преобразование энергии внешнего возбудителя — фотона в генераторный потенциал. Как показано ранее [4], величина импульса фотона трансформируется на выходе фоторецептора в крутизну нарастания генераторного потенциала. Затем этот непрерывный потенциал через синаптическую передачу между внутренним сегментом фоторецептора и внутренним ядерным слоем сетчатки квантуется на пакет дискретных импульсов.

Таким образом, слой сетчатки на этом участке выполняет, с учетом аналогии с технической системой, роль входного биологического преобразователя, перестраивающего непрерывный



Общий вид блок-схемы «Мозг как биологическая система в реальном масштабе времени».

входной аналоговый сигнал в дискретный вид информации. Подобную роль в технической системе, как известно, выполняют

входные аналого-цифровые преобразователи. Заметим, кстати, что наличие входных преобразователей является одним из основных признаков системы в реальном масштабе времени. Это обстоятельство дополнительно указывает на правомочность аналогии мозга с подобной системой.

Далее на участке от биполярного до ганглиозного слоя происходит суммация импульсов, которые на выходе ганглиозной клетки формируются в групповую импульсацию. Эти слои сетчатки выполняют функции элементарного сумматора. Затем информация с выхода ганглиозной клетки по проводящим путям зрительного тракта поступает в конечном итоге в зрительные центры. Если продолжить аналогию с технической системой, то мы должны допустить в биологической системе наличие таких блоков в высших центрах мозга, как оперативная и долговременная памяти, арифметические и логические блоки, которые в общем виде можно рассматривать как биологический вариант процессора.

Разумеется, что проводимая аналогия поверхностна, так как мозг с его периферическими системами исключительно мобильная система, обладающая способностью адаптации к резким изменениям внешних условий. В то же время в технических системах мы имеем дело с более жестким программированием. Тем не менее эта аналогия, как нам кажется, приближает нас в отдельных частных случаях к более глубокому пониманию функционального назначения как отдельных участков, так и всей системы в целом.

Зрительные центры в системе выполняют роль одного из датчиков коры мозга, преобразующего нервную импульсацию с выхода сетчатки в своеобразную, свойственную только человеку, форму энергии в виде световых вспышек. Последняя, сформированная в виде образов, создает возможность ориентации человека в пространстве и одновременно является той самой информацией, которая поступает в блоки памяти. Кроме того, эта информация поступает также в центр переработки информации (ЦПИ), т. е. участок сознания по И. П. Павлову [2] или блок принятия решения, названный П. К. Анохиным акцептором результатов действия [3]. В биологической системе мозга блок сознания или акцептор является центральным. Однако сведения о нем крайне недостаточны. Так: «Сознание...— писал И. П. Павлов [2, с. 72] — представляется мне нервной деятельностью определенного участка больших полушарий, в данный момент, при данных условиях, обладающего известной оптимальной (вероятно, это будет средняя) возбудимостью». При этом сознание И. П. Павлов образно представлял в виде передвигающегося по большему полушарию постоянно изменяющегося в форме и величине причудливо неправильных очертаний светлого пятна [2, с. 12].

Зрительные центры с точки зрения осмысливания поступающей информации выполняют, видимо, всего лишь роль промежуточного преобразователя информации и вряд ли они активно участвуют в процессе обработки информации. Это предположение может быть подтверждено результатом возникновения раннего рецепторного потенциала (РРП) [4], латентный период которого составляет только десятки микросекунд. Такой короткий временной отрезок может указать лишь на возможность преобразования информации из одного вида энергии в другой, но не на факт ее осмысливания. Для этого требуется более длительный период, исчисляемый сотнями микросекунд. Поэтому инерционные характеристики зрительного аппарата, которые обычно получают с мелькающими объектами [5], скорее характеризуют не инерционность прохождения нервной импульсации с выхода фоторецептора до нейронного ансамбля зрительных центров, а инерционность ЦПИ.

Время первоначальной обработки, т. е. осмысливания поступившей информации τ_0 , видимо, занимает значительно больше времени, чем время, которое затрачивается на ее прохождение между блоками τ_n . Если судить по латентному периоду РРП, то соотношение между τ_0 и τ_n может быть в первом приближении определено как $\tau_n = 0,2\tau_0$. Заметим, кстати, что в технических системах, например, одно из требований состоит в том, что время обращения в оперативно-запоминающее устройство должно быть по крайней мере соизмеримо со временем выполнения арифметических и логических действий в арифметическом устройстве. В противоположном случае эффективность использования арифметического устройства резко падает. Учитывая значительно большую инерционность ЦПИ, трудно допустить, что τ_n могло быть соизмеримо или больше τ_0 . Проводимые нами опыты по кратковременному предъявлению простейших тестов в виде круга, квадрата, треугольника позволяли осмысливать видимое при минимальном предъявлении 10 *млсек*. Это не значит, что минимальное время срабатывания ЦПИ составляет 10 *млсек*, скорее это время можно рассматривать как минимально необходимое для подключения ЦПИ к процессу переработки информации.

Разумеется, что это время зависит от ряда параметров: сложности предъявляемого объекта, его контрастности, внимания испытуемого и др. Поэтому общее время инерционности зрительного процесса τ_3 определяется суммарным временем процесса кодирования информации на уровне сетчатки τ_0 , ее прохождением по проводящим путям зрительного тракта τ_r , декодированием в зрительных центрах τ_d и процессом первоначального осмысливания зрительной информации τ_0 . Отсюда следует, что

$$\tau_3 = \tau_0 + \tau_r + \tau_d + \tau_0. \quad (1)$$

В формуле (1) значения τ_r ; τ_d значительно меньше τ_0 . Значит, инерционность зрительного процесса определяется в основ-

ном временем осмысливания объекта, т. е. инерционностью ЦПИ. Как указывалось выше, τ_3 зависит от освещенности, сложности воспринимаемого объекта и ряда других причин. Если в качестве тест-объекта предъявляется обычное световое пятно, то от ЦПИ не требуется высокая активность, а инерционность зрительного процесса может быть ограничена:

$$\tau_3 \min = \tau_c + \tau_T + \tau_d. \quad (2)$$

В этом случае зрительный процесс как бы замыкается на уровне нейронных ансамблей зрительных центров этапом декодирования нервной импульсации в световое ощущение. С учетом формулы (2) время инерции этого участка зрительного процесса должно быть очень коротким и не превышать доли миллисекунд. Для раннего рецепторного потенциала оно, как известно, составляет сотые доли миллисекунд [4], в то время как, по данным А. В. Луизова [5], время инерции в зависимости от освещенности изменяется от 50 до 320 мсек. Автор особо подчеркивает, что инерционные эффекты в процессе зрения связаны не со временем передачи нервного импульса от сетчатки к мозговым центрам, а с процессом нарастания яркости в высших центрах.

При восприятии же объектов сложной формы, когда начинает активно работать ЦПИ, инерционность зрительного процесса, естественно, возрастает. Особенно это наглядно проявляется на изменении активности глазодвигательного аппарата и, в частности, его произвольной саккадической системы при фиксации точки разной интенсивности и объекта различной сложности. Так, частота скачков глаз при фиксации яркой точки меньше, чем при слабой яркости [6].

Эти факты можно интерпретировать следующим образом. Если временной интервал между скачками рассматривать как показатель работы ЦПИ, а точнее — его потребность в поступлении порций информации, то станет ясно, что при слабой освещенности, когда с выхода ганглиозной клетки частота импульсов в группе уменьшается, сила раздражения нейронных ансамблей высших центров понижается. В этом случае ЦПИ для осмысливания предъявляемого теста недостаточно качественная афферентная импульсация в группах как бы компенсируется ее количественным значением, т. е. более частым повторением групп нервных импульсов. Образно говоря, некачественный вид информации компенсируется ее количественной величиной. А поскольку группы импульсов возникают в результате скачка глаза, то получается, что частота скачков глаза в определенной степени может служить показателем работы ЦПИ.

При наличии же яркой точки частота скачков уменьшается, так как с каждым скачком на выходе сетчатки частота импульсов групп значительно повышается. Значит, для осмысливания информации ЦПИ требуется меньше групповых посылок

импульсов, так как плотная импульсация в каждой из них создает значительно большую возможность оценки информации ЦПИ с первой же посылки, что, в свою очередь, позволяет обойтись меньшим числом скачков глаза. Отсюда следует, что время инерции ЦПИ в первом случае больше, чем во втором, так как для оценки информации при слабой освещенности тест-объекта ему необходимо большее число посылок афферентной групповой импульсации, сопровождаемых пропорциональным числом скачков глаза.

К аналогичным выводам приводит нас сравнение характеристик произвольных саккадических движений глаз при фиксации световой точки и относительно сложного тест-объекта в виде цифры 3. Обнаружено, что при фиксации цифры 3 частота следования скачков меньше, чем при фиксации точки [7], поскольку при фиксации объекта в виде цифры 3 на ЦПИ в процессе скачка приходится большая нагрузка, чем при фиксации точки. Иначе говоря, при осмысливании ЦПИ более сложного тест-объекта требуется больше времени на анализ каждой посылки групповой импульсации, а отсюда возрастает его инерционность.

Сам факт взаимосвязи между ЦПИ и произвольными саккадическими движениями глаз подтверждается изменением режима работы саккадической системы под действием на испытуемого раздражителей, не связанных с изменением сигнала на выходе сетчатки. В данном случае речь идет о влиянии умственной нагрузки. Было показано [8], что концентрация внимания, связанная с решением различных задач при одновременной фиксации тест-объекта, приводит к резкому уменьшению числа скачков. Эти факты можно объяснить как результат переключения ЦПИ на решение новой задачи и соответственно на преимущественный прием, в данном случае эфферентной информации, из других участков мозга. Если проводить аналогию с ЭВМ, то мы имеем случай совмещения работы арифметического блока ЦПИ и приема внешней информации. Резкое уменьшение числа скачков свидетельствует прежде всего о снижении активности ЦПИ (или о полном отключении) к периферийному устройству — сетчатке.

Для технической системы в реальном масштабе времени наличие обратных отрицательных связей — один из ее важных признаков. В биологической подсистеме зрительного аппарата также имеется большое число различного рода отрицательных связей. Наиболее наглядно они проявляются в рефлексах зрительного анализатора: аккомодационного, зрачкового и др. Но если эти рефлекссы по отношению к зрительной системе можно рассматривать как подсистемы, отдельные из которых работают по принципу систем автоматического регулирования, а другие — по принципу следящих систем [8], то зрительный анализатор в целом, как биологический вариант многоконтурной си-

стемы связанного автоматического регулирования, по отношению к рассматриваемой системе мозга выполняет роль всего лишь одной из ее подсистем. Отсюда следует, что биологическая система мозга в реальном масштабе времени может быть оценена как типичный биологический вариант иерархической системы.

Представляет интерес связи процессора с комплексом периферических устройств. В технических системах эту задачу решают специальным устройством периодического опроса, частота обращения которого к каждому из них значительно превышает временные характеристики изменения аналогового сигнала в периферических устройствах. А в так называемой системе с разделением времени, обеспечивающей одновременное обслуживание нескольких пользователей в режиме непосредственного доступа (*on — line*), этого условия достигают специальной организацией памяти распределения (разделения) времени между пользователями. При этом в силу высокого быстродействия ЭВМ у каждого пользователя создается впечатление, что он единственный полностью эксплуатирует машину.

В биологической системе мозга эта связь имеет, видимо, принципиально другой характер. Она, по всей вероятности, обусловлена доминирующим влиянием зрительного канала, по которому в мозг поступает более 80% информации. Но вместе с тем из практики мы знаем, что наш мозг способен воспринимать одновременно информацию с нескольких датчиков, в том числе со зрительных и слуховых. Каким образом в этом случае происходит конвергенция и одновременная обработка информации со зрительного и слухового канала в ЦПИ?

Следует отметить, что в обоих каналах, равно как и в других сенсорных каналах, информация с выхода их датчиков имеет дискретный вид. Сам же принцип ее преобразования из аналоговой в дискретную форму для всех сенсорных датчиков является, видимо, общим. Если это так, то логично предположить, что структурная организация каждого сенсорного канала построена по единому принципу, начиная от датчика и кончая представительством своих центров в мозге (см. рисунок). По-видимому, она наиболее схожа для зрительного и слухового каналов, которые являются основными поставщиками внешней информации в мозг. Подобно тому как в зрительном канале преобразование нервной импульсации трансформируется в световое ощущение на уровне нейронных ансамблей зрительных центров, так и в слуховом анализаторе колебания воздуха, приведенные источником звука, на уровне датчика слухового канала преобразуются в дискретную импульсацию, которая, в свою очередь, на уровне нейронных ансамблей слухового центра трансформируется в ощущение звука, свойственное только живой системе.

Отвечая на поставленный выше вопрос, в технической системе, как известно, информация предварительно поступает в оперативное запоминающее устройство, а оттуда в арифметический или логический блок. В системе мозга она первоначально поступает в свои специфические центры — зрительные, слуховые и другие, где дополнительно трансформируется в своеобразные свойственные только живой системе, ощущения. Именно благодаря этой трансформации и создается возможность ориентации «живого» в пространстве. В технической системе подобное преобразование отсутствует, что составляет принципиальное отличие биологической системы от технической.

Возможно, в биологической системе информация также первоначально поступает в блоки оперативной памяти, откуда она далее следует в арифметический или логический блок, т. е. ЦПИ. Но механизм ее дальнейшей обработки в ЦПИ и выдачи результатов этой обработки на внешние выходные устройства определяющие, в конечном итоге, цель поведения индивидуума представляет, по-видимому, кульминационный момент в понимании всей работы биологической системы мозга как системы в реальном масштабе времени.

При этом важно понять сам принцип работы решающих блоков «процессора» биологической системы, в основе которых в отличие от технических систем, заложены биохимические механизмы. Не исключено, что в обеих системах имеются общие структурные принципы, ибо общим у них является дискретный импульсный вид информации, к которой, естественно, должны были соответствующим образом адаптироваться нейроны этих блоков. Мы, конечно, далеки от предположения, что в биологической системе действует двоичная система исчисления, свойственная техническим системам. Тем не менее общим для них является то, что в обеих системах имеет место на входе и выходе переход от одной системы исчисления к другой, а внутри каждой из них действует кодовая система исчисления.

Так, мы допускаем, что временные интервалы между одними иными импульсами, их пакетами и группами и соответственно численные значения импульсов в них являются своеобразными кодами в системе мозга, на основе которых создана биологическая система исчисления, общая для всей системы мозга, и на ее основе осуществляются соответствующие операции осмысливания информации. Если это так, то предположение о наличии общего механизма преобразования внешней информации первоначально в аналоговый сигнал, а затем дискретный для всех сенсорных каналов является неременным условием последующего анализа информации. Трудно допустить, что в каждом сенсорном канале существует своя система исчисления. Если бы это было так, то ЦПИ должен был бы выработать несколько систем исчисления для обработки поступающей информации, что значительно усложнило бы его работу. Поэтому возмож-

допустить, что в биологической системе действует общая система исчисления для всех сенсорных каналов и связи между блоками биологического «процессора». Задача состоит в том, чтобы понять механизмы кодирования этой системы исчисления, которые, в конечном итоге, сводятся к интегральной и дифференцированной оценкам энергетических характеристик внешнего раздражителя [4].

Принципиальным отличием биологической системы мозга от ее подсистем как зрительного и слухового анализаторов состоит в том, что в этой системе присутствует акцептор. П. К. Анохин [3] рассматривал его как один из наиболее сложных аппаратов в функциональной системе, ответственный за принятие решения и прогнозирование признаков будущего результата. «Принятие решения,— писал П. К. Анохин,— один из самых интересных моментов в развертывании системных процессов...» [3, с. 50], «...а сама проблема реализации принятого решения в физиологическом плане должна объяснить два важных вопроса: какие механизмы производят отбор научных данных в данный момент степеней свободы... и где может быть преимущественная локализация этого в высшей степени конденсированного процесса, который одновременно обрабатывает на основе доминирующей мотивации всю прошедшую в мозг афферентную информацию, производит непрерывное сопоставление этих результатов с прошлым опытом и, наконец, переводит результаты этой обработки на эфферентные пути, точно соответствующие распределению возбуждений для совершения нужного акта, обеспечивающего получение нужных результатов?» [3, с. 52]. Подобные представления П. К. Анохина о роли акцептора во многом напоминают признаки технической системы в реальном масштабе времени. Роль доминирующей мотивации в первом приближении выполняет программа, заложенная в машине, а сам путь прохождения афферентной информации, ее обработка и подачи команд в виде эфферентных посылок на различные эффекторы (т. е. внешние выходные устройства) во многом напоминают структуру технической системы.

Однако не все системы работают на основе биологического «процессора». Принцип действия целого ряда более мелких подсистем, входящих в указанную выше систему, скорее построен по принципу рефлекторной дуги. Мы имеем в виду, прежде всего, рефлексы зрительного анализатора: зрачковый, аккомодационный, контур регулирования внутриглазного давления и другие. Эти подсистемы работают по принципу технических систем автоматического регулирования, направленные на оптимальное поддержание входного сигнала применительно к конкретным условиям, а в их работе наблюдается определенный «автоматизм».

По-видимому, обратная связь в этих контурах начинается на уровнях, предшествующих уровню ЦПИ. Значит, принцип

действия этих подсистем не связан непосредственно с «процессом» принятия решения и осуществляется автономно. При этом цель каждой из них состоит в регулировании оптимальной величины своего критерия. Например, в подсистеме аккомодационного рефлекса таким критерием является максимальная величина градиента частоты импульсов от смежных зон суммации в контуре регулирования внутриглазного давления — величина притока и оттока внутриглазной жидкости, в зрачковом рефлексе — плотность фотонов на рецептивном поле.

В каждом из этих случаев оптимальная величина критерия применительно к конкретным условиям осуществляется рефлекторно. Трудно допустить, что их величина регулируется в виде эфферентных посылок, сформированных по решению акцепторов. Они выполняют всего лишь вспомогательные роли в общей системе мозга.

И, наконец, общим для биологической и технической системы является то, что обработка информации и принятия решения начинается с «закладки» информации в блоки памяти. Недостаточный объем ее приводит в обеих системах к соответствующей степени достоверности принятого решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров А. Е., Алексеев В. Е., Титов М. А. Вычислительная техника в инженерных и экономических расчетах. М., «Высшая школа», 1970, 301 с.
2. Павлов И. П. Избранные труды. Учпедгиз, 1950. 263 с.
3. Анохин П. К. Очерки по физиологии функциональных систем. М., «Медицина», 1975. 448 с.
4. Ананин В. Ф. Биотехнический подход к исследованию механизмов кодирования внешнего стимула в сетчатке глаза человека и их роли в зрительном процессе.— В кн.: Проблемы бионики. Вып. 18, Харьков, 1970, с. 61—70.
5. Луизов А. В. Инерция зрения. М. Оборонгиз, 1961. 164 с.
6. Филин В. А., Ананин В. Ф. Непроизвольные движения глаз при наличии и отсутствии точек.— «Физиол. журн. СССР», 1973, т. IX, с. 547—551.
7. Филин В. А., Ананин В. Ф., Дымов М. В. Непроизвольные движения глаз при опознании точечных объектов.— «Вопросы психологии», 1973, № 4, с. 128—132.
8. Филин В. А., Сидоров С. П. Непроизвольные движения глаз при умственной нагрузке.— «Высш. нервн. деят.», 1972, т. 22, вып. 4, с. 688—691.
9. Ананин В. Ф. Аккомодация как биологическая система автоматического регулирования.— «Физиол. журн. СССР», 1975, т. XI, № 8, с. 1190—1194.
10. Ильинский О. Б., Чалисова Н. И. Проблема образования и регуляции рецепторов позвоночных животных.— «Успехи биол. наук», 1975, т. 80, вып. 3(6), с. 441—453.

Поступила 10 сентября 1976

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ОПИСАНИЙ СЛОЖНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ КАК СПОСОБ РЕГУЛИРУЕМОГО СЖАТИЯ ИНФОРМАЦИИ. СООБЩЕНИЕ I

Факторы сложности описания, стоимости или объема описания изображений и программ их обработки, которым не уделяется достаточного внимания в большинстве программ опознавания, являются существенными при разработке моделей зрительного анализатора. Кроме того, для зрительного анализатора, программируемого некоторой внешней (например, моторной) системой, существенно наличие не единственной, а множества допустимых задач классификации (может быть, бесконечного, но счетного) с некоторым распределением вероятностей на нем. В этих условиях построение эффективной модели зрительного анализатора может мыслиться в виде решения некоторой оптимизационной задачи с ограничениями.

Одним из варьируемых факторов в такой задаче является пространство описания, т. е. совокупность параметров описания из некоторого множества возможных совокупностей. Распределение вероятностей на множестве задач индуцирует распределение вероятностей на множестве множеств параметров. Если измерять количество информации, необходимой для описания изображения, в виде функции числа отсчетов, нужных для восстановления функции яркости, то желательно иметь процедуру, которая в зависимости от ограничений, наложенных на вид функции яркости, позволила бы породить класс изображений из некоторого «несущего» множества отсчетов меньшей мощности.

Такая процедура позволяет, не описывая индивидуально каждую реализацию отсчетами, описывать ее как элемент класса заданием значения соответствующего параметра и тем самым ввести координатное описание формы изображения в выбранном пространстве параметров.

Выбор способа параметризации, по существу определяющий используемую модель генерации изображения, представляет достаточно сложную задачу. Универсальный способ заключается в применении к исходной поверхности — функции яркости — двумерного дифференциального оператора. Разумеется, такой подход позволяет получить сжатие информации не для всякой функции, а лишь для некоторого класса функций, например, гармонических или финитных. В этом случае можно установить взаимно-однозначное соответствие между значениями функции в области и на контуре. В зависимости от вида дифференциального оператора контур может соответствовать внешнему контуру фигуры (лапласиан) или среднему контуру (уравнение теплопроводности).

Помимо процедуры вычисления пространственной производной и квантования возникающего в процессе дифференцирования рельефа могут быть использованы и другие, более эффективные в условиях воздействия помех процедуры. В частности могут быть использованы анизотропные фильтры для нахождения линий контура как экстремалей преобразования, осуществляемого фильтрами.

Мы будем рассматривать процедуру сжатия, выполняемую два этапа: на первом этапе — приведением к описанию изображения в виде функции, заданной на контуре, и на втором — рациональным кодированием контуров путем идентификации участков этих контуров по их принадлежности к конечному числу классов «эталонных кривых». При этом предполагается, что существенной для описания класса изображения информацией является не столько значение функции на контуре, сколько сам вид функциональной зависимости, определяющей контур. Выбирая эталонные формы для идентификации участков контура, можно использовать дополнительные знания о физике процесса порождения изображения (например, треков или рукописи). Кроме того, на этом этапе кодирования могут быть использованы принципы, известные из гештальт-психологии, соответствии с которыми для зрительного восприятия невозможно выделить произвольную комбинацию элементов исходного описания, а элементы группируются по определенным принципам:

группируются исходные формы и пространственно-близкие объекты;

используется свойство наилучшего продолжения контура;

выделяются замкнутые контуры, фигура делится на части.

Рассмотрим методы сжатия кривых, основанных на их идентификации посредством регрессионного анализа.

Пусть $P = \{x, y\}$ — точка плоскости и $g(P)$ — вещественная неотрицательная функция $0 \leq g(P) \leq 1$, определяемая степенью почернения элементов изображения в конечной части плоскости в виде прямоугольника $0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq H$.

Дискретный аналог этой функции — $g_A(P_A)$, $P_A = \{x_k, y_l\}$, $k, l = 1, 2, \dots$. Уравнение контура области определяется отсечкой функции яркости на некотором уровне ϵ и определяется из уравнения $g(P) = \epsilon$. Как известно, если функция $g(P)$ внутри области $D(P) = 0$ может быть аппроксимирована гармонической функцией, то решение задачи Дирихле позволяет по значениям некоторой функции $\varphi(P)$ на контуре $D = 0$ построить гармоническую во внутренней D^+ -или внешней D^- -области функцию, предельные значения которой на контуре совпадают с заданной функцией $\varphi(P) = g(P)$.

Если мы задали на контуре D функцию, являющуюся предельным значением аналитической $\Phi(P)$, то для того чтобы $\Phi(Q)$ была краевым значением $\Phi(P)$ в областях D^+ и D^- , должны

выполняться известные условия аналитической продолжимости функции. Когда необходимо по значениям действительной части $\varphi(Q)$ построить гармоническую в области D^+ или D^- функцию $U(P)$, предельные значения которой на контуре совпадают с заданной функцией $\varphi_1(P)$, то можно задавать независимо лишь действительную часть. По заданной на границе области вещественной части определяется аналитическая в области функции $U(P)$, а по ней интегрированием уравнений Коши — Римана с точностью до произвольного слагаемого находится гармоническая функция $U(P)$. Эту задачу можно записать в виде интегрального уравнения с ядром Стильтеса

$$U(P) = \begin{cases} \iint U(Q) dF(Q, P), & P \in R, \\ \varphi(P), & P \in D, \end{cases}$$

где R — открытое множество D^+ или D^- с границей D .

Для гармонических функций решение задачи Дирихле при помощи функции Грина может быть сведено к интегральному уравнению вместо решения дифференциального уравнения в частных производных. Вид ядра интегрального уравнения и способ аналитического продолжения зависят от физических условий задачи. Так, для уравнения теплопроводности можно записать

$$U(x, y, t) = \int_0^t \int_0^L \int_0^H G(x, \xi, y, \eta, t - \tau) f(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau + \\ + \int_0^L \int_0^H G(\xi, \eta, y, x, t) \varphi(\xi, \eta) d\xi d\eta,$$

где

$$G(x, \xi, y, \eta, t - \tau) = \begin{cases} \frac{i}{2\pi a^2 (t - \tau)} e^{-\frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{4a^2 (t-\tau)}}, & t > \tau, \\ 0, & t \leq \tau. \end{cases} \quad (1)$$

Однако гармонические функции представляют сравнительно узкий класс функций и с точки зрения применимости рассмотренных методов интересно проанализировать условия, при которых их можно использовать для описания изображений.

Нас интересуют условия, при которых такой переход будет оправданным, т. е. возможность однозначного представления функции, заданной на контуре. Воспользуемся тем обстоятельством, что в реальных системах считывания анализируемое изображение обычно представляет собой выходной сигнал пространственного фильтра:

$$g(P) = \iint g(M) W(M, P) dM, \quad (2)$$

причем весовая функция $W(M, P)$ быстро падает вне некоторой окрестности нуля.

Кроме того, считываемое изображение всегда имеет ограниченную протяженность и, следовательно, его преобразование Фурье

совпадает со значениями целой аналитической функции в целочисленных точках на действительной оси комплексной плоскости. Если же, наоборот, ограничен спектр функции яркости, что практически всегда имеет место в реальных физических системах, то функция (интегрируемая с квадратом), спектр которой обращается в нуль вне конечного интервала, может быть аналитически продолжена в области комплексного переменного. Рассмотрим способ аналитического продолжения с помощью волновых функций вытянутого сфероида финитного изображения. Предположим, что изображение $g(P)$ имеет конечные размеры. Тогда представляющий его Фурье-спектр $F(U, V)$ бесконечен. Следовательно, если мы хотим, например, по значениям $F(U, V)$, измеренным или известным нам в конечной области, восстановить значение самой функции, мы должны использовать метод аналитического продолжения [1].

Пусть заданы $T > 0$, $\Omega > 0$ и система функций $\{\psi_i(t)\}$ $i = 0, 1, 2, \dots$, а также совокупность характеристических чисел $\lambda_0 > \lambda_1 > \lambda_2$, причем ψ_i обладают свойствами: $\psi_i(\omega)$ — преобразование Фурье; $\psi_i(t)$ при $|\omega| > \Omega$ равны нулю и функции ортогональны на бесконечном интервале:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi_i(t) \psi_j(t) dt = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i = j \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, \end{cases}$$

$$\int_{-T/2}^{T/2} \psi_i(t) \psi_j(t) dt = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ \lambda_i & i = j \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, \end{cases}$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n} \psi_n(t) \psi_n(t') = \delta(t - t'),$$

$$\lambda_i \psi_i(t) = \int_{-T/2}^{T/2} \frac{\sin \Omega(t-s)}{\pi(t-s)} \psi_i(s) ds,$$

$$K_n \psi_n(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\Omega}^{\Omega} e^{j\omega t} \psi_n\left(\frac{\omega T}{2\Omega}\right) d\omega,$$

$$\psi_n(-t) = (-1)^n \psi_n(t). \quad (3)$$

Пусть $g(x, y) = 0$ при $|x| > A$, $|y| > B$ и известны значения $F(U, V)$ при $|U| \leq \frac{\alpha}{2}$, $|V| \leq \frac{\beta}{2}$. Требуется определить значение $F(U, V)$ для всех U, V :

$$F(U, V) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} a_{ij} \psi_i(U) \psi_j(V), \quad (4)$$

причем $a_{mn} = \frac{1}{\lambda_m \lambda_n} \int_{-\alpha/2}^{\alpha/2} \int_{-\beta/2}^{\beta/2} F(U, V) \psi_m(U) \psi_n(V) dU dV$.

Здесь $\psi_i(U)$ — волновые функции вытянутого сфероида при $T = \alpha$, $\Omega = A$; $\Phi_j(0)$ — такие же функции при $T = \beta$, $\Omega = B$.

Таким образом, вычислив коэффициенты a_{mn} , мы аналитически продолжаем ее значение с помощью функции (4) или с помощью ее аналога с конечным числом суммируемых членов

$$F_{MN}(U, V) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} a_{ij} \psi_i(U) \Phi_j(V)$$

на всю плоскость комплексного переменного.

Возвращаясь к задаче параметризации описания, заметим, что в ее постановке имеется одна особенность: в отличие от задачи Дирихле значения функций на контуре являются искомым параметрическим описанием функции $g(P)$, описывающей изображение и заданной явно. Значит, в уравнении (2) искомой является не функция $U(x, y, t)$, так как она задана (в данном случае это $g(P)$), а функция $f(\xi, \eta, \tau)$.

Известно, что задача восстановления исходной функции по отклику линейного фильтра разрешима только в классе целых функций конечной степени, а принципиальная возможность этого устанавливается преобразованием Бореля.

Целой функции конечной степени $f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n}{n!} z^n$ ставится в соответствие ассоциированная по Борелю функция $\varphi(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n}{z^{n+1}}$; так что $f(z) = \frac{1}{2\pi} \int_C e^{z\xi} \varphi(\xi) d\xi$, $\varphi(z) = \int_0^{\infty} e^{-z\xi} f(\xi) d\xi$, где C — некоторый контур.

На практике распространены два подхода к построению вычислительных алгоритмов и к нахождению контурного описания двумерного изображения.

Первый метод, применяемый для линейчатых или штриховых изображений, использует две итеративно применяемые операции: а) вычисление значений некоторой функции, такой, что эта функция на граничных точках изображения принимает наименьшее значение; б) отбрасывание точек изображения с малыми значениями функции. Этот метод, известный под названием метода утоньшения изображения, применялся в различных модификациях, однако теоретические основы используемой процедуры и условия применимости метода не были исследованы. Между тем метод, как правило, плохо работает в местах топологических особенностей (разветвление, пересечение) и его необходимо дополнять различными эвристическими программами. Считая, что мы отправляемся от решения задачи (2) или в более общей интерпретации задачи решения интегрального уравнения Вольтерра второго рода:

$$\varphi(p) - \lambda \int_{p_0}^p k(p, Q) \varphi(Q) dQ = \psi(p)$$

и ищем неизвестную функцию $\psi(p)$, поступим следующим образом.

Воспользуемся методом последовательных приближений, предполагая, что $\varphi(p) = \sum_{n=0}^{\infty} \lambda^n V_n(p)$. Тогда

$$\sum_{n=0}^{\infty} \lambda^n V_n(p) = \psi(p) + \lambda \int_{p_0}^p K(p, Q) \sum_{n=0}^{\infty} \lambda^n V_n(Q) dQ,$$

$$V_0(p) + \lambda V_1(p) + \dots = \psi(p) + \lambda \int_{p_0}^p K(p, Q) V_1(Q) dQ + \dots,$$

$$V_0(p) = \psi(p),$$

$$V_1(p) = \lambda \int_{p_0}^p K(p, Q) \psi(Q) dQ,$$

.....

$$V_{n+1}(p) = \lambda^{n+1} \int_{p_0}^p K_{n+1}(p, Q) \psi(Q) dQ,$$

$$\varphi(p) = \psi(p) + \lambda \int_{p_0}^p K_1(p, Q) \psi(Q) dQ + \lambda^2 \int_{p_0}^p K_2(p, Q) \psi(Q) dQ + \dots$$

По такому алгоритму работают так называемые методы утоньшения штриховых изображений, связанные с постепенным удалением граничных точек. Вначале берут исходное изображение (что соответствует $\psi(p)$), затем с помощью некоторого интегрального оператора его обрабатывают таким образом, чтобы пограничные или контурные точки изображения в результате обработки получили меньшие значения функции, чем внутренние точки. Повторяемая итеративно вместе с ограничением, т. е. отбрасыванием точек с малыми значениями вычисленной с помощью интегрального преобразования функции, процедура дает в конце концов осевую линию штрихового изображения. Однако отсутствие адекватного математического описания не позволяло до настоящего времени анализировать условия работы алгоритма, так как алгоритм в точках разветвления и пересечения штрихов не давал правильного ответа и его приходилось дополнять различными эвристическими процедурами «сшивания» разрозненных кусков осевой линии сложных разветвленных изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хуанг Э., Шрейдер Д., Третьяк А. И. Обработка изображений.— В кн.: Обработка изображений при помощи цифровых вычислительных машин. Вып. 14. М., «Мир», 1973, с. 17—47.
2. Дъедонне Ж. Основы современного анализа. М., «Мир», 1964. 430 с.

Поступила 27 июня 1975 г.

В. П. РОМАНОВ, канд. техн. наук, В. М. КИСЕЛЕВ

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ОПИСАНИЙ СЛОЖНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
КАК СПОСОБ РЕГУЛИРУЕМОГО СЖАТИЯ ИНФОРМАЦИИ.
С О О Б Щ Е Н И Е 2

Для построения осевой линии контурных изображений часто используются процедуры, основанные на решении дифференциального уравнения в частных производных разностными методами с «обращением времени».

Рассмотрим уравнение теплопроводности

$$U_t - U_{xx} - U_{yy} = 0$$

и его конечно-разностный аналог:

$$\frac{U(x, y, t+k) - U(x, y, t)}{K} =$$

$$= \frac{U(x+h, y, t+k) + U(x-h, y, t+k) + U(x, y+h, t+k) +$$

$$+ U(x, y-h, t+k) - 4Q(x, y, t+k)}{h^2}$$

или

$$\lambda U(x+h, y, t+k) + \lambda U(x-h, y, t+k) + \lambda U(x, y+h, t+k) +$$

$$+ \lambda U(x, y-h, t+k) - 4\lambda U(x, y, t+k) -$$

$$- U(x, y, t+k) = -U(x, y, t).$$

Мы имеем три координаты x, y и плоскость времени (слой) — t .

Обозначим $t+k = \tau$ и $t = \tau - k$ и перепишем последнее соотношение в виде

$$U(x, y, \tau) = U(x, y, \tau - k) - \lambda [4U(x, y, \tau) - U(x, y+h, \tau) -$$

$$- U(x, y-h, \tau) - U(x+h, y, \tau) - U(x-h, y, \tau)]$$

или в виде

$$U(x, y, \tau - k) = U(x, y, \tau) + \lambda [4U(x, y, \tau) - U(x, y+h, \tau) -$$

$$- U(x, y-h, \tau) - U(x-h, y, \tau) - U(x+h, y, \tau)]. \quad (1)$$

Как видим, уравнение (1) может описывать переход от значения функции в τ -момент $U(x, y, \tau)$ к значению ее в момент $\tau - k$ $U(x, y, \tau - k)$. Таким образом, имеется возможность вычислить начальные значения функции в предположении, что они были заданы на контуре. Процедура получения по заданному двумерному распределению яркости некоторой функции, заданной на контуре, получила название «скелетонизации» или построения скелета изображения. Из скелета, как уже говорилось выше, значение функции яркости в области может быть легко восстановлено. Однако, как определить начальные значения функции U ?

Ряд авторов (Блум, Розенфельд) предложили использовать функцию расстояния и преобразование расстояния. Для данной фигуры F на дискретной сетчатке и для произвольной точки P плоскости расстояние ее от фигуры определяется так [1]:

$$d(P) = \min(P, Q), Q \in F,$$

где F — множество точек фигуры; d — евклидово расстояние. Множество точек P , таких, что $I(P) = \{Rd(P, R) = d(P), R \in F\}$ содержит более одной точки, называется скелетом. Пусть даны две точки на плоскости P_i и P_j с евклидовым расстоянием $d = d(P_i, P_j)$. Обозначим $T(P_i^1, P_j^1)$ длину минимального пути на сетчатке между соответствующими точками евклидовой плоскости узлами сетчатки

$$T(P_i^1, P_j^1) \geq d(P_i, P_j).$$

Определим W — множество вершин сетчатки; I — множество вершин, соответствующих точкам фигуры (представленной только своим контуром); E — множество точек, внешних по отношению к фигуре, причем это могут быть и точки, лежащие внутри контура $E = U - I$. Возьмем некоторую точку и введем функцию расстояния для точек сетчатки, вычисляя это расстояние в виде кратчайшего пути на графе сетчатки от данного узла до вершины P_N^1 . Свяжем точку P_N^1 со всеми $P_N^1 \in J$ дугой длины 0. Для каждой вершины P_i^1 мы можем найти минимальный путь, ведущий в P_N^1 . Определим внешнюю точку P_i^1 как точку скелета, если и только если $P_i^1 \in E$ и эта точка не принадлежит минимальному пути в P_N^1 от любой другой вершины.

Для упорядочения нумерации точек сетчатки в окрестности некоторой центральной точки используем последовательности Фейри порядка n :

$$\begin{aligned} n = 1 & \quad 0, 1 \\ n = 2 & \quad 0, 1/2, 1 \\ n = 3 & \quad 0, 1/3, 1/2, 2/3, 1 \\ & \quad \dots \dots \dots \\ n = 6 & \quad 0, 1/6, 1/5, 1/4, 1/3, 2/5, \\ & \quad 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 1. \end{aligned}$$

Кратчайший путь на графе может быть определен методом динамического программирования. Мы используем итеративный алгоритм нахождения расстояния точек от фигуры $T_i^1 = 0$, если $P_i^1 \in J$, $T_i^1 = \infty$, если $P_i^1 \in E$, $T_i^1 = \min(t_{ij} + T_j^1)$; если $P_i^1 \in E$, $E_{i1} = \{P_j^1 | j < i\}$, $T_i^2 = \min(t_{ij} + T_j^2, T_i^1)$, $i = N - 1, \dots, 1$; если $P_i^1 \in E_{i2}$, $E_{i2} = \{P_j^1 | j > i\}$, $U = E \cup I = E_{i1} \cup E_{i2} \cup \{P_i^1\}$.

Пусть $S = \{P_k | P_k^1 \in E\}$. Для каждого P_i (прямо связанного с P_k^1 , $T_k^2 \neq T_i^2 - t_{ik}$) — присвоим в каждой точке параметр T_i^2 . Таким образом, в этом методе граничным точкам фигуры присваиваются значения функции $U = 0$, как расстояние до некоторой внешней точки, а для остальных точек — как значение кратчайшего пути. Точки скелета образуют линию, вид которой зависит от формы изображения, а значения функции на этой линии соответствуют расстоянию от контура исходной фигуры. Построение скелета фигуры соответствует заданию некоторой функции, в данном случае функции расстояния, взаимно-однозначным образом зависящее от формы исходной фигуры. Заметим, что ни в одной из рассматриваемых выше процедур вопросы помехоустойчивости алгоритма построения параметрического описания рассмотрены не были. Если же исходное изображение значительно искажено шумами, то для получения координат точек, принадлежащих осевой линии штриховых изображений, могут быть использованы алгоритмы прослеживания в сочетании с фильтрами, выбранными на основе теории статистических решений.

Предположим, что мы имеем сложное, разветвленное изображение, представленное в виде черных штрихов достаточной контрастности. Пусть, разрабатывая физическую модель зрительно-го анализатора, мы выбрали соответствующим образом размер растра, шаг развертки и коэффициент увеличения оптической системы. Предположим, что мы используем принцип сканирования такого изображения с помощью развертки, имеющей программное управление, а также управление от схемы анализа изображения с помощью контура обратной связи. Имеется алгоритм осмотра поля и алгоритм поиска, обнаружения и захвата изображения, построенный подобно схеме обнаружения сигнала на фоне помех.

Как только срабатывают схема обнаружения и схема захвата штриха, включается блок управления разверткой от устройства анализа. В этом случае работают схемы анализа — фильтры, образующие E -систему. Происходит поиск середины штриха, определение направления касательной к контуру, оценка направления перемещения растра. Схема из нескольких максимально смещенных относительно друг друга согласованных фильтров выделяет середину штриха и измеряет координату точки, принадлежащей средней линии штриха. В этой точке производится съем значений координат (x, y) середины штриха.

Затем в соответствии со шкалой приоритетов анализируются и выбираются возможные направления и шаг перемещения развертки. После этого вновь производится поиск середины штриха и съем координат точки, принадлежащей осевой линии штриха. Специальные меры принимают для того, чтобы не «пропустить» какие-либо существенные особенности (изломы, разветвления) изображения, в частности, просматривают достаточно большую

окрестность точки, в которой снимают значения координат. Снимаемые последовательно координаты x_k , y_k средней линии штриха поступают на обработку в ЭВМ. Целей обработки несколько. Во-первых, эти значения используют для постоянной подгонки к ним уравнения регрессии. Вначале, когда точек мало (одна, две или три), используют линейную экстраполяцию, чтобы предсказать местонахождение следующей точки отсчета, а также взять величину шага перемещения развертки.

Программа регрессионного анализа работает следующим образом. Априорно известно, что получаемые данные могут укладываться в одну из конечного числа регрессионных зависимостей. Виды допустимых регрессионных зависимостей хранят в отдельном блоке, который образует долговременную память физической модели зрительного анализатора.

Классы выбирают на основе опыта обучением и периодически оценивают, что важно в предположении о кусочно-стационарном поведении среды задач. В зависимости от среды задач они могут модифицироваться. С этой целью программа время от времени производит пересмотр выбранных типов функциональных зависимостей и анализ возможности замены некоторых из них другими.

Таким образом, поступающие в ЭВМ значения координат должны укладываться в одну из заданных схем. Причем заранее неизвестны координаты начала или конца интервала применимости данного вида функциональной зависимости. Другими словами, при поступлении двух, трех, ..., n координат выдвигаются гипотезы, оцениваются и отсеиваются альтернативы, т. е. варианты зависимостей, которые не согласуются или хуже, чем другие, согласуются с поступающими значениями координат.

Это можно сделать, например, прогнозируя поведение функции, измеряя ошибку прогноза и используя зависимость каждого вида из числа допустимых. Наконец, принимают решение, если началось уменьшение степени совпадения подгоняемого класса кривой к наблюдаемым данным. Одновременно производят оценку интервала наилучшего совпадения варьированием координат граничных точек и поиском экстремума по этим переменным. Каждому участку изображения приписывают метку соответствующего эталонного класса, сопоставляя таким образом контуру описание в виде цепочки символов.

Рассмотрим теоретические вопросы, связанные с построением указанной процедуры кодирования.

Как видим, решающая процедура состоит из двух компонент — правила остановки (оценки интервала подгонки) и правила классификации. Примем наблюдаемые значения $x_1 = (x_1, \dots, x_n)$ s — выборочное пространство значений $x (n \geq 1)$; число их заранее не определено. Возможные варианты решений образуют в совокупности пространство решений $D = \{d_i\}$; решения принимают в соответствии с правилом $\delta(x_1, \dots, x_n) \in D$. Наблюдаемые значе-

ния связаны с параметром ω , определяющим вид зависимости, подгоняемой к наблюдаемым данным. Наблюдаемые данные дают некоторую информацию о значении ω , отдельные значения ω параметра W будем считать принадлежащими параметрическому пространству Ω .



Схема адаптивного последовательного анализа и идентификации участков кривых.

Если функция стоимости наблюдения C известна и задана функция потерь $L(\omega, d)$, мы можем записать функцию риска:

$$\rho(\xi, \delta) = \int_{\Omega} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \int_{\{N=n\}} L[W, \delta_n(\chi_1, \dots, \chi_n)] \prod_{i=1}^n f\left(\frac{\chi_i}{\omega}\right) \times \right. \\
 \left. \times \prod_{i=1}^n d\mu(\chi_i) \right\} \xi(\omega) d\nu(\omega) + \sum_{n=1}^{\infty} (C_1 + \dots + C_n) P_r\{N=n\}. \quad (2)$$

Здесь $\xi(\omega)$ — априорная плотность вероятности параметра ω ; $\xi(\omega/\chi_1, \dots, \chi_n)$ — апостериорная плотность вероятности ω ; $\{N = n\}$ — множество точек

$$(\chi_1, \dots, \chi_n) \in S^n = \underbrace{S \times \dots \times S}_n,$$

для которых $N = n$, где N — случайное число наблюдений, которые проводятся до принятия решения. Пусть

$$\rho_0(\varphi) = \inf_{d \in D} \int_{\Omega} L(\omega, d) \varphi(\omega) d\nu(\omega),$$

где $\varphi(\omega)$ — плотность вероятности параметра ω ; ρ_0 — минимальный риск принятия решения без дальнейших наблюдений. Если мы наблюдаем X и имеем апостериорную плотность вероятности $\varphi(\omega/X) = \varphi(X)$, то математическое ожидание риска ρ_0 следующее

$$E\{\rho_0[\varphi(X)]\} = \int_S \rho_0[\varphi(X)] dF(X/\varphi).$$

Поскольку приобретение дополнительной информации о значении параметров ω в результате производства наблюдений связано с затратами, оптимальная байесовская процедура последовательного решения предписывает закончить оценку, ограничившись наблюдениями $X_1 = \chi_1, \dots, X_{n-1} = \chi_{n-1}$, если

$$\rho(\xi_{n-1}) < E\{\rho_0[\xi_{n-1}(X)]\} + C.$$

В случае противоположного знака неравенства — наблюдать X_n (здесь ξ_{n-1} — апостериорная плотность вероятности параметра ω после $n-1$ наблюдений X).

Получаемые последовательно измерения являются коррелированными, их можно считать полученными путем линейного преобразования некоторых исходных некоррелированных значений, принадлежащих нормальному случайному процессу с нулевым математическим ожиданием.

Рассмотрим случай, когда эталонное изображение является штриховым и образовано движением элемента или элементарной площадки с распределением интенсивности $\omega(x, y)$, $\omega(x, y) > 0$, $\omega(x, y) \leq \varepsilon_0$ при $x^2 + y^2 \geq R_0^2$, а ε_0 и R_0 — заданные значения.

Элемент движется вдоль траектории, уравнение которой $\xi(t) = 0$, $\eta(t) = 0$ или $f(x, y) = 0$.

Предположим, что формирование штрихового изображения происходит из-за суперпозиции значений распределения интенсивности при движении вдоль траектории:

$$\begin{aligned} S(x, y, \vec{\xi}) &= \iint_{-\infty}^{\infty} \omega[x - \xi(t) - a, y - \eta(t) - b] dt \\ &= S[x, y, f(x, y)]. \end{aligned}$$

Анализируемое изображение является аддитивной смесью эталонного изображения и гауссовского шума. Как и ранее, мы считаем известной ковариационную функцию шума $R(\xi, \eta)$ и равным нулю математическое ожидание.

Предположим также, что оцениваемая траектория $f(x, y) = 0$ представляет собой выборочную функцию непрерывного (векторного) нормального случайного процесса с нулевым средним и ковариационной функцией $Q_f(x - \xi, y - \eta)$, где $r_f(x - \xi, y - \eta)$ — обратная ковариационная функция.

Анализируемое изображение имеет производную по $\vec{\xi}(t)$, которую для простоты записи будем рассматривать как производную по $f(x, y)$:

$$\frac{\partial S(x, y, f(x, y))}{\partial f(x, y)} = \left(\frac{\frac{\partial S(x, y, \vec{\xi}(t))}{\partial \xi}}{\frac{\partial S(x, y, \vec{\xi}(t))}{\partial \eta}} \right). \quad (3)$$

При этих предположениях $f(x, y)$ представима в виде

$$f(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} A_{mn} \Phi_m(x) \psi_n(y). \quad (4)$$

Здесь

$$\Phi_m(x) \psi_n(y) = \omega_m \int_a^b \int_c^d R_f(x - \xi, y - \eta) \Phi_m(\xi) \psi_n(\eta) d\xi d\eta;$$

$$A_{mn} = \int_a^b \int_c^d R_f(x, y) \Phi_m(x) \psi_n(y) dx dy;$$

$$R(x - \xi, y - \eta) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \omega_{mn}^1 \Phi_m(x) \Phi_n(\xi) \psi_n(y) \psi_n(\eta);$$

$$E\{A_{mn}\} = 0, \quad E\{A_{mn} A_{pq}\} = \omega_{pq} \delta_{pm} \delta_{qn}.$$

Коэффициенты A_{mn} — независимые случайные гауссовские величины, $\omega_{mn} = \frac{1}{\sigma_{mn}^2}$, где σ_{mn} — дисперсия компоненты A_{mn} вектора A .

Запишем априорную плотность условной вероятности:

$$F(A) = \prod_{\substack{m=0 \\ n=0}}^{\infty} \left(\frac{\omega_{mn}}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \omega_{mn} A_{mn}^2 \right).$$

Распространим ранее полученные по дискретной оценке параметров результаты на случай векторного параметра. Узнаем отношение правдоподобия

$$\Lambda(A) = \frac{P(A) F[g(r, \eta)/S(\xi, r, f(r, \eta))]}{F[g(r, \eta)/S_0(r, \eta)]}.$$

Вычислим производную отношения правдоподобия по $m - n$ — a компоненте векторного параметра и приравняем полученную производную нулю. В результате получим необходимое, но недостаточное условие существования оптимальной оценки по максимуму апостериорной вероятности:

$$A_{mn} = \omega_{mn}^{-1} \int_a^b \int_a^a \int_c^b \frac{\partial S(\xi, \eta, f(r, \eta))}{\partial A_{mn}} \Big|_{A_{mn} = \hat{A}_{mn}} \times \quad (5)$$

$$\times [g(\xi, \eta) - S(\xi, \eta, f(r, \eta))] r_{in}(x - \xi, y - \eta) dx dy dr d\eta.$$

рефлекторной деятельности. И гиппокамп, и новая кора участвовали в формировании условного рефлекса, но их роль в этом процессе была неодинаковой. Поскольку непосредственно в физиологическом эксперименте было трудно определить оптимальные условия взаимодействия гиппокампа и коры в динамике образования условного рефлекса, то был использован модельный подход (автоматная интерпретация).

Моделирование многих биологических процессов методом конечных автоматов позволяет хорошо ориентироваться в установлении оптимальных взаимоотношений между элементами совокупностей и коллективов [4—5].

В предлагаемой модели отдельные нейроны гиппокампального и коркового уровней рассматриваются как конечные автоматы A_1, A_2, \dots, A_n , которые обладают множеством входных (характеризующих интенсивность и длительность сигнала) и выходных параметров (характеризующих состояние — возбуждение или торможение). Внешняя среда $\varphi(t)$ характеризуется параметрами раздражителей, эквивалентными применяемым в наших экспериментах: звуком (частота 600 *гц*, громкость 15—20 *дб*, длительность 3, 5 *сек*), электрокожным раздражением конечности (частота 60 *имп/сек*, амплитуда 25—40 *в*, продолжительность 1,5 *сек*) и вспышкой света (энергия 60 *дж*, длительность 2 *мсек*). В качестве единицы времени выбирается период T , в реальном эксперименте соответствующий времени предъявления условного раздражителя, в течение которого в результате обучения система становится способной перестраиваться так, чтобы реагировать на сигнал реакцией безусловного типа. Проведение автоматов исследуется в моменты времени mT (m — число сочетаний условного раздражителя с безусловным: $m = 0, 1, 2, \dots, v$).

Для разных уровней организации управляющих систем полагаем различную информированность автоматов о среде. Так, для автоматов, моделирующих гиппокампальный уровень, информированность большая (неспецифичность реакций на раздражители), чем для автоматов коркового уровня. При функционировании автоматов вводятся потери U_k и V_k , где U_k — потери при передаче данных, а V_k — потери при обработке. Предполагается, что изменение информационных потоков между корковым и гиппокампальным уровнем зависит от оптимальности функционирования каждого из них. Выходом коркового уровня считается выработанная реакция на условный сигнал, а выходом гиппокампального уровня — информационный поток, оказывающий подстраивающее влияние на корковую деятельность и включающий мотивационный и эмоциональный компоненты.

Когда оба уровня работают не оптимально, то изменяется величина обратных связей J, J' и при этом осуществляется многоуровневое управление.

Пусть автоматам A_1, \dots, A_n в момент времени mT , $m = 0, 1, 2, \dots, v$ доступна вся информация, необходимая для определения

оптимального режима работы, и в течение периода T они могут выработать поведение, оптимальное для системы S в целом.

Рассмотрим случай, когда $m = 1$. При $m \geq 2$ подход аналогичен.

Информированность автомата A_k , $1 \leq k \leq n$ об изменениях внешней среды $\varphi(t)$ в $[mT(m+1)T]$, $m = 0, 1, 2 \dots v$, состоянии и действиях автоматов $A_1 \dots A_{k-1} A_{k+1} \dots A_n$ в момент времени mT , $m = 0, 1, 2 \dots v$, требует передачи, а также своевременной обработки этих данных — оптимальное поведение должно выработаться в течение времени T . Поэтому информированность порождает постоянные дополнительные потери A_k . Обозначим их соответственно через U_k и V_k и для простоты допустим, что они не зависят от состояния автомата A_k и периода T его функционирования. Потери на выработку оптимальной реакции, т. е. на выигрыш A_k , обозначим через d_k . Под потерями мы понимаем то количество энергии, которое расходуется на выработку единичной реакции. Общие потери при одноуровневой структуре S имеют вид

$$\sum (d_k + U_k + V_k). \quad (1)$$

Определим общие потери при двухуровневой структуре, когда разыгрываемая сумма та же. В этом случае она состоит из потерь автоматов первого уровня и потерь автоматов второго уровня. Потери в первом уровне, очевидно, зависят от выбранного влияния A_i^0 , $i = 1, 2, 3 \dots r$ — второго уровня управления. Так, в одном случае A_i^0 может влиять на выигрыш A_k , $k = 1, 2 \dots n$, который получит он на такт T работы при оптимальном поведении, а в другом — тот же самый для каждого $i \in [0, T]$.

Другими словами, A_i^0 в одном случае может представлять возможность A_k получить выигрыш в сумме не больше данной величины за T такт функционирования, а в другом — тот же самый, но уже для каждого $i \in [0, T]$, т. е. определить поведение A_k , $k = 1, 2 \dots n$, внутри интервала $(0, T]$. Цель A_i^0 в обоих случаях одна и та же — минимизировать потери на единицу выигрыша. Оба они, очевидно, потребуют разных условий от A_i^0 .

Пусть A_i^0 определяет выигрыш A_k за каждый такт его функционирования. Потери, обусловленные этим, такие:

$$\sum d_k \left[C_k - \sum_{i=1}^r \varphi(t) \right] + \sum \delta_k (C_k). \quad (2)$$

Здесь d_k — потери на единицу выигрыша A_k ; δ_k — потери, обусловленные переходом части функции A_k к A_i^0 . Значит, при централизации функций (имеется в виду наличие верхнего уровня A_i^0) есть свои потери на верхнем уровне, обозначенном через d_k . При децентрализации, т. е. отсутствии A_i^0 , потери, имеющиеся на верх-

нем уровне управления, частично перераспределяются на элементы нижнего уровня A_k . Среди всех C_k (ограничение характеристик применяемых раздражителей), удовлетворяющих условию $0 \leq \delta_k \leq \delta_k^*$; A_i^0 выбирает тот, который минимизирует (2). Цель A_i^0 — выбор поведения, которое обеспечивало ему выигрыш в раз-
мере δ_k в конце периода. Общие потери следующие:

$$\sum_k d_k^* \left[C_k - \sum_t \varphi(t) \delta_k(C_k) \right] + \sum_k d_k^{**}. \quad (3)$$

Если при заданном n и T выполняется условие

$$\sum_k (d_k + U_k + V_k) > \sum_k \left[d_k^*(C_k) - \sum_t \varphi(t) + \sum \delta_k(C_k) \right] + \sum_k d_k^{**}, \quad (4)$$

то введение второго уровня в совместных действиях автоматов $A_1 \dots A_n$ целесообразно, в противном случае — наоборот.

Таким образом, при фиксированных n и T вопрос введения второго уровня в S сводился к проверке условия (4). Однако такое решение вопроса является односторонним. Определение уровней управления в сложных игровых ситуациях должно еще основываться на особенностях протекающих процессов при системном подходе и связываться с назначением S . Так, в простом случае можно предположить, что существуют процессы двух типов: 1) однозначные, детерминированные и управляемые с различными интервалами времени изменения; 2) случайные, неконтролируемые, с различной длительностью и интенсивностью.

Управляемый процесс следует подчинить элементам высшего, например, второго уровня, если он претерпевает изменения во времени $> T$, и элементам первого уровня в противном случае. Наличие подобных процессов, влияние которых усиливается их тесной взаимосвязью, существенно и, вероятно, составляет характерную черту сложных систем. Сосредоточить их управление в одном месте не целесообразно, так как тогда управление оказалось бы настолько сложным (перегрузка потоков информации различного рода, требующая обработки и передачи с разной точностью и быстротой), что система не смогла бы функционировать, не говоря уже об оптимальности ее функционирования.

Таким образом, если элементы одного уровня системы не справляются с потоком информации или не могут выделить полезную информацию из шума, элементы другого уровня вмешиваются в работу низшего. И здесь существуют, безусловно, определенные пороги (динамически регулируемые), которые определяют интенсивность потока информации по каналу обратной связи. Автономность одних уровней освобождает другие уровни от необходимости постоянного участия в локальных регуляторных процессах. При этом высшие уровни только тогда могут выполнять свои функции, когда объединяемые ими эле-

менты низшего уровня взаимно скоординированы и интегрально действуют в соответствии с алгоритмом высшего уровня. При нарушении взаимной координации возникают помехи, шумы, что является сигналом для вмешательства элементов высшего уровня в деятельность низшего.

Такой модельный анализ результатов экспериментальных исследований подтверждает наше представление о возможном функциональном взаимодействии компонентов в двухуровневых системах управления. Это представление заключается в том, что необходимым условием оптимального функционирования каждого из рассмотренных уровней (кора — гиппокамп), обеспечивающим адаптивное поведение организма в изменяющихся условиях среды, является их тесное двустороннее взаимодействие, в результате которого один из них (кора) осуществляет нейрональные перестройки, приводящие к образованию новых условнорефлекторных связей, а другой (гиппокамп) — корректирует эти перестройки.

Модельное рассмотрение показало, что одним из условий, требующих взаимокоррекции этих уровней, является необходимость увеличения объема информации за тот же интервал времени T . Такая необходимость может возникнуть при изменении условий среды и потребности в образовании нового условного рефлекса, как формы адаптивного поведения. При первых сочетаниях условного и безусловного раздражителей в анализаторных системах коры возникает потребность в увеличении объема обработки информации, повышается пропускная способность, но падает надежность каналов переработки информации в коре, снижается количество информации импульсных потоков, возникает потребность в смене режима информационной деятельности коры. Для осуществления коррекции в гиппокампе происходят нейрональные перестройки, приводящие к укорочению латентных периодов, более быстрому охвату нейронной цепи волной возбуждения, изменению функциональных взаимоотношений. В результате смены режима осуществляется коррекция коркового уровня. Если подстройка, изменившая условия переработки информации на корковом уровне, оказалась эффективной, то новое корректирующее влияние гиппокампа возникает при следующем изменении поступающей информации. Такое воздействие уровней способствует выходу на оптимальный режим адаптивного поведения организма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туманян В. А. К вопросу информационного анализа импульсных потоков гиппокампальных нейронов — В кн.: Мозг и движение. Ереван, изд. АН АССР, 1973. 202 с.
2. Коган А. Б., Туманян В. А. О функциональной организации нейронов дорсального гиппокампа. — «Физиологический журнал СССР», 1975, № 1. 42 с.

3. Туманян В. А. Информационная деятельность клеток дорсального гиппокампа в динамике образования условного рефлекса.— В кн.: Проблемы нейрокибернетики. Ростов н/Д, 1976, 159 с.
4. Милсум Дж. Анализ биологических систем управления. М., «Мир», 1968. 501 с.
5. Цетлин М. Л. Исследования по теории автоматов и моделирования биологических систем, М., «Наука», 1969. 316.

Поступила 2 декабря 1976 г.

УДК 351.814, 33:62,506

П. П. НОВИКОВ, А. Г. РАПУТО

ОБНАРУЖЕНИЕ КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ В АЭРОДРОМНОЙ ЗОНЕ

Обнаружение и разрешение конфликтных ситуаций рассматривается сегодня как основное направление в автоматизации принятия решений в системах управления воздушным движением (УВД). В работе [1] задача обнаружения решается с помощью построения объема неопределенности движения для каждого управляемого самолета и фиксации моментов пересечения таких объемов. В [2] предлагается алгоритм прогнозирования конфликтов, учитывающий элементы структуры зоны управления.

В настоящей работе сделана попытка ввести некоторые новые понятия и построить процедуры, следующие из модельных механизмов деятельности человека, технологии и приемов разведения самолетов, используемых диспетчерами УВД. Предлагаемый ниже алгоритм обнаружения конфликтных ситуаций можно рассматривать как одно из возможных направлений практического использования диспозиционных моделей принятия решений человеком [3] и, в конкретном случае, модели принятия решений диспетчерами УВД в аэродромной зоне [4].

1. Постановка задачи

Рассмотрим структуру зоны управления и планов проводки самолетов, определим условие конфликта и приведем классификацию ситуаций управления.

Структура зоны управления. Зона управления — это контролируемая диспетчером область воздушного пространства, ограниченная своими размерами. В аэродромной зоне, в соответствии с принятой в СССР технологией управления полетами, выделяются две зоны активного руководства — зона круга и зона подхода. Пилотирование производится с учетом схемы зоны и с соблюдением норм высотного продольного и бокового разделения. Схема зоны включает перечисление разрешенных высотных

эшелонов, указание коридоров в зоне подхода и схем захода на посадку и вылета в зоне круга, определение запрещенных для полетов объемов воздушного пространства.

План проводки самолета формируется в момент входа самолета в зону, может изменяться и корректироваться на каждом шаге принятия решений:

$$W_i = \langle M_i^s, tdi, H_i^{\text{вмх}}, L_i(t), E_i(t) \rangle, \quad (1)$$

где M_i^s — маршрут полета i -го самолета; tdi — тенденция полета; $H_i^{\text{вмх}}$ — планируемая или заданная высота при выходе самолета из зоны; $L_i(t) = \{l_1, \dots, l_{\epsilon_i}\}$ — список команд, предписанных самолету в данный момент; $E_i(t) = \{\epsilon_1, \dots, \epsilon_{\theta_i}\}$ — список условий выполнения команд.

Под тенденцией полета понимают общую характеристику и целевую установку движения самолета по высоте в зоне управления.

Поясним понятие маршрута полета. Пусть на структуре зоны с учетом организации в ней воздушного движения определены некоторые вторичные понятия ϑ_i , такие, как «ориентирующие точки», «номер коридора», «зоны ожидания», «точки разворота» и т. д. Для каждого ϑ_i указаны области значений $\Gamma_{\vartheta_i} = \{\vartheta_1^i, \vartheta_2^i, \dots, \vartheta_k^i\}$. На вторичных понятиях могут быть определены понятия следующего уровня абстрагирования ω_i : «точка входа в зону», «точка выхода», «направление полета» и заданы предикаты $\Phi_i(\omega_i = \vartheta^i)$, которые интерпретируются в зависимости от существа используемых понятий: « ω_i есть ϑ^i », « ω_i представляет собой ϑ^i » и т. д. Подстановка конкретных значений ϑ^i дает высказывания вида $\Phi_i(\omega_i = \vartheta_k^i)$, которые по существу являются сложными знаками для описания полетов самолетов. Маршрутом полета называется последовательность высказываний $\Phi_i(\omega_i = \vartheta_k^i)$:

$$M^s = \langle \Phi_1(\omega_1 = \vartheta_1^i), \dots, \Phi_g(\omega_g = \vartheta_p^n) \rangle. \quad (2)$$

Маршрут является свойством структуры зоны и организации движения в ней. Он задает общие ориентиры проводки самолета.

Условие конфликта самолетов. Конфликт между двумя самолетами, находящимися под управлением, определяется их взаимным расположением в плане и по высоте. Если выполняется условие

$$d_{ij}(t) \leq \Delta d \wedge h_{ij}(t) \leq \Delta h, \quad (3)$$

то пара самолетов $\langle i, j \rangle$ находится в конфликтной ситуации. В этом выражении $d_{ij}(t)$, $h_{ij}(t)$ — расстояния между самолетами в плане и по высоте; Δd , Δh — допустимые интервалы сближения по взаимному положению в плане и по высоте.

Классификация ситуаций УВД. Предлагается классифицировать ситуации, возникающие в аэродромной зоне, по контролю и оперативному управлению. При классификации по контролю будем различать ситуации, согласованные с планом

проводки и не согласованные с ним. Ситуация, не согласованная с планом проводки, т. е. для которой не выполняется или выполняется с нарушением предписанный самолету маневр, относится к классу конфликтных ситуаций и требует немедленного вмешательства со стороны диспетчера.

Среди согласованных по контролю ситуаций будем различать бесконфликтные (БС), потенциально конфликтные (ПКС), конфликтные ситуации (КС) и ситуации сближения (СС). Два самолета образуют ситуацию сближения, если выполняется условие (3) при минимальных значениях Δd^c и Δh^c . Конфликтная ситуация также обусловлена выполнением (3), но при больших значениях Δd^k , Δh^k и при дополнительном условии, что ситуация может перейти в класс СС, если не принять немедленных мер по разведению самолетов. Ситуация с потенциальным конфликтом определяется возможностью перехода ее в класс КС при неуправляемом развитии ситуации. Бесконфликтная ситуация — это случай полной независимости планов проводки для текущих и будущих моментов времени, которая при согласованном управлении не может перейти в классы ПКС, КС и СС.

2. Прогнозирование конфликтов

Для прогнозирования конфликтов предлагается использовать три процедуры, основанные на маршрутном, зонно-временном и высотном принципах анализа ситуаций диспетчерами УВД [3, 4].

Маршрутный принцип основан на том, что для структуры зоны можно указать классы пар маршрутов, принадлежность к которым маршрутов рассматриваемых самолетов указывает на возможность потенциального конфликта между ними и его характер. Если для самолетов $\langle i, j \rangle$ их маршруты M_i^S и M_j^P не принадлежат ни одному из заданных для зоны классов $\mu_r \in M$, то их полет относится к полету в бесконфликтной ситуации. Если же $\{M_i^S, M_j^P\} \in \mu_r$, то между самолетами возможна ПКС, и ее тип определяется именем μ_r . Для двух маршрутов одного класса можно указать пространственную зону конфликта, т. е. область, в которой могут конфликтовать только два самолета с траекториями на основе назначенных маршрутов.

Зонно-временной принцип основан на анализе местонахождения экстраполируемой по маршрутам точки сближения самолетов в плане: если точка сближения находится вне зоны конфликта, то ситуация относится к классу БС. Если же точка сближения находится в зоне конфликта, то между самолетами возможен потенциальный конфликт. То же самое удобнее выразить на временной оси: для самолетов $\langle i, j \rangle$ с маршрутами $M_i^S M_j^P \in M$, потенциального конфликта нет, если выполняется одно из следующих условий

$$1) \Delta t_{ij}^D < 0;$$

$$2) \Delta t_{ij}^D = 0 \wedge |\Delta t_i^{\text{BX}} - \Delta t_j^{\text{BX}}| > t^0; \quad (4)$$

$$3) \Delta t_{ij}^D > 0 \wedge \Delta t_{ij}^D \geq \min [\Delta t_i^{\text{ВЫХ}}, \Delta t_j^{\text{ВЫХ}}],$$

где Δt_{ij}^D — время полета самолетов до точки их встречи по траектории в плане; Δt_i^{BX} — время полета самолета до входа в зону конфликта; $\Delta t_i^{\text{ВЫХ}}$ — время полета самолета до выхода из зоны конфликта; t^0 — временной интервал разделения.

Высотный принцип учитывает возможность сближения самолетов по высоте в зоне конфликта в зависимости от текущих высотных координат самолетов, их тенденции и максимальных скоростей набора высоты и снижения. Ситуация для двух самолетов (i, j) с точкой встречи в зоне конфликта должна быть отнесена к потенциально-конфликтной или выполняется следующее условие:

$$t_{ij}^H \leq t_{ij}^D + t^0. \quad (5)$$

Здесь t_{ij}^H — время до пересечения высотных траекторий i -го и j -го самолетов при наиболее неблагоприятных для сближения по высоте условиях маневрирования; $t_{ij}^D = t + \Delta t_{ij}^D$.

Таким образом, пара самолетов $\langle i, j \rangle$ с помощью последовательного применения маршрутного, зонно-временного и высотного принципов отнесена к бесконфликтным или потенциально-конфликтным.

Формат конфликта. Информация о ПКС между двумя самолетами записывается в следующей форме:

$$S_{i \in \langle i, j \rangle} = \langle i, j, t_{ij}^D, t_{ij}^H, t_i^{\text{ВЫХ}}, t_j^{\text{ВЫХ}}, G_{ij} \rangle, \quad (6)$$

где $t_i^{\text{ВЫХ}} = t + \Delta t_i^{\text{ВЫХ}}$, $t_j^{\text{ВЫХ}} = t + \Delta t_j^{\text{ВЫХ}}$, G_{ij} — множество вспомогательных признаков и значений параметров, которые могут использоваться в приближенных и точных вычислениях.

Массив записей вида S_i образует множество потенциально-конфликтных ситуаций $S^{\text{ПК}}$. При разрешении потенциального конфликта соответствующая запись $S_i \in S^{\text{ПК}}$ стирается, а при переходе ситуации в класс КС строка переписывается в массив записей $S^{\text{К}}$. При разрешении КС запись $S_i \in S^{\text{К}}$ стирается, а при переходе ситуации в класс СС строка переписывается в массив записей $S^{\text{С}}$.

3. Алгоритм обнаружения конфликтных ситуаций

Алгоритм обнаружения КС включает четыре независимых цикла: прогнозирование ПКС, коррекция записей ПКС, фильтрация ПКС, коррекция записей КС и фильтрация КС.

Прогнозирование ПКС. Запуск цикла во времени определяется тремя моментами: моментом входа очередного i -го самолета под управление, изменением маршрута или тенденции полета самолета. Работа заключается в последовательном выполнении четырех

шагов для всех пар самолетов $\langle i, j \rangle$, составленных из i -го и j -го ($i \in J$), где J — список самолетов, находящихся под управлением.

1-й шаг. Применение маршрутного принципа: определяется принадлежность $\forall (\mu_r \in \mu) (M_i^S M_j^P \in \mu_r)$. Если $M_i^S M_j^P M_i^S M_j^P \in \mu_r$, то выполняется шаг 2, имя μ_r фиксируется. Иначе, управление передается на выход (бесконфликтная ситуация).

2-й шаг. Применение зонно-временного принципа: вычисляются значения $\Delta t_{ij}^D, \Delta t_i^{Bx}, \Delta t_i^{Byx}, \Delta t_j^{Bx}, \Delta t_j^{Byx}$, проверяются условия (4). Если выполняется хотя бы одно из условий (4), управление передается на выход (БС). Иначе выполняется шаг 3, значения $t_{ij}^D, t_i^{Byx}, t_j^{Byx}$ и вспомогательные признаки для их вычисления фиксируются.

3-й шаг. Применение высотного принципа: вычисляется значение t_{ij}^H и проверяется условие (5). Если оно не выполняется, то управление передается на выход (БС). Иначе выполняется шаг 4, значение t_{ij}^H и вспомогательные признаки для его вычисления фиксируются.

4-й шаг. Формирование записи ПКС: в соответствии с форматом (6) формируется запись $S_i = \langle i, j \rangle$, заносится в память и сигнализируется возникновение ПКС. Управление передается на выход.

После передачи управления на выход переходим к анализу следующей пары самолетов.

Коррекция записей ПКС. Запуск цикла во времени осуществляется с периодом дискретизации Δt_1 . Работа заключается в последовательном выполнении двух шагов для всех записей $S_i \in S_{\text{вых}}^{\text{ПКС}}$.

1-й шаг. Уточнение значений $t_{ij}^D, t_{ij}^H, t_i^{Byx}, t_j^{Byx}$ для текущего момента времени по приближенным или точным формулам.

2-й шаг. Проверка условия (5). Если оно выполняется, то соответствующая запись стирается. Иначе переходим к рассмотрению следующей записи на шаге 1.

Фильтрация ПКС. Запуск цикла во времени осуществляется с периодом дискретизации Δt_2 . Работа заключается в последовательном выполнении для всех записей $S_i \in S^{nk}$ следующих трех шагов.

1-й шаг. Проверка условия $t_{ij}^D - \Delta t^k \leq t \leq t_{ij}^D + \Delta t^k$, где Δt^k — критический временной интервал между самолетами в КС. Если условие выполняется — шаг 2, иначе — шаг 3.

2-й шаг. Проверка условия $|h_i(t) - h_j(t)| < \Delta h^k$, где Δh^k — критическое расстояние по высоте в КС. Если условие выполняется, запись $S_i \in S^{nk}$ переписывается в s^k и сигнализируется возникновение КС; управление передается на выход. Иначе выполняется шаг 3.

3-й шаг. Последовательная проверка следующих условий:

$$1) t \geq t_{ij}^D + t_i^c; \quad 2) t \geq t_i^{Byx}; \quad 3) t \geq t_{ij}^{Byx}. \quad (7)$$

При выполнении одного из условий (7) запись $S_i \in S^{nk}$ стирается и управление передается на выход. Иначе — управление на выход.

Коррекция записей КС. Рассматриваются записи $S_i \in S^k$. Логика работы аналогична коррекции записей ПКС, но проводится с периодом дискретизации $\Delta t_3 < \Delta t_1$ и используются формулы, обеспечивающие высокую точность расчетов.

Фильтрация КС. Запуск цикла осуществляется с периодом дискретизации $\Delta t_4 < \Delta t_2$. Работа заключается в последовательном выполнении для всех записей $S_i \in S^k$ тех же трех шагов, что и при фильтрации ПКС. При этом значения Δt^k и Δh^c заменяются на новые Δt^c и Δh^c , соответствующие критическим значениям временного и высотного интервалов при сближении. На втором шаге перезапись при выполнении поставленного условия производится из S^k в S^c и сигнализируется возникновение СС.

Выбор периодов дискретизации $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4$ и значений $\Delta t^k, \Delta h^k, \Delta t^c, \Delta h^c$ в циклах фильтрации производится из содержательных соображений с учетом интервалов продольного и высотного эшелонирования.

4. Сравнение методов обнаружения конфликтных ситуаций

Сравнение будем проводить для трех методов: метода фильтрации [1], метода неявной фильтрации [1] и предлагаемого в настоящей работе путем оценки затрат условного машинного времени на выявление КС. Естественно допустить, что просчет алгоритмов производится с одинаковыми периодами дискретизации Δt_1 — период для пересчета зон неопределенности в первых двух методах и коррекции записей ПКС; Δt_2 — период для сравнения зон неопределенностей, пространственных квадратов и фильтрации ПКС.

Тогда при методе фильтрации затраты машинного времени для работы алгоритма в единичный интервал реального времени следующие:

$$T_1 = n \frac{1}{\Delta t_1} \tau_{\text{зн}} + \frac{n(n-1)}{2} \frac{1}{\Delta t_2} \tau_{\text{сз}}, \quad (8)$$

где $\tau_{\text{зн}}$ — затраты машинного времени на вычисление зоны неопределенности для одного самолета; $\tau_{\text{сз}}$ — затраты машинного времени для одного попарного сравнения зон неопределенностей и сигнализации КС; n — число самолетов, одновременно находящихся в зоне управления.

Для метода неявной геометрической фильтрации те же затраты имеют вид

$$T_2 = n \frac{1}{\Delta t_1} \tau_{\text{зн}} + n \frac{1}{\Delta t_2} \tau_{\text{зк}} + r \frac{1}{\Delta t_2} \tau_{\text{ок}}. \quad (9)$$

Здесь $\tau_{\text{зк}}$ — затраты машинного времени для записи в пространственные квадраты кодов самолетов, зоны неопределенностей

которых его накрывают; $\tau_{ок}$ — затраты машинного времени на обработку одного пространственного квадрата и сигнализацию конфликтной ситуации; r — количество пространственных квадратов в зоне управления.

Для метода, предлагаемого в настоящей работе, затраты машинного времени такие:

$$T_3 = \Lambda \tau_{прог} + \Pi \frac{1}{\Delta t_1} \tau_{кор} + \Pi \frac{1}{\Delta t_2} \tau_{ф}, \quad (10)$$

$\tau_{прог}$ — затраты машинного времени для одного самолета при входе на прогнозирование ПКС; $\tau_{кор}$ — затраты машинного времени для коррекции одной записи ПКС; $\tau_{ф}$ — затраты машинного времени для фильтрации одной записи ПКС; Λ — интенсивность входного потока самолетов в зону управления; Π — количество записей ПКС.

Ввиду того что n , Λ , Π связаны, количество пространственных квадратов выражается через размеры зоны и допустимые пространственные расстояния между самолетами в КС, а величины $\tau_{зн}$, $\tau_{сз}$, $\tau_{зк}$, $\tau_{ок}$, $\tau_{прог}$, $\tau_{кор}$, $\tau_{ф}$ можно оценить по числу необходимых машинных операций; формулы (8) — (10) сравнимы между собой. При определенных допущениях о структуре входных потоков самолетов, соответствующих реальным условиям УВД в конкретных зонах, формулы (8) — (10) принимают вид

$$\begin{aligned} T_1 &= k_1 \Lambda \frac{\tau_{зн}}{\Delta t_1} + \frac{k_1^2 \Lambda^2}{2} \frac{\tau_{сз}}{2}; \\ T_2 &= k_1 \Lambda \left[\frac{\tau_{зн}}{\Delta t_1} + \frac{\tau_{зк}}{\Delta t_2} \right] + \frac{k_2}{(\Delta d^k)^2} \frac{\tau_{ок}}{\Delta t_2}; \\ T_3 &= \Lambda \tau_{прог} + \Lambda^2 \Pi (\Delta d^k) \left[\frac{\tau_{кор}}{\Delta t_1} + \frac{\tau_{ф}}{\Delta t_2} \right], \end{aligned} \quad (11)$$

где k_1 , k_2 и $\Pi (\Delta d^k)$ определяются в зависимости от структуры зоны управления и характеристик входного потока самолетов. В таблице приведены результаты просчета формул (11) для зон круга и подхода аэропорта «Внуково» при изменении интенсивности входного потока Λ и принятого интервала для сигнализации $кс = \Delta d^k$.

Таблица демонстрирует тот факт, что условное машинное время для работы по предлагаемому алгоритму пропорционально (с коэффициентом, близким к единице) интенсивности входного потока. На самом деле, второй член суммы в T_3 значительно меньше первого с интенсивностями ($\Lambda \leq 40 \div 50$) при условии, что выполняются соотношения $\tau_{прог} > \tau_{кор} > \tau_{ф}$, реальные для организации счета программы на ЦВМ, и выбран период дискретизации процесса $10 \div 50$ просчетов в единицу времени.

Напомним, что машинное время для алгоритмов фильтрации по дальности [1] в одном случае пропорционально Λ , а в дру-

гом — произведению интенсивности на число квадратов (неявная геометрическая фильтрация) (см. также таблицу). Алгоритм же, предлагаемый в работе, обеспечивает эффективность, практически близкую к одному-двум циклам попарных сравнений параметров движения каждого самолета с параметрами движения других самолетов, находящихся в зоне управления.

Сравнение методов обнаружения КС в зонах управления аэропорта «Внуково»

Зона управления	Измеряемые параметры		$T_1 = k_1 \Delta \frac{\tau_{ЭН}}{\Delta t_1} + \frac{k_1^2 \Lambda^2}{2} \frac{\tau_{СА}}{\Delta t_2}$		$T_2 = k_1 \Delta \left[\frac{\tau_{ЭН}}{\Delta t_1} + \frac{\tau_{ЭК}}{\Delta t_2} \right] + \frac{k_2}{(\Delta d k)^2} \frac{\tau_{ОК}}{\Delta t_2}$		$T_3 = \Lambda \tau_{\text{прог}} + \Lambda^2 \times \Pi (\Delta d k) \left[\frac{\tau_{КОР}}{\Delta t_1} + \frac{\tau_{\Phi}}{\Delta t_2} \right]$		
	$\Delta d k$, км	Λ , сам/р	$k_1 \Delta$	$\frac{k_1^2 \Lambda^2}{2}$	$k_1 \Delta$	$\frac{k^2}{(\Delta d k)^2} 10^2$	Λ	$\Lambda^2 \Pi \times (\Delta d k) 10^{-1}$	
Внуково — круг	5	20	24,6	303	24,6	6	20	1,95	
		30	36,9	588	36,9	6	30	4,4	
		40	49,2	1210	49,2	6	40	7,8	
		100	183	7500	123	6	100	22	
	10	20	24,6	303	24,6	1,5	20	3	
		30	36,9	588	36,9	1,5	30	6,8	
		40	49,2	1210	49,2	1,5	40	12	
		100	123	7500	123	1,5	100	75,3	
	Внуково — подход	10	20	21,6	233	21,6	20,6	20	0,5
			30	32,4	526	32,4	20,6	30	1,15
			40	43,2	930	43,2	20,6	40	2,05
			100	108	5000	108	20,6	100	12,8
20		20	21,6	233	21,6	5,15	20	0,84	
		30	32,4	526	32,4	5,15	30	1,9	
		40	43,2	930	43,2	5,15	40	3,3	
		100	108	5000	108	5,15	100	21	
30		20	21,6	233	21,6	2,3	20	1,18	
		30	32,4	526	32,4	2,3	30	2,76	
		40	43,2	930	43,2	2,3	40	4,72	
		100	103	5000	108	2,3	100	30	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уиллис, Кэррьер, Фланган. Дискретное управление движением самолетов. ТИРИ, т. 58, 1970. 180 с.
2. Nilsson M. R. A conflict prediction algorithm for use in procedural domestic airspace. — «Journal of Air Traffic Control», Nov., 1970, p. 18—21.
3. Новиков П. П. Семиотическое моделирование принятия решений человеком в сложных системах управления. — В кн.: Сложные системы управления. Киев, изд-во «Наукова думка», 1975, с. 47—56.
4. Новиков П. П. Моделирование принятия решений диспетчером УВД в ускоренном масштабе времени. Препринт ИК АН УССР, Киев, 1975. 48 с.

Поступила 15 апреля 1976 г.

О ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
СОЦИАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ НА БАЗЕ СЕМИОТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ.
Сообщение 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ФРЕЙМЫ

1. *Постановка задачи.* Семиотический подход к автоматизации управления большими системами уже давно зарекомендовал себя как один из наиболее перспективных для соответствующего класса больших систем (подробнее об этом см. [1—6]).

Опишем модельные представления и ограничения, выделяющие этот класс социальных систем. Для этого необходимо построить специальный язык, обладающий средствами, обеспечивающими возможность прогнозирования поведения этих систем. Допустим, что рассматриваемая социальная система состоит из индивидов, в качестве которых могут выступать как отдельные люди, так и более широкие общности — коллективы, классы, партии, народы. Считаем, что индивиды ставят перед собой различные цели и организуют свою деятельность на обеспечение их достижения. Относительно самой системы предполагается, что ее поведение в целом регулируется и управляется, кроме индивидуальных целей индивидов (в своей совокупности образующих систему), также объективными закономерностями, управляющими ходом развития событий в системе, независимо от воли или желаний индивидов.

Таким образом, в рамках данных модельных представлений социальная система описывается на достаточно абстрактном уровне (где происходит отвлечение также и от ее структуры), как совокупность трех составных частей. Первая — множество индивидов. Вторая — совокупность индивидуальных целей индивидов, которые (цели) постоянно меняются и организованы в иерархическую структуру. Третья — объективные закономерности, характеризующие поведение системы как единство: 1) ее поведения как целого и 2) ее поведения как совокупности поведения индивидов.

Применительно только к социальным системам описанного класса мы и будем строить все дальнейшие рассуждения.

Из данного выше определения рассматриваемого класса социальных систем вытекает следующее. Поведение индивидов системы определяется двумя факторами. Во-первых, объективными, не зависящими от их воли или желания законами, которые ограничивают рамки их деятельности и во многом детерминируют их поведение. Во-вторых, сознательно поставленными ими перед собой целями, направляющими их поведение и организующими их деятельность на достижение этих целей. Эти два фактора управляют ходом развития событий в системе.

Задача прогнозирования поведения данной системы включает в себя две компоненты: 1) прогнозирование хода развития событий, определяемого объективными закономерностями; 2) прогнозирование хода развития событий в системе, определяемого индивидуальным целеполаганием индивидов системы.

Объективные закономерности, управляющие поведением социальной системы, могут быть двух видов. Первый вид — закономерности социального поведения индивидов. Через посредство реальных отношений, связывающих индивидов с окружающей их социальной средой, они влияют на индивидуальное целеполагание, заставляя индивидов ставить перед собой такие конкретные цели, которые в своей совокупности через столкновения, взаимокорректировку и взаимостимулирование обеспечивают развитие событий, подчиненное управлению со стороны этих объективных закономерностей первого типа. Несмотря на то что в планах индивидуального поведения индивидов эти объективные закономерности непосредственно не отражены, все же индивиды подчиняются им. Таким образом, объективные закономерности первого вида характеризуются тем, что индивидуальное поведение детерминирует *сверху*, поскольку через посредство материальных (т. е. не зависящих от индивидуального сознания) отношений, связывающих индивида с социальной средой, индивидуальное планирование и целеполагание ограничивают определенными рамками.

Объективные закономерности второго вида характеризуют, во-первых, разнообразие причинно-следственные связи между явлениями объективного (физического) мира, во-вторых — каузативные отношения между действиями индивидуума и изменениями, вызываемыми этими действиями в физическом мире. Действия индивида, направленные на других индивидов, преломляются через их сознание, и лишь опосредствовано и не необходимо каузируют изменения в их состоянии. Эти объективные закономерности влияют на индивидуальное планирование и целеполагание *снизу*, поскольку представляют индивиду своего рода исходные данные, которые необходимо учитывать при планировании. В то же время рассмотренные объективные закономерности первого вида влияют на индивидуальное поведение *сверху*, предписывая ограничивать его определенными рамками.

Объективные закономерности обоих видов накладывают ограничения на характер целей, которые могут быть поставлены перед индивидами, и на пути и средства их достижения. Тем самым они имплицитно присутствуют в формируемых индивидами планах их индивидуального поведения, направленных на достижение стоящих перед ними целей.

Эта диалектическая связь между объективными закономерностями и индивидуальным целеполаганием является существенной и наиболее важной характеристикой выделенного нами класса социальных систем.

Таким образом, постановка задачи состоит в следующем. Прогнозирование поведения социальной системы (описанной на этом уровне абстрактности как диалектическое единство объективных закономерностей и индивидуального целеполагания) представляет собой задачу экстраполяции в будущее поведение индивидов и состоящей из них системы. Поведением управляют индивидуальные цели индивидов системы и объективные закономерности, причем оба вида прогноза (целевой и каузативный) должны формироваться в единстве. Целевой прогноз — это экстраполяция в будущее той компоненты индивидуального поведения индивидов системы (или всей системы в целом), которая управляется стоящими перед индивидами целями. Каузативный прогноз представляет собой экстраполяцию в будущее той компоненты индивидуального поведения индивидов (и всей системы в целом), которая управляется объективными (как правило, причинно-следственными) закономерностями. Как указывалось выше, выделение двух компонент прогноза, соответствующих двум компонентам поведения, в значительной степени условно, поскольку далеко не всегда их можно выделить ясно, а рассматривать следует в единстве.

Сформулировав проблему, рассмотрим пути ее решения.

2. Фреймы, как необходимый для прогнозирования уровень представления смысла текстов, описывающих поведение социальных систем.

Прогнозирование поведения социальных систем, рассматриваемое в настоящей работе, представляет собой систему обработки информации, выраженной в виде текстов на естественном языке. Эти тексты описывают ход развития событий в некоторой изучаемой социальной системе (описанного выше класса) в течение определенного промежутка времени вплоть до настоящего момента. Перед системой прогнозирования стоит задача выдать прогнозы дальнейшего развития событий. Для ее решения необходимо явное выражение средствами внутреннего языка системы прогнозирования иерархии целей, преследуемых индивидами на данном временном интервале, а также объективных (каузативных) закономерностей, управляющих поведением моделируемой социальной системы. Однако, как правило, в текстах, описывающих текущее поведение социальной системы, эта необходимая для прогнозирования информация отсутствует. Тексты описывают только развитие событий в социальной системе, зачастую ничего не говоря о том, какими факторами (целями и законами) оно управляется.

Если же обратиться к тому, как понимает эти тексты человек, то станет ясно, что он привлекает свои знания о той предметной области, о которой идет речь. Человек всегда понимает текст не буквально, а вскрывает тот его глубинный смысл, который непосредственно этим текстом не передается даже имплицитно и который не может быть получен в результате осуществ-

ления какого-либо логического вывода из текста. Моделирование этой человеческой способности представляет собой важнейшую задачу, решение которой необходимо для построения системы прогнозирования как автоматизированной системы обработки текстов на естественном языке.

Для решения указанной проблемы предлагается привлечь хорошо разработанный М. Минским и другими авторами аппарат теории фреймов [7, с. 104—116].

Фрейм представляет собой описание семантическим языком знаний об изучаемой предметной области, которые являются внешними по отношению к поступающей в систему входной информации об этой предметной области и которые не могут быть извлечены из этой входной информации. В результате наложения фреймов на входные тексты (после проверки условий входа в фрейм) смысл текста обогащается дополнительными уровнями представления его содержания, осуществляется синтез информации, передаваемой текстом, и знаний, необходимых для адекватного понимания этой информации, которые никак из этой информации не могут быть получены.

Структура фрейма может быть разработана на уровне обобщенности описания передаваемого им содержания в соответствии с иерархией целей индивидов. Иерархия целей индивидов разбивает описание смысла фрейма на уровни обобщенности, на каждом из которых содержание фрагмента деятельности индивида выражается в терминах разной степени абстрактности, а следовательно, с разной степенью глубины. Такой фрейм, представляющий собой по существу иерархию текущих целей индивида, накладывает на текст, описывающий фрагмент его деятельности. Тем самым передают такое содержание этой деятельности (ее направленность на обеспечение достижения некоторых целей), которое в тексте, фиксирующем чисто внешнюю ее сторону фрагмента, не содержится даже имплицитно. Здесь под степенью глубины содержания некоторого действия индивида понимают уровень целей, на обеспечение достижения которых это действие направлено. Именно этот факт — вовлеченность данного фрагмента деятельности индивида в обеспечение достижения целей данного n -го уровня — и выражает содержание действия с данной n -й степенью глубины, а значит, практически и в терминах данного n -го уровня обобщенности.

Структура фрейма передает глобальный контекст, в котором развиваются события, описываемые входным текстом, и который в этом тексте никак не выраженный. Этот глобальный контекст включает в себя не присутствующую в семантическом представлении входного текста информацию о двух факторах. Первая — объективно необходимые (в частности, каузативные) связи между событиями, описываемыми во входном тексте. Эти (каузативные) связи зачастую в семантическом представлении (Sem1) входного текста непосредственно не даны, а могут быть

установлены между событиями только в результате привлечения невыраженных в тексте знаний о порядке и необходимости (объективных закономерностях) существующих в той предметной области (социальной системе), о которой идет речь.

Каузативные связи имеют разную степень существенности и всеобщности, поэтому передаются во фрейме в виде причинно-следственных отношений между описаниями содержания событий различной степени абстрактности (глубины). Тем самым каузативные связи в структуре фрейма присутствуют на разных уровнях обобщенности описания, отвечающих различным уровням представления структуры целей персонажей.

Второй фактор, являющийся составной частью глобального контекста, который непосредственно не может быть обнаженным в СемП входного текста и потому передается в структуре фрейма,— это иерархия целей, на достижение которых направлена текущая деятельность индивидов, описываемая в виде событий во входном тексте. Все эти цели индивидов задаются во фрейме на разных уровнях, так что достижение целей n -го уровня служит средством или условием реализации соответствующих целей следующего $(n+1)$ -го уровня.

Иерархия целей индивидов образует основную часть структуры любого фрейма и представляет собой развертку глобальных целей этих индивидов, задаваемых априорно и служащих формой выражения объективной необходимости, закономерно направляющей поведение индивидов в требуемое объективными законами русло. Она также в значительной степени задается при построении подсистемы понимания системы прогнозирования (в результате содержательного научного анализа конкретной моделируемой социальной системы).

Каузативные связи на различных уровнях структуры фрейма связывают между собой две микроситуации — antecedent и consequent. Микроситуация-antecedent, как правило, представляет собой описание фактически совершившихся событий. Более точно — это факт реализации определенными индивидами определенных целей или факт нахождения определенных индивидов в определенном состоянии (например, в результате реализации ими определенных целей). Микроситуация-consequent представляет собой задачи, вставшие перед индивидами вследствие осуществления событий, о которых идет речь в микроситуации-antecedente. Каждая задача представляет собой иерархию подцелей, которые индивидам предстоит достичь.

Таким образом, наиболее интересные каузативные ситуации, встречающиеся в структуре фреймов, представляют собой конкретизацию и развертку объективных закономерностей для данного уровня обобщенности описания. В этих каузативных ситуациях микроситуация-antecedent каузирует постановку перед индивидами задач в виде иерархии подцелей, которые им предстоит достичь, чтобы эти задачи решить. Здесь, естественно, до-

пустима для индивидов определенная свобода выбора при конкретизации задач — развертке целей на подцели, что в модели передается возможностью автоматического формирования разворотов целей с учетом текущих условий.

Выполнение этих задач, реализация индивидами целей, образующих их (задач) иерархическую структуру, приводит к возникновению новой микроситуации, которая, в свою очередь, выступая в качестве antecedента, каузирует постановку перед индивидами новых задач в виде иерархии подцелей. Необходимость выполнить (решить) эти новые задачи индивидами системы закономерно вытекает из создавшейся в результате решения предыдущих задач микроситуации с учетом объективных (в частности, каузативных) закономерностей.

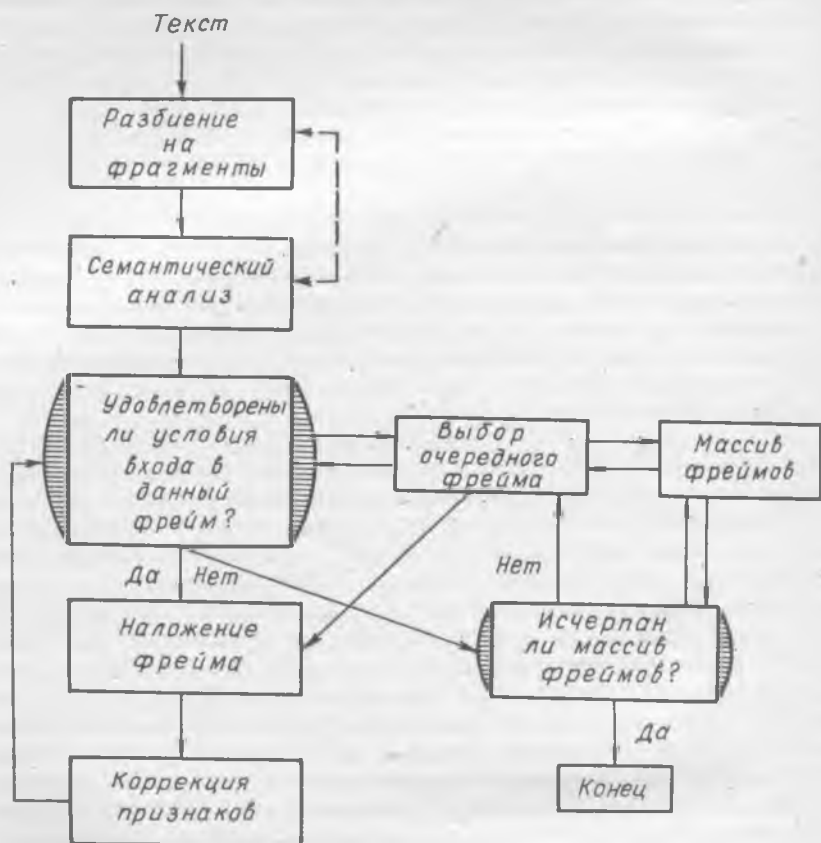
Так и происходит закономерное развитие событий в изучаемой социальной системе в рамках наших исходных модельных допущений.

Каждая такая каузативная ситуация, представляющая собой микроситуацию-antecedent, которая каузирует постановку перед индивидами новых задач (в виде иерархии целей), связывает между собой два фрейма, наложенных на два соседних фрагмента деятельности индивидов. Эта каузативная связь не может быть непосредственно усмотрена из чисто внешнего описания хода развития событий в социальной системе, даваемого входным текстом.

Все это представляет собой следующий этап приближения к описанию на специальном семантическом языке отмеченных в первом разделе основных исходных модельных допущений о характере изучаемых социальных систем. Более точно — о том, что их поведение управляется единством объективных законов и индивидуальных целей индивидов системы. Такие допущения позволяют поставить задачу прогнозирования поведения этих систем как задачу развертки не до конца достигнутых целей (целевой прогноз), а также задачу детализации и разворота объективных (каузативных) закономерностей (каузативный прогноз). Необходимая для построения этих прогнозов информация, как указывалось, содержится, главным образом, во фреймах и не может быть получена в результате какого-либо анализа входных текстов.

На еще более формальном уровне описания фрейм представляет собой (если отвлечься от передаваемого им содержания) семантическую сеть, состоящую из понятий и связывающих их предикатов — отношений. Моделирование процесса понимания входного текста через посредство наложения фреймов на текст воспроизводит ту часть прогнозирующей деятельности человека, которая состоит в привлечении имеющихся у него знаний об объективных законах поведения системы и о возможных целях индивидов системы — для вскрытия глубинного смысла входного текста, на основе которого (глубинного смысла) только и возможно прогнозирование.

На рисунке приведена общая схема подсистемы понимания входного текста системы прогнозирования. Под пониманием текста мы имеем в виду интерпретацию его смысла с точки зрения внешних по отношению к этому смыслу знаний, выраженных в виде массива фреймов. Интерпретация смысла текста посредством выбора соответствующего фрейма и наложения его на этот текст есть обогащение смысла новым содержанием, раскрывающим подлинный смысл событий, описываемых в тексте, что и означает адекватное понимание смысла, передаваемого текстом.



Подсистема понимания работает следующим образом.

1. Входный текст разбивают на такие фрагменты, в пределах каждого из которых не происходит смены целей индивидов. Иными словами, события, описываемые в каждом фрагменте текста, представляют собой такой фрагмент деятельности индивидов, в пределах которого эта деятельность направлена на достижение вполне определенных целей. Иерархия этих целей

выражена в одном из фреймов и становится известной только после наложения этого фрейма на текст. В пределах следующего фрагмента текста цели индивидов уже другие, а переход хода развития событий от одного фрагмента к другому закономерно обусловлен. Происходящая при этом смена целей индивидов фиксируется в соответствующем фрейме в виде каузативной ситуации, которая описывает детерминацию микроситуацией (возникшей в результате реализации событий, описываемых в первом фрагменте), — задач, возникающих в свете этого перед индивидами, что описывается в событиях непосредственно следующего фрагмента.

2. После разбиения текста на фрагменты, осуществляемого в первоначальных версиях подсистемы понимания вручную человеком, происходит семантический анализ этих фрагментов входного текста. В ходе семантического анализа строится представление смысла текста в семантическом языке, в качестве которого выступает язык понятий и отношений ситуационного управления.

На выход блока «семантический анализ» поступает семантическое представление (СемП) фрагмента входного текста на языке понятий и отношений.

3. Далее просматривают массив фреймов и выбирают такой фрейм, для которого на семантических признаках (СемП) входного фрагмента текста удовлетворены условия входа во фрейм. Если для очередного фрейма из массива условия входа в этот фрейм не удовлетворены на данном СемП, то проверяют, исчерпан ли массив фреймов, и в случае неудачи (не исчерпан) выбирают следующий фрейм, для которого снова проверяют выполнение условий входа в него на СемП данного фрагмента.

4. На вход блока «наложение фрейма» поступает СемП фрагмента текста и соответствующий ему фрейм (тот, для которого условия входа в него удовлетворены на данном СемП). Этот блок реализует наложение фрейма на фрагмент текста (на его семантическое представление). Наложение означает отождествление СемП фрагмента текста и структуры нижнего уровня фрейма. При этом нетерминальные вершины фрейма (принадлежащие структуре его нижнего уровня) отождествляются с соответствующими вершинами СемП фрагмента (или пары фрагментов) текста. После такого наложения фрейма на текст становится возможным привлекать для целей прогнозирования информацию, содержащуюся во фрейме (его терминальные вершины), в тех случаях, когда речь идет о событиях, описываемых в тексте, на который этот фрейм наложен. Тем самым мы как бы утверждаем, что речь идет не только о том, что непосредственно дано в тексте, но и о том, что передано фреймом, так как смысл, выраженный текстом, обогатился (в результате наложения фрейма) новой информацией, дополнительными глубинными уровнями представления выражаемого текстом содержания.

5. Далее происходит коррекция внешних семантических признаков фрейма, наложенного на данный фрагмент текста, после чего на этих признаках проверяется выполнение условий входа в новый фрейм (фрейм следующего, более высокого ранга), который (если эти условия входа выполнены) накладывается на фрейм более низкого ранга.

Внешними семантическими признаками фрейма являются такие его характеристики, которые соотносят его с фреймами других рангов. На один фрейм данного ранга в принципе можно наложить несколько фреймов более высокого ранга, в зависимости от того, каким условиям удовлетворяют внешние семантические признаки фрейма данного ранга. Только после наложения фрейма данного ранга на фрейм более низкого ранга (или на СемП одного фрагмента текста) становится возможным однозначный выбор фрейма следующего ранга, поскольку внешние семантические признаки фрейма данного ранга после осуществления наложения этого фрейма корректируются и принимают определенные значения.

Условия входа во фрейм представляют собой в общем случае предикат на множестве семантических признаков.

Необходимость коррекции внешних семантических признаков фрейма возникает в силу того, что после наложения фрейма на текст (его СемП) содержание, передаваемое фреймом, допускает вполне однозначную конкретизацию в результате спуска на более низкие уровни обобщенности (в конечном счете — спуска из фрейма на исходный текст). Тем самым многие потенциально возможные внешние семантические связи фрейма становятся противоречащими этому содержанию самого нижнего уровня обобщенности (выражаемому СемП текста). Поэтому данные внешние семантические связи не могут быть актуализированы, что обеспечивает однозначный выбор фрейма следующего ранга, который может быть наложенным на фрейм данного ранга. На выход подсистемы понимания поступает текст с наложенными на него фреймами. На фрагменты текста наложены иерархии целей, управляющие деятельностью индивидов в пределах фрагмента. На соседние пары фрагментов наложены каузативные ситуации (антецедент каузирует постановку задач перед индивидами), выражающие закономерную смену этих целей. Далее этот обогащенный дополнительным содержанием текст поступает в другие подсистемы системы прогнозирования, которые реализуют построение целевого и каузативного прогнозов хода развития событий (описываемых во входном тексте) на основе информации, передаваемой во фреймах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клыков Ю. И. Ситуационное управление большими системами. М., «Энергия», 1974. 135 с.
2. Клыков Ю. И. Семантические основы ситуационного управления. М., МИФИ, 1974. 171 с.

3. Поспелов Д. А. Большие системы (ситуационное управление). М., «Знание», 1975. 64 с.
4. Поспелов Д. А., Пушкин В. Н. Мышление и автоматы. М., «Сов. радио», 1972. 224 с.
5. Вопросы кибернетики. Вып. 13. М., 1974. 247 с.
6. Вопросы кибернетики. Вып. 14, М., 1975. 196 с.
7. Minsky Marvin. Minsky's system theory.— «Theoretical Issues on Natural Language Processing», Cambridge, Massachusetts, 1975, p. 104—116.

Поступила 9 декабря 1976 г.

УДК 535.37.541

Н. Н. РОЖИЦКИЙ, А. И. БЫХ, канд. техн. наук

ЭЛЕКТРОХЕМИИЗЛУЧЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ И ЕГО РОЛЬ В БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ. Сообщение 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОХЕМИИЗЛУЧЕНИЯ

В последнее время все большее внимание привлекает изучение явления, заключающегося в возникновении свечения при прохождении электрического тока через растворы-электролиты сложных органических молекул — электрохемилюминесценция [1]. В работе [2] была показана возможность проявления кооперативных эффектов в системах, обладающих электрохемилюминесценцией, применения подобных систем для моделирования некоторых процессов, происходящих в живых организмах, указывалось, что определенную роль в информационных процессах в самоорганизующихся системах может играть когерентное электрохемиизлучение (ЭХИ) и рассматривались его возможные источники в живых организмах. В настоящем сообщении анализируется возможность реализации источников когерентного стимулированного ЭХИ.

В появившихся в последнее время публикациях [3—6] рассмотрены некоторые теоретические вопросы реализации подобных устройств. Основные достоинства оптических квантовых генераторов с электрохимической накачкой (ЭХ ОКГ), как и хорошо известных лазеров на растворах молекул красителей [7], — возможность получения генерации в широком спектральном диапазоне, достигающаяся применением различных веществ — электроактивных соединений (ЭЛАС), плавная перестройка частоты генерации, создание высоких значений коэффициента усиления при относительно малых уровнях накачки ввиду наличия у молекул ЭЛАС уширенных электронных уровней энергии. ЭХ ОКГ будут, по-видимому, и выгодно отличаться от жидкостных лазеров способом возбуждения — непосредственное преобразование энергии электролиза в световую (через промежуточную стадию химической энергии реагентов), в связи с чем возникает возможность получения более экономичных

устройств с гораздо меньшими пороговыми напряжениями и др. Несомненно преимущество ЭХ ОКГ и перед существующими полупроводниковыми лазерами — гораздо больший диапазон излучения и, по-видимому, более высокая когерентность излучения, достигаемая при использовании соответствующих дисперсионных элементов.

Как известно, реакции с переносом заряда, приводящие к образованию возбужденных молекул и возникновению излучения в электрофлорной композиции, могут происходить двумя

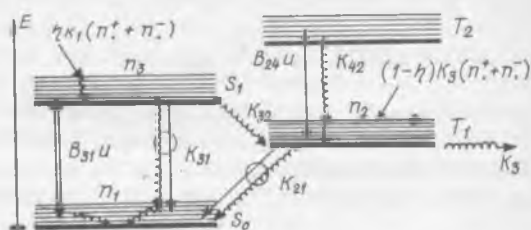
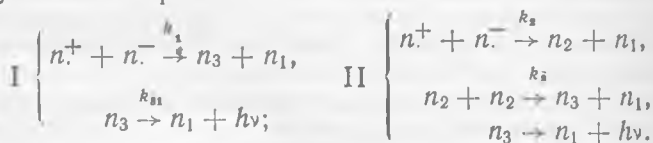


Диаграмма основных энергетических уровней молекул, ответственных за электрохемиизлучение.

путями — с образованием синглет- и триплет-возбужденных молекул активатора:



Здесь n^+ , n^- — числа катион- и анион-радикалов; n_i — числа молекул в различных энергетических состояниях (рисунок); k_1 , k_2 — константы скоростей процесса аннигиляции, сопровождающегося рождением синглет- и триплет-возбужденных молекул; k_3 — константа скорости реакции триплет-триплетной аннигиляции (ТТА); k_{31} характеризует процесс излучения. Образование n_2 в результате реакции (II) является более предпочтительным даже в случае энергодостаточных систем, в силу метастабильности триплетного состояния, а число рождаемых триплет- и синглет-возбужденных молекул определяется в соответствии с мультиплетностью данного состояния:

$$\frac{n_2}{n_3} = \frac{(2S+1)_T}{(2S+1)_S} = \frac{3}{1}. \quad (1)$$

Ввиду этого триплетное состояние молекул должно играть важную роль в процессах ЭХИ и, в частности, в процессах генерации излучения. Поэтому в настоящей работе рассмотрена возможность создания инверсной заселенности в электрохимических реакциях с учетом триплетного канала возбуждения. В мо-

лекулах красителей при возбуждении внешними источниками света заселение триплетного состояния молекул не происходит непосредственно, как в ЭХИ, а в результате процесса интеркомбинационной конверсии (константа скорости k_{32}). Заселение метастабильного состояния молекул приводит к возрастанию вероятности триплет-триплетного поглощения (ТТП) излучения с возбужденного синглетного уровня, что, в свою очередь, ухудшает энергетические и временные характеристики ОКГ на растворах красителей.

Влияние ТТП может быть существенно уменьшено введением в раствор химических реагентов, эффективно обедняющих триплетное состояние молекул (тушители триплетов), либо применением коротких импульсов накачки с крутыми передними фронтами [7], что, однако, существенно ограничивает длительность генерации. Первый из этих путей, очевидно, неприменим в случае ЭХ ОКГ из-за существенного вклада, вносимого триплетными состояниями (процессом ТТА) в световой выход электрофлорных композиций, если только не удастся подобрать эффективные системы, в которых в результате радикальных реакций преимущественно образуются синглет-возбужденные молекулы активатора. Реализация второго пути представляется более вероятной, поэтому соответствующие требования должны быть предъявлены к режиму возбуждения ЭХИ. Необходимо также отметить, что процесс ТТА до определенных уровней плотности энергии генерируемого ЭХ ОКГ излучения может конкурировать с процессом ТТП.

Для определения энергетических параметров ЭХ ОКГ рассмотрим следующую систему уравнений:

$$\frac{dm_3}{dt} = \eta k_1 n^- n^+ - (k_{31} + k_{32}) nm_3 - nIB_{31}(m_3 - e^{-\alpha}m_1) + k_2 m_2^2 n^2, \quad (a)$$

$$\frac{dm_2}{dt} = (1 - \eta) k_3 n^- n^+ + k_{32} n m_3 - k_{21} nm_2 - k_2^2 n^2, \quad (б)$$

$$m_1 + m_2 + m_3 + \beta + \delta = 1, \quad \beta = \frac{n^-}{n}, \quad \delta = \frac{n^+}{n}, \quad (в) \quad (2)$$

$$G(\nu) = \frac{nh\nu}{\nu} B_{31}(m_3 - e^{-\alpha}m_1), \quad (г)$$

$$W(\nu) = Inh\nu B_{31}(m_3 - e^{-\alpha}m_1). \quad (д)$$

Уравнения (а) и (б) описывают населенность соответствующих электронных уровней энергии молекул, (в) указывает на сохранение полного числа частиц в композиции, (г) и (д) — суть выражения для коэффициента усиления и мощности генерации на частоте ν (12); k_{ij} — константы скоростей оптических и неоптических переходов между уровнями энергии молекул; $B_{31} \cdot I$ —

вероятность вынужденных переходов; u — плотность энергии генерации (см. рисунок); $m_i = \frac{n_i}{n}$ — нормированные населенности уровней; v — скорость света в среде.

В рамках данной модели не учитывается диффузионное движение частиц в композиции и ТТП. Концентрации анион- и катион-радикалов приняты малоизменяющимися за время генерации [5]. Поскольку времена основных процессов рождения и дезактивации возбужденных частиц малы, задача решается в стационарном приближении.

Генерация ЭХИ в электрофлорной композиции начнется, когда коэффициент усиления на частоте ν

$$G(\nu) = k_n, \quad (3)$$

где k_n — коэффициент потерь в резонаторе ЭХ ОКГ;

$$k_n = L - \frac{1}{2l} \ln R, \quad R = R_1 R_2.$$

Здесь R_1, R_2 — коэффициенты отражения зеркал резонатора длиной l ; L — неактивные потери, не рассматриваемые в дальнейшем. С учетом (3) можно получить выражение для заселенности m_3 излучательного уровня S_1 и мощности генерации на частоте ν :

$$m_3^* = \frac{\Gamma}{A} - \frac{k_{32} + k_{21}A}{2k_2 n A^2} (\rho - 1), \quad (4)$$

$$W = h\nu \left\{ [\eta k_1 + (1 - \eta) k_3] n^+ n^- - n \left[\frac{(k_{21}A - k_{31})(k_{21}A + k_{32})(\rho - 1)}{2k_2 n A^2} + k_{31} \frac{\Gamma}{A} \right] \right\}, \quad (5)$$

где $\Gamma = 1 - \beta - \delta + \frac{k_n}{G_0} e^\alpha$; $G_0 = \frac{nh\nu}{v} B_{31}(\nu)$ — предельный коэффициент усиления на частоте ν ; $\alpha = \frac{h}{kT}(\nu_0 - \nu)$ — рассматривается случай равновесного распределения частиц по подуровням; ν_0 — частота 0—0 перехода;

$$A = e^\alpha + 1, \quad \rho = \sqrt{1 + \frac{4k_2 A n \Gamma k_{32} + A(1 - \eta) k_3 n^+ n^-}{(k_{21}A + k_{32})^2}};$$

m_3^* — второй корень квадратного уравнения для определения m_3 , выбранной из условия, согласно которому при отсутствии ТТА выражение для W должно совпадать с полученным ранее 5.

Как видно из (5), генерация в системе на частоте ν возможна в следующих случаях:

1. $k_{31} > k_{21}A$, тогда для получения генерируемого излучения необходимо, чтобы

$$[\eta k_1 + (1 - \eta) k_3] n^+ n^- + \frac{(k_{31} - k_{21}A)(k_{21}A + k_{32})(\rho - 1)}{2k_2A^2} > > n k_{31} \frac{\Gamma}{A}. \quad (6)$$

Член в правой части неравенства (6) описывает потери мощности из-за стоксового сдвига между частотами генерации и 0—0 перехода, люминесценции и безызлучательных переходов с синглет-возбужденного состояния на основной уровень, а также в резонаторе ЭХ ОКГ. При условии, что мощность генерации достаточно велика, можно, воспользовавшись положительностью m_3 (4), усилить неравенство (6). В результате получим

$$[\eta k_1 + (1 - \eta) k_3] n^+ n^- > k_{21} \Gamma n$$

или

$$[\eta k_1 + (1 - \eta) k_3] \beta \delta n > k_{21} \Gamma. \quad (7)$$

Неравенство (7) накладывает определенные ограничения (снизу) на произведение концентраций ион-радикалов в композиции (при условии, что константы k_1 , k_3 , k_{21} известны). Кроме того, из (7) видно, что для получения высоких уровней мощностей бимолекулярные константы реакций аннигиляции ион-радикалов, а также время триплетного состояния должны быть, по возможности, большими. При удовлетворении последнего условия, однако, возникает возможность ТТП генерируемого излучения, поэтому величина k_{21} должна быть также ограничена снизу.

2. $k_{31} < k_{21}A$. Это возможно, например, при больших интервалах между частотами 0—0 перехода и максимума генерации. Условие положительности W становится при этом более жестким:

$$[\eta k_1 + (1 - \eta) k_3] n^+ n^- > \left[\frac{(k_{21}A - k_{31})(k_{21}A + k_{32})(\rho - 1)}{2k_2nA^2} + k_{31} \frac{\Gamma}{A} \right] n. \quad (8)$$

Произведем оценки мощности генерации. Предельная мощность

$$W_0 = h\nu [\eta k_{1np} + (1 - \eta) k_{3np}] n_{np}^+ n_{np}^-.$$

Для генерации в зеленой области ($\nu = 20000 \text{ см}^{-1}$; $\eta = 0,25$; $1 - \eta = 0,75$; $k_1 \sim k_3 \sim 10^{10} \text{ л} \cdot \text{Моль}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}$; $n_0^+ n_0^- = 10^{-6} \text{ (моль/л)}^2$)

$$W = 2,4 \cdot 10^6 \text{ вт}.$$

Реально достижимые уровни мощности ниже вследствие различных потерь, описываемых членом $k_{31} \frac{\Gamma}{A}$ в (5).

Пренебрежем вторым членом в (5) ввиду его очевидной малости по сравнению с $k_{31} \frac{\Gamma}{A}$. Тогда

$$W_p \cong n\nu \left[kn^+n^- - k_{31} \frac{\Gamma}{A} n \right], \quad (9)$$

где $k = \eta k_1 + (1 - \eta) k_3$. В случае, близком к реальному,

$$\Gamma = 1 - \beta - \delta + \frac{k_n}{G_0} e^{\alpha} \sim 3; \quad l = 1 \text{ см}; \quad R_1 = 0,5;$$

$$R_2 = 0,999; \quad A = e^{\alpha} + 1 \cong 10; \quad k_{31} \cong 10^8 \text{ сек}^{-1}.$$

При этом достаточно обеспечить высокие скорости рождения возбуждений в результате реакций аннигиляции, чтобы получить большие уровни мощности. Так, при превышении kn^+n^- члена, описывающего потери $k_{31} \frac{\Gamma}{A}$ всего лишь на 0,01%, можно ожидать $W \sim 20 \text{ кВт}$.

Произведем оценку КПД ЭХ ОКГ, который определим как

$$\varphi = \frac{E_p}{E_0}. \quad (10)$$

Здесь $E_p = W_p \tau_r$, $E_0 = P \tau_0$, $P = \bar{P}^+ + \bar{P}^-$, $\bar{P}^+ = \bar{I} + U^+$.

Поскольку при оптимальных условиях возбуждения $\bar{P}^- > \bar{P}^+$, то

$$\varphi = \frac{W_p \tau_r}{\bar{P}^- \tau_0} 100 \%. \quad (11)$$

В случае, близком к реальному, $\bar{P} \sim 1 \text{ вт}$. При длительности импульса генерации $\tau_r = 10^{-6} \text{ сек}$ и $W_p = 2 \cdot 10^4 \text{ вт}$, времени возбуждения $\tau_0 = 0,1 \text{ сек}$, $\varphi = 20\%$.

Таким образом, приведенный в работе анализ позволяет считать возможным получение генерации в ЭХ ОКГ. Авторы считают, что наиболее перспективно осуществление маломощных ЭХ ОКГ, когда скорость процесса ТТП, пропорциональная $B_{24} u_r$, меньше скорости ТТА, что возможно при больших скоростях последнего процесса. Однако не исключено, что поиск оптимального режима возбуждения, а также эффективных электрофлорных композиций приведет к созданию более мощных ЭХ ОКГ.

Одним из наиболее реальных способов возбуждения ЭХ ОКГ, по-видимому, может быть совместное применение методов оптического и электрохимического возбуждений. При этом можно осуществить предпороговое (для генерации) возбуждение раствора ЭЛАС оптической накачкой, например, с помощью моноимпульсов N_2 -лазера, а затем, во время этого импульса, наложить электрохимическое возбуждение и попытаться зарегистрировать генерируемое электрофлорной композицией излучение, либо произвести эти операции в обратной последовательности.

Отметим, что при реализации ЭХ ОКГ необходимо учитывать возможные эффекты ассоциации частиц растворенных веществ [2, 5]. В подобных композициях наблюдается резкое увеличение интенсивности электрохемилюминесценции после достижения определенных концентраций компонент в электрофторной композиции, при которых становится вероятным комплексобразование частиц ЭЛАС и электролита фона в области двойного электрического слоя, где наблюдается отличие ряда параметров композиции от их значений вдали от электродов.

Наблюдающиеся аномалии на концентрационных зависимостях интенсивности излучения [2, 5] могут быть объяснены изменением величин констант скоростей соответствующих процессов и характера этих процессов при появлении в растворе ассоциатов. В частности, происходит, очевидно, увеличение бимолекулярной константы скорости переноса электрона между реагентами за счет включения механизма «эстафетного» переноса электрона, проявление кооперативных эффектов при переносе энергии электронного возбуждения по связанным силам различной природы частицам ассоциата, что может привести к увеличению числа синглет-возбужденных молекул ЭЛАС — продуктов реакции ТТА, и ряд других процессов. Указанные особенности подчеркивают необходимость дифференцированного подхода к проблеме создания ЭХ ОКГ (из-за наличия в системе высоких концентраций ионных состояний веществ и эффектов двойного слоя) по сравнению с теорией генерации в лазерах на молекулах красителей.

Таким образом, показанная в работах [3—6] и настоящем сообщении возможность осуществления режима генерации в электрофторных композициях при их электролизе позволяет считать вероятным создание подобных источников и их использование при моделировании ряда процессов в живых организмах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hercules D. M. Chemiluminescence resulting from electrochemically generated species.—«Science», 1964, v. 145, p. 808—809.
2. Рожницкий Н. Н., Худенский Ю. К., Бых А. И. Электрохемилюминесценция органических веществ и его роль в биологических процессах. *Сообщение 1*. Кооперативные явления в электрохемилюминесценции.— В кн.: Проблемы бионики. Вып. 16. Харьков, 1976, с. 84—91.
3. Худенский Ю. К., Рожницкий Н. Н., Бых А. И. Электрохемилюминесценция органических веществ и его роль в биологических процессах. *Сообщение 2*. Возможность моделирования некоторых процессов в сложных биологических системах с помощью электрохемилюминесценции.— В кн.: Проблемы бионики. Вып. 18. Харьков, 1977.
4. Keszthelyi C. P. Possible laser action in 9, 10 diphenylanthracene—thianthrene ECL system under optimized conditions using mixed heteropolar solvents.—«J. Electrochem. Soc.», 1973, v. 120, p. 392—450.
5. Measures R. M. Prospects for developing a laser based on electrochemiluminescence.—«Appl. Opt.», 1974, v. 13, N 5, p. 1121—1133.
6. Measures R. M. Physical constraints associated with the development of a laser, based on electrochemiluminescence.—«Appl. Opt.», 1975, v. 14, N 4, p. 909—916.
7. О возможности создания стимулированного излучения в электрохемилюминесцентных системах.— В кн.: Сцинтилляторы и органические люминофоры. Вып. 3. Харьков, 1974, с. 134—138. Авт.: А. И. Бых, И. Ф. Огороднейчук, Н. Н. Рожницкий и др.
8. Рожницкий Н. Н., Худенский Ю. К., Бых А. И. Мицеллярные ассоциаты и их роль в электрохемилюминесценции органических соединений.—«Изв. АН СССР», сер. физ. 1975, т. 39, № 11, с. 2340—2345.
9. Томин В. И., Рубинов А. Н. Электрохемилюминесцирующие материалы как основа для создания лазеров нового типа.—«Изв. АН СССР», сер. физ., 1975, т. 39, № 11, с. 2346—2350.
10. Степанов Б. И., Рубинов А. Н. Лазеры на основе органических красителей.—«Усп. физ. наук», 1968, т. 95, с. 45—95.

Поступила 30 июня 1976 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Крюков А. А., Карунин А. Б., Клыкков Ю. И., Волченко М. В. Принципы обучения в системах ситуационного управления.	3
Шабанов-Кушнарченко Ю. П., Сердюченко В. Я., Грабина В. А. Экспериментальное исследование модели индуктивного цветового контраста.	15
Пчелинов В. П. Дедуктивный вывод математической модели спектральной чувствительности органа зрения человека. <i>Сообщение 1</i>	23
Пчелинов В. П. Дедуктивный вывод математической модели спектральной чувствительности органа зрения человека. <i>Сообщение 2</i>	32
Ананин В. Ф. Мозг как биологическая система в реальном масштабе времени.	42
Романов В. П., Киселев В. М. Параметризация описаний сложных изображений как способ регулируемого сжатия информации. <i>Сообщение 1</i>	53
Романов В. П., Киселев В. М. Параметризация описаний сложных изображений как способ регулируемого сжатия информации. <i>Сообщение 2</i>	59
Эм В. С., Пак В. Г. Задача оптимального быстрогодействия, решаемая нервной клеткой.	69
Ананин В. Ф. Биотехнический имитатор зрительного аппарата человека.	79
Малая Л. Т., Воронов В. Г., Мендлин М. С., Кожин М. И., Голп А. Ю., Шульман А. Е. О кодировании биомедицинской информации (на примере электрокардиограммы при инфаркте миокарда). <i>Сообщение 1</i>	87
Чудаков В. Н. Классификация нормальных и аномальных форм интеллектуальной деятельности на основании квантово-волновой теории когерентной модели мозга. <i>Сообщение 3</i>	95
Чудаков В. Н. Классификация нормальных и аномальных форм интеллектуальной деятельности на основании квантово-волновой теории когерентной модели мозга. <i>Сообщение 4</i>	106
Бузницкая Э. М. Об одном языке формального описания алгоритмов морфологической обработки единиц текста.	114
Сергеева Н. К. Оценка погрешности вычисления параметров нормализации вращений плоских изображений.	120
Туманян В. А. Модельное представление функционального взаимодействия двух уровней системы управления.	127
Новиков П. П., Рапуто А. Г. Обнаружение конфликтных ситуаций при управлении воздушным движением в аэродромной зоне.	132
Филоник С. А. О построении системы прогнозирования социального поведения на базе семиотических моделей. <i>Сообщение 1</i> . Постановка задачи. Фреймы.	140
Рожикский Н. Н., Бых А. И. Электрохемиизлучение органических веществ и его роль в биологических процессах. <i>Сообщение 3</i> . Исследование возможности создания когерентного излучения на основе явления электрохемиизлучения.	149