

007.5(06)
П78

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ХАРЬКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ ИМ. М. К. ЯНГЕЛЯ

ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

**Республиканский
межведомственный
научно-технический
сборник**

Основан в 1968 г.

В Ы П У С К 42

**ХАРЬКОВ
ИЗДАТЕЛЬСТВО ПРИ ХАРЬКОВСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
ИЗДАТЕЛЬСКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ
«ВЫЩА ШКОЛА»**

1989

Сборник содержит результаты решения важнейших задач бионики: моделирование психической деятельности человека и его приложение для развития информационных систем, систем искусственного интеллекта. Предложены модели языка и речи, принципы построения диалоговых систем. Рассмотрена работа органов чувств и системы распознавания изображений. Освещены вопросы выбора и развития математических средств психологической бионики.

Для научных работников и специалистов.

Редакционная коллегия: *Ю. П. Шабанов-Кушнаренко* (отв. ред.), *М. Ф. Бондаренко* (зам. отв. ред.), *Г. Г. Четвериков* (отв. секр.), *В. И. Васильев*, *Т. К. Винцюк*, *А. Д. Закревский*, *К. А. Иванов-Муромский*, *Р. Г. Котов*, *Э. М. Куссуль*, *Б. М. Лобанов*, *В. А. Ловицкий*, *Г. А. Миронов*, *Л. Л. Нелюбин*, *А. Ф. Осыка*, *В. И. Перебийнос*, *Е. П. Путятин*, *И. Б. Сироджа*, *В. Я. Сердюченко*, *В. Т. Червов*

Адрес редакционной коллегии: 310141, Харьков, пр. Ленина, 14, институт радиоэлектроники, тел. 40-94-64.

Редакция литературы по естественным наукам и филологии
Зав. редакцией *Е. П. Иващенко*

М. Ф. БОНДАРЕНКО, д-р техн. наук,
С. Ю. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО, И. В. ШУЛЬГИН, канд. техн. наук

ОБ УСЛОВИЯХ СУЩЕСТВОВАНИЯ СУБЪЕКТИВНОЙ МЕТРИКИ

Настоящая статья является развитием ранее опубликованной работы¹. Одним из основных средств психофизических измерений является сравнение «субъективного расстояния» между двумя парами точек. Имеется в виду следующее. Пусть (x_1, y_1) — одна и (x_2, y_2) — другая пара точек евклидова пространства. В эксперименте требуется ответить на вопрос, представляется ли расстояние между точками x_2, y_2 или нет. Обозначим через $\Phi(x_1, y_1, x_2, y_2)$ предикат, принимающий значение 1 в случае положительного ответа и значение 0 — в случае отрицательного. Предположим, что предикат Φ представим в виде

$$\Phi(x_1, y_1, x_2, y_2) = D(\rho(\theta(x_1), \theta(x_2)), \rho(\theta(x_2), \theta(y_2))), \quad (1)$$

где D — предикат равенства, θ — гомеоморфизм евклидова пространства на себя, $\rho(u, v)$ — евклидово расстояние между точками u и v . Это значит, что расстояние x_2, y_1 представляется таким же, как расстояние между точками x_2, y_2 , тогда и только тогда, когда после преобразования координат θ совпадает евклидово расстояние ρ между парами образов точек. Величина

$$r(x, y) = \rho(\theta(x), \theta(y)) = \|\theta(x) - \theta(y)\| \quad (2)$$

играет роль субъективной метрики.

Вопрос о существовании субъективного расстояния тесно связан с вопросом о существовании субъективного равноделения. Предположим, что имеет место формула (1). Для любых точек x, y положим

$$x \circ y = \theta^{-1} \left(\frac{1}{2} (\theta(x) + \theta(y)) \right). \quad (3)$$

Точка $x \circ y$ может быть интерпретирована как субъективно средняя между точками x, y , а экспериментальная процедура нахождения этой точки — как субъективное равноделение.

Нашей целью будет нахождение необходимых и достаточных условий, которым должен удовлетворять предикат Φ для того, чтобы он был представим в виде (1). При этом вначале будут установлены условия, гарантирующие существование субъективного равноделения, а затем эти условия будут дополнены до условий, обеспечивающих существование субъективной метрики.

¹ Майстровская Л. М., Шабанов-Кушнаренок Ю. П. Об условиях существования многомерной психофизической шкалы равноделения // Кибернетика. 1976. № 3. С. 146—147.

Итак, пусть в R^n задана бинарная операция (\circ) . Будем говорить, что (\circ) — операция равноделения, если существует взаимно однозначное и взаимно непрерывное отображение пространства на себя такое, что для всех $x, y \in R^n$

$$f(x \circ y) = \frac{1}{2}(f(x) + f(y)). \quad (4)$$

Лемма 1. Для того чтобы операция (\circ) была операцией равноделения, необходимо и достаточно, чтобы она удовлетворяла условиям 1) $x \circ x = x$; 2) при любых a, b уравнение $a \circ x = b$ однозначно разрешимо; 3) операция (\circ) непрерывна; 4) для всех x, y, u, v $(x \circ y) \circ (u \circ v) = (y \circ v) \circ (x \circ u)$.

Доказательство. Необходимость очевидна. Докажем достаточность. Обозначим при произвольных $a, b \in R^n$ через $h(a, b)$ решение уравнения $a \circ x = b$. Зафиксируем произвольный элемент $e \in R^n$ и рассмотрим отображение $\varphi: R^n \rightarrow R^n$, определенное равенством $\varphi(x) = h(e, x)$. Это отображение сюръективно. Действительно, пусть Y — произвольный элемент R^n . Положим $x = e \circ y$. Тогда $Y = h(e, x)$, т. е. $\varphi(x) = y$. Отображение φ инъективно: если $\varphi(x) = y$, то $x = e \circ y$. Итак, φ — биекция, причем $\varphi^{-1}(y) = e \circ y$ (5).

Положим $x * y = \varphi(x \circ y)$ и покажем, что $(R^n, *)$ — топологическое пространство R^n с бинарной операцией $(*)$ — является непрерывной коммутативной группой.

Отметим, прежде всего, что (\circ) — коммутативная операция. Действительно, из условия (4) вытекает равенство $(x \circ y) \circ (x \circ y) = (y \circ y) \circ (x \circ x)$, откуда на основании 1) получаем $(x \circ y) = (y \circ x)$. Но тогда и $(*)$ — коммутативная операция. Из равенства (5) следует, что для любого $x: e \circ \varphi(x) = x$ (6).

Полагая в 4) $x = u = e$, $y(x) = \varphi(x)$, $v(y) = \varphi(y)$, запишем $(e \circ \varphi(x)) \circ (e \circ \varphi(y)) = (\varphi(x) \circ \varphi(y)) \circ (e \circ e)$. В силу условия (1) коммутативности операции (\circ) и формулы (6) последнее равенство можно переписать в виде $x \circ y = e \circ (\varphi(x) \circ \varphi(y))$. С другой стороны, из (6) следует, что $e \circ \varphi(x \circ y) = x \circ y$. Комбинируя два последних равенства, получаем $e \circ \varphi(x \circ y) = e \circ (\varphi(x) \circ \varphi(y))$. Тогда из условия 2) вытекает, что $\varphi(x \circ y) = \varphi(x) \circ \varphi(y)$.

Далее, имеем $e * x = \varphi(e \circ x)$. Вместе с (5) это дает $e * x = x$. Значит, e — нейтральный элемент. Равенство (6) позволяет переписать условие 4) в виде $\varphi(x \circ y) \circ \varphi(u \circ v) = \varphi(y \circ v) \circ \varphi(x \circ v)$, т. е. $(x * y) \circ (u \circ v) = (y * v) \circ (x * u)$. Тогда $\varphi(x * y) \circ \varphi(u * v) = \varphi((y * v) \circ (x * u))$. Это значит, что $(x * y) * (u * v) = (y * v) * (x * u)$. Полагая в этом соотношении $u = e$, получаем $(x * y) * v = (y * v) * x$. Поскольку операция $(*)$ коммутативна, то из последнего равенства следует, что она ассоциативна.

Согласно равенству (6): $e \circ \varphi(e) = e$ (7).

Однако в силу 1) $e \circ e = e$. Поскольку уравнение однозначно разрешимо, то из двух последних равенств имеем $\varphi(e) = e$ (8).

Рассмотрим уравнение $a * x = e$ (9), т. е. уравнение $\varphi(a \circ x) = e$. Равенство (8) позволяет переписать его в виде $\varphi(a \circ x) = \varphi(e)$. Поскольку φ — биекция, то это уравнение эквивалентно уравнению $a \circ x = e$. Поэтому из условия 2) вытекает, что уравнение (9) однозначно разрешимо, причем $h(a, e)$ — обратный элемент к a относительно операции $(*)$. Итак, $(R^n, *)$ — абелева группа.

Рассмотрим отображение $g: R^n \times R^n \rightarrow R^n \times R^n$, определенное равенством $g(x, y) = (x, x \circ y)$. Отображение g биективно. Действительно, пусть $a, b \in R^n$. Уравнение $g(x, y) = (a, b)$ эквивалентно системе уравнений: $x = a, x \circ y = b$. Эта система имеет единственное решение: $x = a, y = h(a, b)$. Поскольку g — непрерывная биекция, то по теореме Брауэра об инвариантности области g^{-1} — также непрерывное отображение. Поскольку $g^{-1}(a, b) = (a, h(a, b))$, то и $h(a, b)$ — непрерывное отображение. Следовательно, φ — гомеоморфизм и $(*)$ — непрерывная операция. Кроме того, решение уравнения (9) непрерывно зависит от a .

Таким образом, $(R^n, *)$ — непрерывная абелева группа, гомеоморфная R^n , и тогда, согласно теореме Понтрегина, $(R^n, *)$ изоморфна аддитивной группе R^n . Пусть f — соответствующий изоморфизм: $f(x * y) = f(x) + f(y)$. Поскольку $x * x = \varphi(x)$, то $f(x) = \frac{1}{2} f(\varphi(x))$. Отсюда имеем

$$f(x \circ y) = f(\varphi^{-1}(x * y)) = \frac{1}{2} f(x * y) = \frac{1}{2} (f(x) + f(y)).$$

Лемма 1 доказана.

Отображение f , фигурирующее в (4), позволяет ввести на R^n , рассматриваемом лишь как множество, структуру n -мерного линейного пространства, отличную, вообще говоря, от исходной, переносом исходной структуры: А именно: для любых $x, y \in R^n$ суммой этих элементов будем называть элементы $x * y = f^{-1}(f(x) + f(y))$ и для любых $x \in R^n$ и числа λ , а их произведением — элемент $f^{-1}(\lambda f(x))$. Легко видеть, что выполняются все аксиомы n -мерного линейного пространства, если в качестве нуля пространства взять элемент $f^{-1}(0)$. Обозначим полученное линейное пространство через \hat{R}^n . Отображение $f: R^n \rightarrow \hat{R}^n$ является изоморфизмом линейных пространств. Для простоты обозначений будем использовать для операций сложения и умножения в \hat{R}^n обычные обозначения $(+)$ и (\cdot) и нуль пространства \hat{R}^n обозначать через O . В тех случаях, когда может возникнуть недоразумение в связи с тем, что линейные опера-

ции в пространстве R^n и \hat{R}^n , которые как множества совпадают, обозначаются одинаковыми символами, мы будем специально указывать, о каком из пространств идет речь.

Поскольку мы намерены воспользоваться гильбертовой аксиоматизацией евклидова пространства, будем использовать терминологию и обозначения, принятые у Гильберта. Линейная структура пространства \hat{R}^n позволяет конструктивным образом ввести все понятия и отношения, вводимые у Гильберта аксиоматически, за исключением тех, которые используют аксиомы конгруэнтности. Так, прямыми и плоскостями в \hat{R}^n будем называть соответственно одномерные и двумерные линейные многообразия. Естественным образом можно ввести отношения «лежать между», «лежать в плоскости по заданную сторону от прямой» и т. д. Будем обозначать точки пространства \hat{R}^n прописными латинскими буквами, прямые и лучи — строчными латинскими, плоскости — строчными греческими. Заметим, что, как это принято у Гильберта, под отрезком понимается отрезок «без концов» A и B : $AB = \{x | tA + (1-t)B | 0 < t < 1\}$ аналогично под лучом будем понимать луч «без начала». Луч h определяет единственную прямую \bar{h} такую, что $h \subset \bar{h}$. Если луч h лежит в плоскости α , то прямая \bar{h} делит плоскость α на две области. Будем для краткости говорить, что данные точки плоскости α или данные лучи в плоскости α лежат по заданную сторону от луча h , если они лежат по заданную сторону от прямой \bar{h} . Систему двух лучей h и k , исходящих из одной и той же точки O и принадлежащих различным прямым, будем называть углом и обозначать $\angle hOk$. Пусть лучи h и k с общим началом O лежат в плоскости α . Тогда они делят ее на две области. Одну область составляют точки, которые лежат от k по одну сторону с h и от h по одну сторону с k . Их будем называть внутренними точками угла hOk .

Пусть $\Phi(A, B, A', B')$ — предикат $(A, B, A', B' \in R^n)$, удовлетворяющий следующим условиям: 5) для произвольных точек A, B, A' и произвольной прямой a' таких, что $A' \in a'$, существует точка B' , лежащая по заданную от точки A' сторону a' , для которой $\Phi(A, B, A', B') = 1$; 6) если $\Phi(A', B', A, B) = 1$, $\Phi(A'', B'', A, B) = 1$, то $\Phi(A', B', A'', B'') = 1$. Из условий 5) и 6) следует, что отношение между отрезками AB и $A'B'$, состоящее в выполнении равенства $\Phi(A, B, A', B') = 1$, является рефлексивным, симметричным и транзитивным (Гильб., 6.67). Будем называть это отношение конгруэнтностью и обозначать $AB \sim A'B'$.

Предположим, что выполняются такие условия: 7) если AB, BC — два отрезка прямой, не имеющие общих точек, $A'B', B'C'$ — два отрезка той же или другой прямой, не имеющих об-

щих точек, и $AB \sim A'B'$, $BC \sim B'C'$, то $AC \sim A'C'$; 8) пусть $\angle hOk$ и $\angle h'O'k'$ — два угла $A, B \in h$, $C, D \in k$, $A', B' \in h'$, $C', D' \in k'$. Если $OA \sim O'A'$, $OB \sim O'B'$, $OC \sim O'C'$, $OD \sim O'D'$, $AC \sim A'C'$, то $BD \sim B'D'$; 9) пусть h — луч в плоскости α с началом в точке O , точки O', T', S' не лежат на одной прямой. Тогда существуют единственная точка $S \in h$ и единственная точка T , лежащая в плоскости α по заданную сторону от луча h , такие, что $OS \sim O'S'$, $OT \sim O'T'$, $ST \sim S'T'$. Два угла $\angle hOk$ и $\angle h'O'k'$ назовем конгруэнтными, если существуют такие точки $A \in h$, $A' \in h'$, $B \in k$, $B' \in k'$, что $OA \sim O'A'$, $OB \sim O'B'$, $AB \sim A'B'$. Для записи конгруэнтности углом будем также использовать символ (\sim) .

Покажем, что в случае $n \leq 3$ для введенных объектов и отношений между ними в \hat{R}^n выполняются все аксиомы Гильберта евклидовой геометрии, а при $n > 3$ эти аксиомы выполняются для любого трехмерного линейного многообразия в \hat{R}^n . Для аксиом соединения, порядка и параллельности это очевидно. Рассмотрим аксиомы конгруэнтности. Будем нумеровать их согласно Гильберту. Аксиомы III₁, III₂ и III₃ совпадают с принятыми нами условиями 5), 6) и 7). Покажем, что для любых двух углов $\angle hOk$ и $\angle h'O'k'$ и любых точек $S \in h$, $T \in k$, $S' \in h'$, $T' \in k'$ из соотношений $OT \sim O'T'$, $OS \sim O'S'$, $\angle hOk \sim \angle h'O'k'$ (10) следует, что $ST \sim S'T'$ (11).

Действительно, согласно определению конгруэнтности углов существуют точки $A \in h$, $A_1 \in h_1$, $B \in k$, $B_1 \in k_1$ такие, что $OA \sim O_1A_1$, $OB \sim O_1B_1$, $AB \sim A_1B_1$. Отсюда и из двух первых соотношений (10) на основании условия (8) заключаем, что $ST \sim S'T'$.

Проверим выполнимость аксиомы III₄. Она гласит следующее. Пусть $\angle h'O'k'$ — угол в плоскости α , h — луч в плоскости α с началом в точке O такой, что $\angle hOk \sim \angle h'O'k'$ и все внутренние точки угла $\angle hOk$ находятся в плоскости α по заданную сторону от луча h . Покажем, что выполнимость этой аксиомы обеспечивается условием 9). Пусть S' и T' — произвольные точки, лежащие на лучах h' и k' соответственно. Условие 9) гарантирует существование точки $S \in h$ и точки T , лежащей в плоскости α по заданную сторону от луча h и таких, что

$$OS \sim O'S', \quad OT \sim O'T', \quad ST \sim S'T'.$$

Пусть k — луч с началом в точке O , проходящей через точку T . Согласно определению конгруэнтности углов и соотношениями (12) $\angle hOk \sim \angle h'O'k'$. Легко видеть, что внутренние точки угла $\angle hOk$ лежат по заданную сторону от луча h . Допустим теперь, что, вопреки доказываемому, существует луч \bar{k} , отличный от k и удовлетворяющий тому же условию. Имеем $\angle hOk \sim \angle hOk$. Выберем произвольные точки $A \in h$ и $B \in k$. Отложим на

луче k точку B так, чтобы $OB \sim \overline{OB}$. Существование такой точки гарантируется условием 5). Имеем $OA \sim \overline{OA}$, $OB \sim \overline{OB}$, $\angle hOk = \angle \overline{hOk}$. Значит, выполняется условие (10). Тогда имеет место конгруэнтность (11): $AB \sim \overline{AB}$. Точки B и \overline{B} лежат в плоскости α по одну сторону от луча h , точки O, A, B не лежат на одной прямой. В силу требований условия 9) о единственности $\hat{B} = \overline{B}$. Это противоречит тому, что k и \overline{k} — различные лучи с общим началом. Итак, аксиома III₄ выполняется.

Проверим аксиому III₅. Она гласит: если для двух треугольников $AB \sim A'B'$, $AC \sim A'C'$, $\angle BAC \sim \angle B'A'C'$ (13), то $\angle ABC = \angle A'B'C'$. Из доказанного выше факта о конгруэнтности треугольников следует, что $BC \sim B'C'$. Но тогда $\angle ABC \sim \angle A'B'C'$ согласно определению конгруэнтности углов.

Таким образом, аксиомы конгруэнтности выполняются. При выполнении аксиом групп I—IV аксиомы непрерывности эквивалентны аксиоме Дедепинда, которая выполняется в линейном пространстве.

Зафиксируем произвольный отрезок в качестве единицы масштаба для измерения длины. Аксиомы конгруэнтности и непрерывности позволяют с помощью стандартной процедуры поставить в соответствие каждому отрезку положительное число. При этом конгруэнтным отрезкам ставятся в соответствие одинаковые числа. Далее, так же, как это делается в аксиоматическом курсе евклидовой геометрии, введем значение угла. Это позволит определить скалярное произведение векторов в \hat{R}^n равенством $(u, v) = |u| \cdot |v| \cdot \cos(\hat{u}, v)$, где $\cos(\hat{u}, v)$ — длина вектора u . В случае $n \leq 3$, как известно, при этом будут выполняться аксиомы скалярного произведения. Эти аксиомы будут выполняться и при $n > 3$. Это следует, из того, что в каждой из аксиом фигурирует не более трех векторов. Линейная оболочка этих векторов является подпространством размерности не больше трех, а по доказанному выше в таких подпространствах выполняются все аксиомы Гильберта. Поэтому случай $n > 3$ сводится к уже рассмотренному случаю $n \leq 3$.

Итак, пространство \hat{R}^n является евклидовым. Следовательно, оно изоморфно как евклидово пространство пространству \hat{R}^n . Пусть $\theta: \hat{R}^n \rightarrow R^n$ — соответствующий изоморфизм. Если отрезки AB и $A'B'$ конгруэнтны, то их \hat{R}^n -длины совпадают, следовательно, совпадают и R^n -длины отрезков $\theta(A)\theta(B)$ и $\theta(A')\theta(B')$. Обратно, если совпадают R^n -длины отрезков $\theta(A)\theta(B)$ и $\theta(A')\theta(B')$, то совпадают R^n -длины отрезков AB и $A'B'$, и, значит, эти отрезки конгруэнтны. Таким образом, справедлива формула (1).

Обратно, если для предиката Φ справедлива формула (1), а (\circ) — бинарная операция, определенная равенством (3), то,

как легко проверить, выполняются все условия 1)–9). Таким образом, доказана теорема 1.

Теорема 1. Пусть $\Phi(x_1, y_1, x_2, y_2)$ ($x_1, y_1, x_2, y_2 \in R^n$) — предикат, (\circ) — бинарная операция в R^n , удовлетворяющая условиям 1)–9). Тогда для предиката Φ справедлива формула (1). Обратно, если для предиката Φ выполняется формула (1), а бинарная операция (\circ) определена равенством (3), то выполняются условия 1)–9).

Поступила в редколлегию 06.07.87

УДК 535.83:612.84

А. В. ЛУИЗОВ, Н. С. ФЕДОРОВА

ИНФОРМАЦИОННАЯ ЕМКОСТЬ ЗРЕНИЯ

Острота зрения. Зрение дает нам наибольшее количество информации о внешнем мире. То, на что устремлен взгляд человека, изображается на сетчатках его глаз. Можно подсчитать, какое максимальное количество деталей может различить человек в изображении на сетчатке. Если перевести это количество на язык теории информации и выразить его в битах, получим некоторое число H — информационную емкость зрения.

Рассмотрим, от чего зависит H . Чем мельче воспринимаемые детали, тем больше их может уместиться на площади изображения. Значит, необходимо определить остроту зрения, которая зависит от углового размера δ разрешаемой детали. Острота зрения V есть величина, обратная предельному углу δ : $V=1/\delta$.

Для расчетов удобней пользоваться не остротой зрения, а предельным углом δ .

Мы считаем, что глаз — почти идеальный зрительный прибор. Предел его возможностям ставят только основные законы природы и физические свойства света: его волновая и корпускулярная природа. Волновая природа света, которая ставит предел разрешающей силе любого оптического прибора, обуславливает явление дифракции. Правильно рассчитанный и хорошо выполненный оптический прибор с диаметром входного зрачка D способен разрешить объект с угловым размером δ , измеряемым в радианах:

$$\delta = \frac{1,22\lambda}{D}. \quad (1)$$

Здесь λ — длина волны используемого света, выраженная в тех же единицах, что и D . Если учитывать только волновую природу света, предельный угол зависит исключительно от длины волны и диаметра входного зрачка прибора. Измерение остроты зрения при достаточной яркости и по тест-объектам с хорошим контрастом (черные объекты на белом фоне) показывает, что острота зрения удовлетворяет этой формуле, т. е. глаз

полностью использует возможности, предоставляемые волновой природой света. Приняв $\lambda=555$ нм и выразив D в миллиметрах, получим $\delta=2,33/D$ (2).

Однако и глаз, и любой самый совершенный прибор разрешают угол, определяемый формулой (2), только при большой яркости и при контрасте, близком к единице. С падением яркости или контраста увеличивается δ , т. е. разрешающая сила падает. Здесь сказывается корпускулярная природа света, начинают играть роль квантовые флуктуации света. Введем формулу контраста

$$K = \frac{L - L_{\Phi}}{L_{\Phi}}, \quad (3)$$

где L — яркость объекта; L_{Φ} — яркость фона. Освещенности сетчатки на изображении объекта и фона пропорциональны L и L_{Φ} соответственно. Следует считать, что глаз суммирует воздействие квантов, попадающих на сетчатку, на площади изображения разрешаемого объекта за некоторое время ν . Назовем это число квантов n . На равную площадь изображения фона за то же время ν воздействует n_{Φ} квантов. Время суммирования воздействий квантов ν — время инерции. Оно зависит от яркости фона и с падением ее возрастает от 0,05 до 0,20 с.

Среднее количество квантов n , n_{Φ} пропорционально освещенностям соответствующих мест сетчатки и следовательно яркостям L , L_{Φ} . Поэтому

$$K = \frac{n - n_{\Phi}}{n_{\Phi}}. \quad (4)$$

Однако n , n_{Φ} — только средние количества квантов, поглощаемых на рассматриваемых нами площадях изображений объектов и фона за время ν . Вследствие квантовых флуктуаций истинное значение числа n — назовем его n' — в разные промежутки времени ν может значительно отличаться от среднего его значения n . По законам статистической физики Δn — среднее отклонение n' от n : $\Delta n = \sqrt{n}$. Так же точно $\Delta n_{\Phi} = \sqrt{n_{\Phi}}$.

Если учесть квантовые флуктуации, то контраст при неизменных L , L_{Φ} становится хаотически меняющейся величиной K' :

$$K' = \frac{n' - n'_{\Phi}}{n'_{\Phi}}. \quad (5)$$

Покажем, что неустойчивость контраста тем больше, чем меньше n , n_{Φ} , т. е. в конечном счете чем ниже яркости L , L_{Φ} . Пусть $n_{\Phi}=1225$, $n=784$. Тогда по формуле (4) $K=0,36$. Рассмотрим самый неблагоприятный случай, когда вследствие флуктуаций R_{Φ} уменьшилось на Δn_{Φ} , а n объекта увеличилось на Δn :

$$\Delta n_{\Phi} = \sqrt{1225} = 35; \quad \Delta n = \sqrt{784} = 28;$$

$$n'_\phi = n_\phi - \Delta h_\phi = 1190; \quad n' = n + \Delta n = 812;$$

$$K' = \frac{1190 - 812}{1190} = 0,32.$$

Контраст изменился с 0,36 до 0,32, т. е. незначительно.

Допустим, что вследствие падения освещенности и следовательно яркостей L , L_ϕ средние числа квантов n_ϕ , n уменьшились в 49 раз. Теперь $n_\phi = 25$, $n = 16$. Как и прежде, $K = 0,36$.

$$\text{Но } \Delta n_\phi = \sqrt{25} = 5; \quad \Delta n = \sqrt{16} = 4; \quad n'_\phi = 25 - 5 = 20; \quad n' = 16 + 4 = 20; \quad K' = \frac{20 - 20}{20} = 0.$$

Контраст K' стал величиной колеблющейся, неустойчивой, иногда доходящей до нуля. Улавливать его, т. е. обнаруживать контрастирующий объект, трудно или даже невозможно. Таким образом, квантовая природа света определяет зависимость разрешающей силы любого оптического прибора от яркости фона L_ϕ и контраста объекта с фоном K . Общий вид этой зависимости $K\delta\sqrt{L_\phi} = \text{const}$ (6).

Однако живая зрительная система активно борется с падением разрешающей силы при уменьшении яркости: расширяется зрачок, повышается концентрация светочувствительного вещества в сетчатке, увеличивается время накопления v . Для учета этих компенсационных изменений нужно изменить степень K и L_ϕ . При согласовании формулы (6) с экспериментальными данными степень K увеличили с 1 до 1,5, а степень L_ϕ уменьшили с 0,5 до 0,42. В результате

$$\delta = \frac{0,44 + 0,63L_\phi^{-0,42}}{(K - 0,02)^{2,13}}. \quad (7)$$

Количество информации. Напишем теперь общую формулу для количества информации H' : $H' = N \log_2 m$ (8), где N — число разрешаемых элементов в изображении, m — различаемое число градаций яркости в элементе.

Практически количество информации в изображении зависит не только от свойств глаза (или другого зрительного прибора), но и от наблюдаемого объекта. Например, если в поле зрения прибора будет только чистое безоблачное небо, количество информации, передаваемое любым прибором, будет близко к нулю. Поэтому, определяя информационную емкость, следует найти не фактически имеющееся в изображении количество информации, а то количество информации, которое может быть воспринято прибором при наиболее благоприятном

¹ Здесь и далее под H мы подразумеваем полную информацию, равную энтропии системы, что и побудило нас воспользоваться символом H , которым обычно обозначают энтропию.

выборе объекта передачи. Обычно можно увеличить воспринимаемое число градаций яркости за счет уменьшения числа элементов (т. е. увеличения площади каждого элемента). Зависимость N от m для разных приборов неодинакова. Однако удалось показать, что существует тенденция к увеличению N при уменьшении m , так что N оказывается близким к максимуму при $m=2$ — одни элементы изображаемой картины белые, другие — черные. Но при $m=2 \log_2 m = 1$, т. е. $H=N$ (9).

Чтобы найти H для глаза, необходимо знать $\delta(u)$ — предельный угол разрешения, где u — угол между зрительной осью и направлением на объект. Если упрощенно считать, что свойства сетчатки одинаковы по всем меридианам,

$$H = 2\pi \int_0^{\beta} \frac{udu}{\delta^2(u)}. \quad (10)$$

Экспериментальные данные [1] позволяют аппроксимировать функцию $\delta(u)$ формулами

$$\begin{aligned} \delta(u) &= 0,056u + 0,82 \text{ при } 0 \leq u \leq 5^\circ; \\ \delta(u) &= 0,108u + 0,56 \text{ при } 5^\circ \leq u \leq 35^\circ, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\delta(u)$ дано в угловых минутах, u — в градусах. При подстановке в формулу (10) $\delta(u)$, u и β можно взять в любых одинаковых единицах. Подставив (11) в (10) после интегрирования в пределах от 0 до 35° , т. е. в пределах поля зрения 70° , получаем $H=2,2 \cdot 10^6$ бит.

Для сравнения заметим, что на экране телевизора может быть создана картина с количеством информации в полмиллиона бит, что в несколько раз меньше, чем H глаза.

Это количество информации еще несколько преуменьшено ибо, как видно из (11), в центре поля зрения ($u=0$) $\delta=0,182$. По формуле (7) такой предельный угол получается при контрасте около 0,7 и при довольно малой яркости $L=17$ кд/м².

Вооруженный глаз. Наблюдая удаленные объекты, человек пользуется телескопическими приборами — зрительной трубой или биноклем. Поле зрения окуляра телескопического прибора бывает различным, но в среднем его можно принять за $70^\circ:2\beta = 70^\circ$. Именно для удобства сравнения с вооруженным глазом мы провели интегрирование по формуле (10) только в пределах $\beta=35^\circ$. На самом деле поле зрения глаза значительно больше (но и разрешающая способность далекой периферии весьма мала).

Назовем угол половины поля зрения объектива (т. е. радиуса поля зрения на местности в угловой мере) β , а радиус поля зрения окуляра β' . Соотношение между ними

$$\frac{\text{tg } \beta'}{\text{tg } \beta} = \Gamma, \quad (11')$$

где Γ — увеличение. Телескоп вследствие увеличения позволяет видеть более мелкие детали, но на меньшей площади местности. В результате количество информации, получаемое глазом, не увеличивается. Применение телескопа того или иного увеличения равносильно изменению масштаба картины.

Наглядно роль масштаба можно представить так. Пусть у нас имеется лист бумаги определенной площади. На ней можно изобразить план большой территории в малом масштабе или малой части этой территории в большом масштабе. Число имеющихся на листе деталей остается одинаковым, а масштабы мы выбираем в зависимости от того, что нас интересует: общий охват взглядом всей территории или подробное изучение какой-го из его частей.

Практически в силу аберраций и снижения контраста из-за рассеянного в телескопе света, количество информации даже снижается. Эта потеря информации своеобразная плата за обмен малоценной информацией на более ценную.

Информационный критерий качества. Плотность потока информации. Современные телескопические приборы рассчитываются так, что их разрешающая способность равна теоретически возможной, соответствующей (1), но только в центре поля зрения. На периферии аберрации неизбежно снижают разрушающую способность и довольно сильно. Естественно считать, что чем меньше это снижение, тем лучше прибор.

Представим себе идеальный прибор, у которого разрешающая способность по всему полю зрения равна дифракционной. Информационная емкость такого прибора H_0 зависит только от диаметра входного зрачка D и поля зрения 2β и равна $H_0 = 2,09 \cdot 10^5 D^2 \beta^2$ (12), где H_0 выражено в битах, D — в см, β — в градусах.

Истинная информационная емкость H может быть вычислена по формуле (10) с учетом зависимости δ от u для данного прибора. Отношение реальной информационной емкости H к теоретически возможной H_0 можно назвать информационным критерием качества прибора $k = H/H_0$ (13).

Другой характерный показатель телескопического прибора — плотность информации g запишем как отношение количества информации H к площади входного зрачка прибора S : $g = H/S$ (14), или, так как

$$S = \frac{\pi D^2}{4}; \quad g = \frac{4H}{\pi D^2},$$

H и g можно вычислить и для глаза. Мы провели расчет для диаметра зрачка глаза $D = 0,37$ см, что соответствует яркости $L_\Phi = 17$ кд · м⁻².

В таблице приведены данные для глаза и трех биноклей. Согласно данным таблицы, информационному критерию качества k глаз близок к исследованным биноклям, а по плотности информации g в десятки раз превосходит их. Биологически

Прибор	D	A	H_0	H	k	g
Глаз	0,37	0,216	28	2,2	0,077	20,2
БПШ 6×24 , $2\beta = 11,5^\circ$, $f_{об} = 92,34$ мм	2,4	0,260	39	3,3	0,085	0,73
БПБ 12×40 , $2\beta = 6^\circ$, $f_{об} = 163,99$ мм	4,0	0,244	30	3,1	0,104	0,25
БПВ 7×50 , $2\beta = 6,8^\circ$, $f_{об} = 195$ мм	5,0	0,256	60	2,3	0,039	0,12

A —относительное отверстие системы, $A = \frac{D}{f_{об}}$, где $f_{об}$ — фокусное расстояние объектива; H —в миллионах бит; g —в миллионах бит на см²

очень важно получать обширную информацию, не делая глаз чрезмерно большим.

Приближение к реальности. В практически наблюдаемых картинах редко бывают контрасты, близкие к единице, и, следовательно, минимальные разрешаемые углы δ . Стараясь приблизиться к реальным условиям наблюдения, мы положили $L_\phi = 100$ кд·м⁻², $K = 0,1$.

Подставляя эти величины в (7), получим $\delta = 3$. При $K \neq 1$, $H \neq N$ формула (10) дает уже не H , а N . Чтобы найти H , N нужно умножить на $\log_2 m$. Связь между числом градаций и контрастом K приближенно равна

$$m = 2 + \frac{\lg K}{\lg(1-K)}. \quad (16)$$

При $K = 0,1$ $m \approx 24$ и $\log_2 m \approx 4,6$.

Для получения N воспользуемся формулой (10). Зависимость δ от u найдем, переделав формулу (11) так, чтобы для центра $\delta = 3'$ (а не $0',82$) и чтобы при $u = 0-35^\circ$ δ увеличилась во столько же раз, как и по формуле (11). Тогда

$$\delta(u) = 3 + 0,0037u \text{ при } 0 \leq u, 300';$$

$$\delta(u) = 2,16 + 0,0065u \text{ при } 300' \leq u \leq 2100'.$$

Здесь δ и u выражены в минутах.

Интегрирование дает $N = 1,63 \cdot 10^5$, и после умножения на $\log_2 m$ $H = 7,5 \cdot 10^5$ бит.

Учет цветовых различий. Весь проведенный расчет сделан для черно-белого зрения и поэтому еще далек от реальности. Добавление восприятия цветовых различий должно увеличить информационную емкость зрения, но трудно сказать, во сколько раз.

Яркость — величина скалярная, одномерная. Поэтому и контраст K , с которым мы до сих пор имели дело, одномерен, цвет — трехмерен. Цветовой порог тоже имеет три составляю-

щих. Область цветов, неотличимых от заданного, изображается трехосным эллипсоидом в цветовом пространстве. Весьма сложна и зависимость порога от наблюдаемого объекта. Так что здесь мы можем только грубо оценить роль цветовых различий в информационной емкости зрения.

Атласы цветов содержат до 2000 красок, хорошо различаемых друг от друга. Примем число градаций по цвету $m = 2000$: $\log_2 2000 = 11$. Умножив уже полученное число N на 11, получаем $H = 17,9 \cdot 10^5$ бит.

Пропускная способность зрения. Изображение на сетчатке кодируется и передается в мозг, где оно воспринимается как грехмерная картина, локализованная непосредственно вне наблюдателя, на местности. Информация, получаемая сетчаткой, юспринимается как информация, содержащаяся в картине внешнего мира. Но эта картина изменчива в результате действия наблюдаемых или изменения направления его взора. Все овые и новые картины передаются в мозг. С какой скоростью, какой частотой они могут сменяться? Можно считать, что одичный зрительный акт длится ϑ — время инерции зрения. Поэтому частота ν смены кадров — величина, обратная ϑ :

$$\nu = 1/\vartheta. \quad (17)$$

тсюда информационная пропускная способность зрения

$$C = H\nu = \frac{H}{\vartheta}. \quad (18)$$

ри высокой яркости $\nu = 0,05$ с, т. е. $\nu = 20$ с⁻¹. Пропускную оспособность для контраста $K = 1$ обозначим C_1 , для контраста $1 - C_{0,1}$ и C_{∞} — для цветового зрения — $C_{\infty} \cdot C = 44 \cdot 10^6$ бит·с⁻¹; $C_{0,1} = 15 \cdot 10^6$ бит·с⁻¹; $C_{\infty} = 36 \cdot 10^6$ бит·с⁻¹, C_{∞} почти в 2,5 ра- больше, чем $C_{0,1}$.

Осознание передаваемой в мозг информации. Какая же ьсть направляемой в мозг информации осознается, активно исьзуется человеком? Оказывается, ничтожно малая.

По данным В. Д. Глезера и И. И. Цуккермана [2], поток зформации C_c , используемый сознанием, по самым щедрым исчислениям, равен 72 бит·с⁻¹.

Зингер, ссылаясь на Шеннона и Винера, пишет, что человек ожет читать 5-6 слов в секунду. В английском слове в сред- ем 4,2 буквы, значит в секунду можно прочесть 25 букв, а на жждую букву приходится информация в среднем 2,35 бит. множив 2,35 на 25 с⁻¹, получим примерно 60 бит·с⁻¹, что лизко к ранее указанному числу 72 бит·с⁻¹.

Таким образом, периферическая часть органа зрения нер- ьрывно подготавливает огромный запас информации, из кото- ого только ничтожная часть активно используется сознанием. ю, по-видимому, эта ничтожная по количеству часть особенно

нужна в каждый данный момент для решения жизненно важных задач, т. е. практическое значение ее отнюдь не ничтожно. А запас информации на периферии зрительной системы дает свободу выбора того, что нужно использовать.

Список литературы: 1. Пинегин Н. И., Травникова Н. П. Зависимость остроты зрения от места на сетчатке, контраста и времени наблюдения//Тр ГОИ. Л., 1960. 28, вып. 157. С. 25—28. 2. Глезер В. Д., Цуккерман И. И. Информация и зрение. М.; Л., 1961. 184 с.

Поступила в редакцию 05.04.8

УДК 519.95

А. Д. ЗАКРЕВСКИЙ, д-р техн. наук

МИНИМИЗАЦИЯ ЧАСТИЧНЫХ КОНЕЧНЫХ ПРЕДИКАТОВ

Постановка задачи. Любой конечный предикат можно представить как двузначную функцию φ от многозначных аргументов x_1, x_2, \dots, x_n , принимающих значения соответственно из конечных множеств A_1, A_2, \dots, A_n . Прямое произведение последних $A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$ образует пространство M , элементами которого служат наборы значений аргументов. Обозначим через P совокупность элементов, на которых φ принимает значение 1; через Q — область, где φ обращается в 0. Очевидно, что $P \cap Q = \emptyset$, если же при этом $P \cup Q \neq M$, предикат φ называется частичным (поскольку на области $M \setminus (P \cup Q)$ его значение не определено).

Интервалом пространства M назовем прямое произведение непустых подмножеств $\alpha_1 \subseteq A_1, \alpha_2 \subseteq A_2, \dots, \alpha_n \subseteq A_n$ [1]. Рассмотрим задачу нахождения минимальной совокупности интервалов $\{u_1, u_2, \dots, u_s\}$, удовлетворяющей условию $P \subseteq u_1 \cup u_2 \cup \dots \cup u_s \subseteq M \setminus Q$. Именно к этой задаче сводится, согласно [2], минимизация ДНФ предиката φ по числу членов, т. е. поиск кратчайшей ДНФ предиката φ .

Ниже предлагается способ решения, представляющий собой обобщение методов минимизации слабо определенных булевых функций, описанных в [3]. Он включает в себя два метода: точный и приближенный.

Сжатое описание методов минимизации. По аналогии с [3] назовем интервально-поглощаемым подмножеством P_i из P , для которого найдется интервал u , такой, что $P_i \subseteq u \subseteq M \setminus Q$. Если при этом не существует другого интервально-поглощаемого подмножества P_j , такого, что $P_i \subset P_j$, то P_i называется максимальным интервально-поглощаемым подмножеством.

Точный метод минимизации сводится к выявлению множества I всех максимальных интервально-поглощаемых подмножеств из P , построению булевой матрицы $\|P \in I\|$ отношения

принадлежности элементов из P элементам из I и нахождению кратчайшего столбцового покрытия этой матрицы. Искомое решение образуется интервалами, соответствующими столбцам, вошедшим в это покрытие.

Однако точный метод довольно трудоемок, поскольку мощность множества I зависит экспоненциально от числа элементов в множестве P . Поэтому, если последнее измеряется десятками и сотнями, рекомендуется перейти к приближенному методу минимизации — обобщению метода конкурирующих интервалов, при котором входящие в решение интервалы строятся параллельно [3].

Этот метод заключается в последовательном расширении частичного решения — некоторой изменяемой (растущей) совокупности интервалов U^+ , первоначально пустой. На текущем шаге частичное решение сравнивается с совокупностью P^- непокрытых (т. е. не принадлежащих ни одному элементу из U^+) элементов из P . При этом анализируется отношение совместности элементов из P^- с элементами из U^+ : элементы считаются совместимыми, если в пространстве M существует содержащий их интервал, не пересекающийся с Q . Если в P^- найдется элемент, не совместимый ни с одним из элементов множества U^+ , то в последнее вводится новый интервал, состоящий только из упомянутого элемента. Если же такого элемента не найдется, производится совмещение: некоторый из интервалов частичного решения заменяется новым, содержащим как его, так и некоторый еще непокрытый элемент множества P . Порядок выбора совмещаемой пары аналогичен описанному в [3]. Когда множество P^- становится пустым, частичное решение принимается за окончательное.

Векторные представления. Как это предложено ранее [1, 2], будем представлять элементы и интервалы пространства M секционированными булевыми векторами, в которых каждая секция содержит ровно одну единицу при представлении элементов и не менее одной единицы при представлении интервалов. Подмножества из M и совокупности интервалов будем задавать соответствующими булевыми секционированными матрицами.

Например, рассмотрим пространство переменных x_1, x_2, x_3 , принимающих значения соответственно из множеств $A_1 = \{1, 2, 3\}$, $A_2 = \{1, 2, 3, 4\}$, $A_3 = \{1, 2\}$. В этом случае вектор 100.0010.01 представляет элемент пространства, на котором $x_1 = 1$, $x_2 = 3$, $x_3 = 2$, а вектор 011.0101.10 — интервал пространства, состоящий из элементов, на которых $x_1 = 2$ или 3, $x_2 = 2$ или 4, $x_3 = 1$, т. е. из четырех элементов, совокупность последних можно представить также секционированной булевой матрицей

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

704609

Парой таких матриц можно задавать частичный предикат Φ , подлежащий минимизации. Будем рассматривать далее конкретный пример, в котором множества P и Q представлены матрицами P и Q :

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccc} x_1 & x_2 & x_3 \\ 1 & 2 & 3 \end{array} & \begin{array}{ccc} 1 & 2 & 3 & 4 \end{array} & \begin{array}{cc} 1 & 2 \end{array} \\
 P = \left[\begin{array}{ccc|ccc|c} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 5 \end{array} \right] \\
 Q = \left[\begin{array}{ccc|ccc|c} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 3 \end{array} \right]
 \end{array}$$

Алгоритмизация метода, ориентированная на ЭВМ. Специфика конечных предикатов сказывается в выполнении теоретико-множественных операций (в том числе проверке отношений), из которых складываются описанные методы.

Ориентируясь на реализацию методов на ЭВМ, выразим эти операции в векторной форме, используя покомпонентные векторные операции дизъюнкции (\vee), конъюнкции (\wedge) и отрицания (\neg). Векторные представления рассматриваемых величин будем обозначать полужирным шрифтом (например, задавая элемент p секционированным булевым вектором \mathbf{p} , а интервал u — вектором \mathbf{u}). Вектор, в котором, по крайней мере, одна секция пустая (не содержит единиц, обозначим через \emptyset , а вектор, все компоненты которого имеют значение 0, через $\mathbf{0}$).

В основу алгоритмизации положим следующие утверждения.

Утверждение 1. Элемент p принадлежит интервалу u , если и только если $\neg \mathbf{u} \wedge \mathbf{p} = \mathbf{0}$.

Утверждение 2. Интервал v содержится в интервале u , если и только если $\neg \mathbf{u} \wedge \mathbf{v} = \mathbf{0}$.

Утверждение 3. Интервал v не пересекается с интервалом u , если и только если $\mathbf{u} \wedge \mathbf{v} = \emptyset$.

Утверждение 4. Минимальный интервал u , содержащий заданную совокупность элементов $\{p_1, p_2, \dots, p_s\}$, представляется вектором $\mathbf{u} = \mathbf{p}_1 \vee \mathbf{p}_2 \vee \dots \vee \mathbf{p}_s$.

Утверждение 5. Подмножество $\{p_1, p_2, \dots, p_s\}$ из P является интервально-поглощаемым, если и только если для любого элемента q_i из Q выполняется отношение $\neg(\mathbf{p}_1 \vee \mathbf{p}_2 \vee \dots \vee \mathbf{p}_s) \wedge \mathbf{q}_i \neq \mathbf{0}$.

Утверждение 6. Элемент p_i из множества непокрытых элементов P совместим с интервалом u_j , входящим в частичное решение, если и только если для любого элемента q_k из Q выполняется отношение $\neg(\mathbf{p}_i \vee \mathbf{u}_j) \wedge \mathbf{q}_k \neq \mathbf{0}$.

Пример. Порядок применения введенных операций продемонстрируем на примере строгой минимизации предиката φ , заданного выше множествами P и Q .

1. Перебирая пары элементов из P , выявим среди них совместимые. Например, для элементов

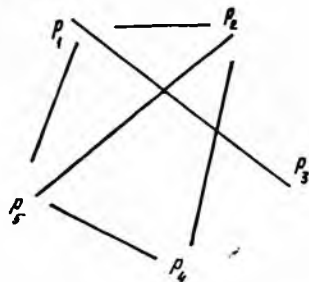
$$010.0100.01 \ p_1$$

$$001.1000.10 \ p_2$$

находим минимальный поглощающий интервал

$$011.1100.11 \ u_{1,2}$$

и выясняем, что он не пересекается с Q (не выполняется ни одно из отношений $\neg u_{1,2} \wedge q_i = 0, i = 1, 2, 3$), следовательно, эта пара совместима. Результат проверки всех пар представим в форме графа совместимости элементов множества P (рисунок).



2. Анализируем тройки попарно совместимых элементов (в данном случае их две) и среди них выявляем интервально-поглощаемые. Так, для тройки

$$010.0100.01 \ p_1$$

$$001.1000.10 \ p_2$$

$$010.0001.10 \ p_4$$

находим минимальный поглощаемый интервал

$$011.1101.11 \ u_{1,2,4},$$

который не пересекается с Q , следовательно, эта тройка интервально-поглощаема. А для тройки

$$010.0100.01 \ p_1$$

$$010.0001.10 \ p_4$$

$$100.0010.01 \ p_5$$

находим интервал

$$110.0111.11 \ u_{1,4,5},$$

пересекающийся с Q (ему принадлежит элемент

$$100.0100.10 \ q_3),$$

следовательно, эта тройка не является интервально-поглощающей.

Далее, в общем случае могут рассматриваться четверки, пятёрки и т. д., но в данном примере это не нужно.

В результате находим множество I всех максимальных интервально-поглощаемых подмножеств из P , представляемых столбцами матрицы

$$\|P \in I\| = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & 1 \\ & 2 \\ & 3 \\ & 4 \\ & 5. \end{matrix}$$

3. Легко находим кратчайшее столбцовое покрытие этой матрицы, составленное из столбцов 1 и 3, и строим по нему искомое решение из двух интервалов:

$$\begin{matrix} x_1 & & x_2 & & x_3 \\ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Представляя этот результат в алгебраической форме, получим ДНФ

$$(x_1=2, 3) (x_2=1, 2, 4) \vee (x_1=1) (x_2=3, 4).$$

4. При желании можно расширить полученные интервалы (но так, чтобы они не пересекались с Q), изменяя в их векторных представлениях значения некоторых компонент с 0 на 1. В данном случае получим

$$\begin{matrix} x_1 & & x_2 & & x_3 \\ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Минимизация числа аргументов. Представляет интерес минимизация числа аргументов частичного конечного предиката. Эту задачу можно сформулировать так: в матрицах P и Q выделить минимальное число секций, так чтобы строки из разных матриц различались, по крайней мере, в одной из этих секций.

Строгое решение этой задачи можно получить, построив сначала булеву матрицу различий D размером $|P||Q|$ на n строки которой ставятся в соответствие парам строк матриц P и Q (одна строка выбирается из P , другая — из Q), а столбцы — аргументам предиката. Элемент a_{ij} матрицы D принимает значение 1, если i -я пара различается в j -й секции, и значение 0 — в противном случае. Затем находится кратчайшее столбцовое покрытие матрицы D приводящее к искомому решению.

Например, если

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccccc}
 & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\
 & 1\ 2\ 3 & 1\ 2\ 3 & 1\ 2\ 3 & 1\ 2\ 3 & 1\ 2\ 3 \\
 P = & \left[\begin{array}{cccccc}
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0
 \end{array} \right], \\
 Q = & \left[\begin{array}{cccccc}
 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{array} \right],
 \end{array}
 \end{array}$$

то

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccccc}
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\
 D = & \left[\begin{array}{ccccc}
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\
 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 1 & 1
 \end{array} \right] \begin{array}{l}
 1.1 \\
 1.2 \\
 1.3 \\
 2.1 \\
 2.2 \\
 2.3 \\
 3.1 \\
 3.2 \\
 3.3.
 \end{array}
 \end{array}
 \end{array}$$

Справа показано, каким именно парам соответствуют строки матрицы D .

Для этой матрицы находим три кратчайших покрытия, которые удобно представить в виде строк следующей матрицы:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccccc}
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\
 & \left[\begin{array}{ccccc}
 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 1
 \end{array} \right].
 \end{array}
 \end{array}$$

Каждое из них определяет некоторый класс решений, в которых число аргументов рассматриваемого предиката сокращается до двух. Например, исходя из последнего покрытия, можно получить ДНФ $(x_3=1)(x_5=1, 2) \vee (x_3=3)(x_5=3)$.

Данный метод легко обобщается на случай, когда функция φ задана не множествами P и Q элементов, на которых она принимает значения 1 и 0, а двумя аналогичными множествами интервалов. Обобщение касается лишь способа вычисления матрицы различий D и заключается в следующем: элемент a_i^j получает значение 1, если соответствующая индексу i пара строк обладает в j -й секции значениями, конъюнкция которых равна нулю, и получает значение 0 в противном случае.

Список литературы: 1. Закревский А. Д. Симметричные нормальные формы конечных предикатов//Докл. АН БССР. 1987. 31, № 5. С. 427—429. 2. Закревский А. Д. Минимизация конечных предикатов в классе ДНФ//Докл. АН БССР. 1987. № 6. С. 503—506. 3. Закревский А. Д. Алгоритмы синтеза дискретных автоматов. М., 1971. С. 512.

Поступила в редколлегию 07.12.87

УДК 510.62

Д. Э. СИТНИКОВ, Ю. П. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО, д-р техн. наук

НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ПРЕДИКАТОВ ПОРЯДКА

Предикат E , определенный на декартовом квадрате множества M , называется *рефлексивным*, если для любого x из M : $E(x, x) = 1$.

Предикат E называется *транзитивным*, если для любых x, y и z из M : $E(x, y) \wedge E(y, z) \Rightarrow E(x, z)$.

Предикат E называется *антисимметричным*, если для любых x, y из M : $E(x, y) \wedge E(y, x) \Rightarrow x = y$.

Предикат E назовем предикатом квазипорядка, если он рефлексивен и транзитивен. Антисимметричный предикат квазипорядка назовем предикатом *нестромого порядка*. Докажем теорему об общем виде класса предикатов квазипорядка.

Теорема 1. Пусть $E(x, y)$ — предикат квазипорядка, определенный на декартовом квадрате множества M . Тогда существует такое множество N , функция $f: M \rightarrow N$ и предикат нестромого порядка W на множестве N , что для любых x, y из M : $E(x, y) = W(f(x), f(y))$ (1). Обратно, любой предикат $E(x, y)$, который можно представить в виде (1), является предикатом квазипорядка.

Доказательство. Докажем сначала вторую часть теоремы. Пусть предикат $E(x, y)$ представлен в виде (1); пусть $E(x, y) = E(y, z) = 1$. Это означает, что $W(f(x), f(y)) = W(f(y), f(z)) = 1$. В силу транзитивности предиката W , можно утверждать, что $W(f(x), f(z)) = 1$, откуда $E(x, z) = 1$. Значит, предикат E транзитивен. Для любого x из M $E(x, x) = W(f(x), f(x)) = 1$, в силу рефлексивности предиката W . Значит, предикат E рефлексивен. Итак, предикат $E(x, y)$ обладает свойствами рефлексивности и транзитивности и, следовательно, является предикатом квазипорядка.

Докажем первую часть теоремы. Пусть $T_x = \{y | E(x, y) = 1\}$. В качестве множества N возьмем множество всех T_x , а в качестве предиката нестромого порядка W — предикат $W(X, Y)$, равный 1 тогда и только тогда, когда $X \supseteq Y$. Функцию $f(x)$ построим следующим образом: $f(x) = T_x$. Заметим, $T_x \neq \emptyset$, так как для любого x из M $E(x, x) = 1$, т. е. $x \in T_x$. Пусть $E(x, y) = 1$. Тогда $T_x \supseteq T_y$, так как если $z \in T_y$ (т. е. $E(y, z) = 1$), то в силу транзитивности предиката E , $E(x, z) = 1$, а значит, $z \in T_x$. Следова-

тельно, в этом случае $W(f(x), f(y)) = 1$. Пусть теперь $E(x, y) = 0$. Тогда $y \notin T_x$. Но, в силу рефлексивности, $y \in T_y$. Значит, $T_y \subset T_x$, т. е. $W(f(x), f(y)) = 0$. Теорема доказана.

Эту теорему можно получить из более общих соображений. Докажем теорему об общем виде класса транзитивных предикатов.

Теорема 2. Пусть $E(x, y)$ — транзитивный предикат, определенный на декартовом квадрате множества M . Тогда существует такое множество N функции $f_1: M \rightarrow N_1$, $f_2: M \rightarrow N_2$ ($N_1, N_2 \subseteq N$) и предикат нестрогого порядка W на множестве N , что для любых x, y из M

$$E(x, y) = W(f_1(x), f_2(y)) \wedge W(f_2(y), f_1(y)). \quad (2)$$

Обратно, любой предикат $E(x, y)$, который можно представить в виде (2), является транзитивным предикатом.

Доказательство. Докажем сначала вторую часть теоремы. Пусть $E(x, y)$ представлен в виде (2), $E(x, y) = 1$, $E(y, z) = 1$. Тогда $W(f_1(x), f_2(y)) = 1$, $W(f_2(y), f_1(y)) = 1$, $W(f_1(y), f_2(z)) = 1$, $W(f_2(z), f_1(z)) = 1$. Отсюда следует, что $W(f_1(x), f_2(z)) = 1$ (в силу транзитивности предиката E) и $W(f_2(z), f_1(z)) = 1$. Значит, $E(x, z) = W(f_1(x), f_2(z)) \wedge W(f_2(z), f_1(z)) = 1$. Мы показали, что предикат E , представленный в виде (2), всегда транзитивен.

Докажем первую часть теоремы. В качестве множества N возьмем множество всех подмножеств множества M . Предикат W определим точно так же, как и в доказательстве теоремы 1. Пусть $T_x = \{y \mid E(x, y) = 1\}$, $P_y = T_y \cup \{y\}$. Тогда в качестве N_1 возьмем множество всех P_y . Построим функции f_1 и f_2 следующим образом: $f_1(x) = T_x$, $f_2(y) = P_y$. Пусть $E(x, y) = 1$. Отсюда следует, что $y \in T_x$. Покажем, что $T_y \subseteq T_x$. Действительно, пусть $z \in T_y$. Это означает, что $E(y, z) = 1$. В силу транзитивности получаем $E(x, z) = 1$, т. е. $z \in T_x$. Значит, $T_y \subseteq T_x$. Но тогда $T_y \cup \{y\} = P_y \subseteq T_x$, откуда $W(f_1(x), f_2(y)) = 1$. Из построения функций f_1 и f_2 непосредственно вытекает, что $W(f_2(y), f_1(y)) = 1$. Следовательно, в этом случае $W(f_1(x), f_2(y)) \wedge W(f_2(y), f_1(y)) = 1$. Пусть теперь $E(x, y) = 0$. Тогда $y \notin T_x$, значит, $P_y \subset T_x$, откуда $W(f_1(x), f_2(y)) \wedge W(f_2(y), f_1(y)) = 0$. Теорема доказана.

Покажем, как из общего вида (2) класса транзитивных предикатов можно получить общий вид (1) класса предикатов квазипорядка. Рассмотрим выражение $E(x, x) = W(f_1(x), f_2(x)) \wedge W(f_2(x), f_1(x))$. Если E — предикат квазипорядка, то он обладает свойством рефлексивности, следовательно, для любого x : $W(f_1(x), f_2(x)) \wedge W(f_2(x), f_1(x)) = 1$. В силу антисимметричности предиката W , для любого x $f_1(x) = f_2(x)$, следовательно, $f_1 = f_2$. Тогда $W(f_2(y), f_1(y)) = 1$ и мы получаем представление (1).

Докажем теорему об общем виде класса предикатов, удовлетворяющих условиям:

$$\forall x \forall y \forall z (E(x, y) \wedge E(y, x) \wedge E(y, z) \Rightarrow E(x, z)), \quad (3)$$

$$\forall x \forall y \forall z (E(x, y) \wedge E(y, z) \wedge E(z, y) \Rightarrow E(x, z)) \quad (4)$$

и условию рефлексивности.

Теорема 3. Пусть $E(x, y)$ — предикат, удовлетворяющий условию рефлексивности и условиям (3), (4), определенный на декартовом квадрате множества M . Тогда существует такое множество N , функция $f: M \rightarrow N$ и предикат W^* , удовлетворяющий условиям рефлексивности и антисимметричности, определенный на декартовом квадрате множества N , что для любых x, y из M

$$E(x, y) = W^*(f(x), f(y)). \quad (5)$$

Обратно, любой предикат $E(x, y)$, который можно представить в виде (5), удовлетворяет условию рефлексивности и условиям (3), (4).

Доказательство. Докажем сначала вторую часть теоремы. Пусть предикат $E(x, y)$ представлен в виде (5), x, y, z таковы, что $E(x, y) \wedge E(y, x) \wedge E(y, z) = 1$. Тогда, в силу представления (5), $W^*(f(x), f(y)) = W^*(f(y), f(x)) = W^*(f(y), f(z)) = 1$. В силу антисимметричности предиката W^* , можно утверждать, что $f(x) = f(y)$, откуда $W^*(f(x), f(z)) = 1$. Отсюда, в силу представления (5) следует, что $E(x, z) = 1$. Свойство (3) доказано. Пусть x, y, z таковы, что $E(x, y) \wedge E(y, z) \wedge E(z, y) = 1$. Тогда $W^*(f(x), f(y)) = W^*(f(y), f(z)) = W^*(f(z), f(y)) = 1$. В силу антисимметричности предиката W^* $f(y) = f(z)$, откуда $W^*(f(x), f(z)) = 1$. Следовательно, $E(x, z) = 1$. Свойство (4) доказано. Рефлексивность предиката E вытекает из рефлексивности предиката W^* .

Докажем первую часть теоремы. Пусть предикат E рефлексивен и удовлетворяет условиям (3) и (4). Введем на множестве M отношение τ следующим образом $x\tau y \leftrightarrow E(x, y) \wedge E(y, x) = 1$. Покажем, что τ — отношение эквивалентности. Действительно, для любого x верно $x\tau x$, ибо $E(x, x) = 1$ в силу рефлексивности предиката E . Значит, отношение τ рефлексивно. Пусть $x\tau y$, тогда по определению $E(x, y) = 1, E(y, x) = 1$. Не тогда, очевидно, $y\tau x$. Пусть $x\tau y, y\tau z$. Тогда, в силу (3), $x\tau z$. Мы показали симметричность и транзитивность отношения τ . Так как τ — отношение эквивалентности, оно индуцирует на множестве M разбиение на попарно непересекающиеся классы эквивалентности.

В качестве множества N возьмем множество классов эквивалентности (фактор-множество), в качестве функции $f: M \rightarrow N$ — функцию, ставящую в соответствие любому элементу множества M класс эквивалентности, содержащий его. Предикат W^* определим так:

$$W^*(F_1, F_2) = 1 \leftrightarrow \forall x \in F_1, \forall y \in F_2 E(x, y) = 1,$$

где F_1, F_2 — некоторые элементы фактор-множества. Рефлексивность предиката W^* следует из определения отношения эквивалентности. Действительно, x и y принадлежат одному классу эквивалентности F тогда и только тогда, когда $E(x, y) \wedge E(y, x) = 1$, следовательно, для любого $x \in F$ и любого $y \in F$ $E(x, y) = 1$, каков бы ни был класс F . Значит, для любого класса F $FW^*(F, F) = 1$.

Покажем, что предикат W^* антисимметричен. Пусть $W^*(F_1, F_2) \wedge W^*(F_2, F_1) = 1$. По определению получаем

$$\forall x \in F_1, \forall y \in F_2 \quad E(x, y) \wedge E(y, x) = 1,$$

откуда следует, что $\forall x \in F_1, y \in F_2$ $x \sim y$. Это означает, что $F_1 = F_2$. Антисимметричность предиката W^* доказана. Остается показать, что справедливо представление (5). Пусть $E(x, y) = 1$. Тогда $f(x)$ — класс эквивалентности, содержащий x , $f(y)$ — класс эквивалентности, содержащий y . Покажем, что для любого $x_1 \in f(x)$ и любого $y_1 \in f(y)$ $E(x_1, y_1) = 1$. Пусть $x_1 \in f(x)$. Это значит, что $E(x_1, x) \wedge E(x, x_1) = 1$. Учитывая, что $E(x, y) = 1$, получаем в силу (3) $E(x_1, y) = 1$. Из $y_1 \in f(y)$ следует, что $E(y, y_1) \wedge E(y_1, y) = 1$. Учитывая, что $E(x_1, y) = 1$, получаем в силу (4) $E(x_1, y_1) = 1$. Из сказанного выше и определения предиката W^* следует, что $W^*(f(x), f(y)) = 1$. Пусть теперь $E(x, y) = 0$. Тогда непосредственно из определения предиката W^* следует, что $W^*(f(x), f(y)) = 0$. Теорема доказана.

Для одного и того же предиката $E(x, y)$ возможны, вообще говоря, различные представления типа (5).

Теорема 4. Пусть рефлексивный предикат $E(x, y)$, удовлетворяющий условиям (3), (4), допускает представление (5) двумя способами:

$$E(x, y) = W^*(f(x), f(y)), \quad (6)$$

$$E(x, y) = W^{**}(f'(x), f'(x), f'(y)), \quad (7)$$

где $f: M \rightarrow N$, $f': M \rightarrow N'$, W^* и W^{**} — рефлексивные и антисимметричные предикаты на множествах N и N' соответственно. Тогда предикаты W^* и W^{**} изоморфны [1].

Доказательство. Для доказательства изоморфизма покажем существование такой взаимно однозначной функции $\varphi: N \rightarrow N'$, что $f'(x) = \varphi f(x)$. Рассмотрим множество пар вида $(f(x), f'(x))$. Получим некоторое отношение φ . Покажем, что если $f(x_1) = f(x_2)$, то $f'(x_1) = f'(x_2)$. Действительно, если $f(x_1) = f(x_2)$, то $W^*(f(x_1), f(x_2)) = 1$ в силу рефлексивности, откуда в силу (6) $E(x_1, x_2) = 1$. В силу (7) $W^{**}(f'(x_1), f'(x_2)) = 1$. Но также, очевидно, имеем $f(x_2) = f(x_1)$, $W^{**}(f'(x_2), f'(x_1)) = 1$ и $E(x_2, x_1) = 1$. В силу (7) получаем $W^{**}(f'(x_2), f'(x_1)) = 1$. Так как W^{**} — антисимметричный предикат, то $f'(x_1) = f'(x_2)$. Мы показали, что отношение φ является отображением. Когда x пробегает все множество M , $f'(x)$ пробегает все множество N' . Следовательно, отображение φ сюръектив-

но. Покажем, что φ также инъективно. Для этого достаточно показать, что если $f'(x_1) = f'(x_2)$, то $f(x_1) = f(x_2)$. Действительно, из $f'(x_1) = f'(x_2)$, в силу (7) следует, что $E(x_1, x_2) = E(x_2, x_1) = 1$, откуда $W^*(f(x_1), f(x_2)) = W^*(f(x_2), f(x_1)) = 1$. В силу антисимметричности предиката W^* имеем $f(x_1) = f(x_2)$. Инъективность отображения φ доказана. Из сказанного выше вытекает, что φ является взаимно однозначным отображением. Теорема доказана.

Из теорем 3 и 4 следует, что любой рефлексивный предикат, удовлетворяющий условиям (3), (4), с точностью до изоморфизма можно представить в виде (5). Заметим, что класс предикатов квазипорядка является частью класса рефлексивных предикатов, удовлетворяющих условиям (3), (4), так как эти условия транзитивности. Это видно также из представлений (1) и (5) (предикат нестрогого порядка всегда рефлексивен и антисимметричен). Следовательно, любой предикат квазипорядка с точностью до изоморфизма можно представить в виде (1).

Рассмотрим теперь одну интересную интерпретацию теорем 3 и 4. В представлении (5) фигурирует некоторая функция $f: M \rightarrow N$. Эта функция естественным образом индуцирует на множестве M отношение эквивалентности r , причем для любых x и y из $M: xry \leftrightarrow f(x) = f(y)$. Такую эквивалентность в литературе называют ядерной эквивалентностью [2]. Отношение r определяет на множестве M разбиение на попарно непересекающиеся непустые классы эквивалентности. Тогда функцию f можно интерпретировать как функцию, ставящую в соответствие каждому элементу множества M класс эквивалентности, его содержащий. Предикат $E(x, y)$ определяет некоторое отношение e на множестве M , причем $xey \leftrightarrow E(x; y) = 1$. Предикат $W^*(f(x), f(y))$ определяет на множестве классов эквивалентности (фактор-множестве) также некоторое отношение ω . Тогда (теорема 3)

$$xey \leftrightarrow f(x) \omega f(y), \quad (8)$$

где $f(x)$ и $f(y)$ — классы, содержащие x и y соответственно. Из теоремы 4 следует, что если предикат $E(x, y)$ удовлетворяет условиям рефлексивности (3) и (4), то существует единственное фактор-множество F и единственное рефлексивное и антисимметричное отношение ω такие, что верно (8). Это видно из того, что, в соответствии с теоремой 4, любые две функции f и f' , фигурирующие в представлении одного и того же предиката $E(x, y)$, отличаются лишь взаимнооднозначной функцией η , следовательно, не влияют на фактор-множество.

Введем понятие предиката линейного упорядочения. Предикатом *линейного упорядочения* назовем любой предикат нестрогого порядка $E(x, y)$, удовлетворяющий условию $E(x, y) \vee \vee E(y, x) = 1$ (9) для любых x, y из M . Если предикат нестрогого порядка W , фигурирующий в теореме 1, удовлетворяет условию (9), то и предикат $E(x, y)$ в представлении (1) также удовлетворяет этому условию, и наоборот, если предикат $E(x, y)$

удовлетворяет (9), то и W удовлетворяет (9). Отсюда следует, что любой предикат квазипорядка, удовлетворяющий (9), можно представить в виде (1), где W — предикат линейного упорядочения, и наоборот, если W — предикат линейного упорядочения, то предикат $E(x, y)$, фигурирующий в (1), является предикатом квазипорядка и удовлетворяет условию (9). Очевидно, и в этом случае представление (1) будет единственным с точностью до изоморфизма. Докажем теорему, в некотором смысле обобщающую полученный выше результат.

Теорема 5. Пусть предикат $E(x, y)$, заданный на декартовом квадрате множества M , удовлетворяет условию

$$\forall x \forall y \forall x_1 \forall y_1 (E(x, y_1) \wedge \overline{E}(x_1, y_1) \wedge E(x_1, y) \Rightarrow E(x, y)). \quad (10)$$

Тогда его можно представить в виде

$$E(x, y) = L(f_1(x), f_2(y)), \quad (11)$$

где $f_1: M \rightarrow N_1$, $f_2: M \rightarrow N_2$; $N_1, N_2 \subseteq N$, N — некоторое множество, L — предикат линейного упорядочения на этом множестве. Наоборот, любой предикат $E(x, y)$, допускающий представление (11), удовлетворяет (10).

Доказательство. Докажем первую часть теоремы. Пусть предикат $E(x, y)$ удовлетворяет (10). Введем в рассмотрение множества

$$T_x = \{y | E(x, y) = 1\}; \quad K_y = \{x | E(x, y) = 1\}.$$

Покажем, что если $y \in T_x$, $y_1 \in \overline{T_x}$, то $K_y \subseteq K_{y_1}$. Действительно, пусть $y \in T_x$. Это значит, что $E(x, y) = 1$. Пусть $y_1 \in \overline{T_x}$. Это значит, что $E(x, y_1) = 0$. Пусть $x_1 \in K_{y_1}$, т. е. $E(x_1, y_1) = 1$. Тогда, в силу (10) $E(x_1, y) = 1$, т. е. $x_1 \in K_y$. Включение множеств $K_y \subseteq K_{y_1}$ доказано. Рассмотрим произвольный элемент x из M . Если T_x не пусто, то для каждого y из T_x построим множество K_y и рассмотрим пересечение P_x всех таких множеств. Мы обозначили это пересечение через P_x потому, что оно однозначно определяется элементом x . Если же $T_x = \emptyset$, то положим $P_x = M$.

В качестве множества N возьмем множество всех P_x , объединенное с множеством всех K_y . Предикат $L(X, Y)$ на множестве N определим следующим образом: $L(X, Y) = 1$ тогда и только тогда, когда $X \subseteq Y$. Покажем, что предикат $L(X, Y)$ является предикатом линейного упорядочения. Очевидно, предикат L удовлетворяет аксиомам нестрогого порядка. Остается показать, что он удовлетворяет (9). Для этого достаточно показать, что из $L(X, Y) = 0$ следует $L(Y, X) = 1$. Действительно, пусть $L(X, Y) = 0$ ($X, Y \in N$). Возможны следующие варианты: 1) существуют x и y такие, что $X = P_x$, $Y = K_y$. Тогда $P_x \subsetneq K_y$. Это значит, что существует такой элемент $x_1 \in P_x$, что $x_1 \in \overline{K_y}$. Следовательно, $y \notin T_{x_1}$. Для любого $y_1 \in T_{x_1}$ верно $y_1 \in T_{x_1}$. В силу доказанного ранее $K_y \subseteq K_{y_1}$ (для любого $y_1 \in T_{x_1}$). Это

означает, что $K_y \subseteq P_x$, т. е. $L(Y, X) = 1$; 2) существуют x и y такие, что $X = K_y, Y = P_x$. Тогда $K_y \subseteq P_x$. Тогда, очевидно, $P_x \subseteq K_y$, ибо в противном случае, согласно 1), $K_y \subseteq P_x$; 3) существуют y_1 и y_2 такие, что $X = K_{y_1}, Y = K_{y_2}$. Тогда $K_{y_1} \subseteq K_{y_2}$. Это значит, что существует такой элемент $x \in K_{y_1}$, что $x \notin K_{y_2}$, откуда $y_1 \in T_x, y_2 \notin T_x$. Из доказанного ранее следует $K_{y_2} \subseteq K_{y_1}$, значит, $L(Y, X) = 1$; 4) существуют x_1 и x_2 такие, что $X = P_{x_1}, Y = P_{x_2}$. Тогда $P_{x_1} \subseteq P_{x_2}$. Это означает, что существует такой элемент x_3 , что $x_3 \in P_{x_2}, x_3 \notin P_{x_1}$. Из $x_3 \in P_{x_1}$ следует, что для любого $y \in T_{x_1}$ верно $x_3 \in K_y$, откуда для любого $y \in T_{x_1}$ верно $y \in T_{x_3}$. Из $x_3 \notin P_{x_2}$ следует, что существует $y_1 \in T_{x_2}$ такой, что $x_3 \notin K_{y_1}$, откуда $y_1 \notin T_{x_3}$. Значит, $K_{y_1} \subseteq K_y$ для любого y из T_{x_1} . Но $P_{x_2} \subseteq K_{y_1}$, значит, $P_{x_2} \subseteq K_y$ для любого $y \in T_{x_1}$. Следовательно, $P_{x_2} \subseteq P_{x_1}$, откуда $L(Y, X) = 1$. В приведенных выше рассуждениях предполагалось, что T_x не пусто. В том случае, когда $T_x = \emptyset, P_x = M$ и, очевидно, доказываемое условие выполняется.

Итак, мы ввели множество N и построили на нём предикат L линейного упорядочения. В качестве множества N_1 и N_2 , фигурирующих в условии теоремы, возьмем соответственно множество всех P_x и множество всех P_y . Очевидно, $N_1 \subseteq N, N_2 \subseteq N$. Построим функции f_1 и f_2 :

$$f_1(x) = P_x, \quad f_2(y) = K_y.$$

Покажем, что справедливо представление (11). Действительно, пусть $E(x, y) = 1$. Тогда $y \in T_x$ и, следовательно, $P_x \subseteq K_y$ (так как P_x представляет собой пересечение множеств, одним из которых является K_y). Значит, в этом случае $L(f_1(x), f_2(y)) = 1$. Пусть теперь $E(x, y) = 0$. Тогда возможны два случая: 1) $T_x = \emptyset$. Значит, $P_x = M$, откуда $P_x \subseteq K_y$, так как в противном случае $E(x, y) = 1$; 2) $T_x = \emptyset$. Тогда $x \in P_x, x \notin K_y$. Следовательно, и в этом случае $P_x \subseteq K_y$. Мы показали, что из $E(x, y) = 0$ следует $L(f_1(x), f_2(y)) = 0$.

Докажем вторую часть теоремы. Пусть $E(x, y)$ представлено в виде (11). Пусть $E(x, y_1) = 1, E(x_1, y_1) = 0, E(x_1, y) = 1$. Тогда $L(f_1(x), f_2(y_1)) = 1, L(f_1(x_1), f_2(y_1)) = 0, L(f_1(x_1), f_2(y)) = 1$. В силу свойства (9) предиката линейного упорядочения L верно $L(f_2(y_1), f_1(x_1)) = 1$. В силу транзитивности предиката L верно $L(f_1(x), f_2(y)) = 1$, откуда, согласно (11), $E(x, y) = 1$. Свойство (10) предиката $E(x, y)$ доказано. Теорема доказана.

Следующая теорема показывает, что любой бинарный предикат $E(x, y)$ так или иначе связан с предикатом нестрогого порядка.

Теорема 6. Для любого бинарного предиката $E(x, y)$ найдется множество N , множества $N_1, N_2 \subseteq N$, функции $f_1: M \rightarrow N_1$, $f_2: M \rightarrow N_2$ и предикат нестрогого порядка W на множестве N такие, что

$$E(x, y) = W(f_1(x), f_2(y)). \quad (12)$$

Доказательство. В качестве множества N , множеств N_1, N_2 и функций f_1 и f_2 возьмем те же множества и те же функции, что и в доказательстве теоремы 5. В качестве предиката $W(X, Y)$ возьмем предикат, равный единице тогда и только тогда, когда $X \subseteq Y$. Возможность представления (12) доказывается так же, как и возможность представления (11) (см. доказательство теоремы 5). Теорема доказана.

Список литературы: 1. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. Теория интеллекта. Проблемы и перспективы. Х., 1987. 160 с. 2. Мальцев А. И. Алгебраические системы. М., 1970. 392 с.

Поступила в редколлегию 17.03.87

УДК 681.32:510.62

Н. Б. ВОРОНЦОВ, Л. И. МЕЛЬНИКОВА

РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ПРЕДИКАТНЫХ УРАВНЕНИЙ МЕТОДАМИ ПОЛНОГО ПЕРЕБОРА И ИСКЛЮЧЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ

Пусть x_1, x_2, \dots, x_m — переменные (характеристики исследуемого объекта), принимающие значения соответственно из множеств A_1, A_2, \dots, A_m , где $A_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ik_i}\} | i = 1, 2, \dots, m$.

Определение 1*. Конечным предикатом f называется отображение $f: A_1 \times A_2 \times \dots \times A_m \rightarrow \{0, 1\}$ декартового произведения множеств A_1, A_2, \dots, A_m в двухэлементное множество $\{0, 1\}$.

Определение 2. Предикатным уравнением называется соотношение

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_m) = f_2(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (1)$$

где f_1, f_2 — конечные предикаты.

Определение 3. Каноническим предикатным уравнением (КПУ) называется предикатное уравнение вида

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m) = 1. \quad (2)$$

Очевидно, что произвольное предикатное уравнение вида (1) легко преобразуется в эквивалентное ему каноническое уравнение

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_m) \sim f_2(x_1, x_2, \dots, x_m) = 1. \quad (3)$$

* Все определения настоящей работы базируются на работах [1, 2].

лельных ветвей при времени вычисления E_ω (ширина вычислительного процесса).

Другие полезные характеристики являются производными приведенных выше:

$$S_\omega = \frac{E_1}{E_\omega} \quad (8); \quad U_\omega = \frac{E_1}{W_\omega E_\omega} = \frac{S_\omega}{W_\omega} \quad (9),$$

где S_ω — ускорение вычислений при W_ω параллельных ветвях по сравнению с последовательным вычислением; U_ω — плотность вычислений в W_ω ветвях. U_ω характеризует возможную эффективность использования W_ω параллельных процессов для реализации вычислений в параллельных ветвях. Очевидно, что $U_1 = 1$, а $U_\omega \leq 1$ при $\omega > 1$.

Перейдем к анализу эффективности распараллеливания метода полного перебора [3], который состоит в переборе всех возможных наборов значений переменных x_1, x_2, \dots, x_m из $A_1 \times A_2 \times \dots \times A_m$ и вычислении на каждом из наборов (a_1, a_2, \dots, a_m) значения КПУ (2). Другими словами, вычисление строится непосредственно в соответствии с определением 6.

Достоинством метода полного перебора является возможность максимально параллельного отыскания решения КПУ, так как число параллельных процессов, которые могут быть запущены, определяется как

$$W_\omega^{(1)} = |A_1 \times A_2 \times \dots \times A_m| = k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_m. \quad (10)$$

При этом время $E_\omega^{(1)}$ вычисления в каждой из $W_\omega^{(1)}$ параллельных ветвей равно времени вычисления значения предиката f на одном наборе и одинаково во всех параллельных ветвях. Следовательно, $S_\omega^{(1)} = W_\omega^{(1)}$ и $U_\omega^{(1)} = 1$, так как $E_1^{(1)}$ может быть определено как $E_1^{(1)} = W_\omega^{(1)} E_\omega^{(1)}$.

Основным недостатком метода полного перебора является экспоненциальный рост объема вычислений с ростом числа переменных, так как

$$E_1^{(1)} = l^m E_\omega^{(1)} \quad (11)$$

при $k_1 = k_2 = \dots = k_m = l$.

Таким образом, метод полного перебора характеризуется, с одной стороны, очень хорошим распараллеливанием, а с другой — очень большим объемом вычислений. Последнее обуславливает ограничения на его практическую применимость.

Метод исключения переменных, рассматриваемый ниже, применяется для решения СПУ, заданных в формульном виде, и является обобщением эвристического метода из работы [5]. Основная идея метода исключения переменных состоит в определении множества возможных значений каждой переменной в корнях СПУ и затем в подстановке каждого из возможных значений переменной в другие уравнения СПУ с целью определения, является ли данное значение допустимым. Если ни

одно из уравнений СПУ не обращается в противоречие $0=1$, то значение допустимо, и полученная после подстановки СПУ уже не содержит данной переменной. Далее определяется множество возможных значений другой переменной, выполняется подстановка этих значений и т. д. Определение множества возможных значений осуществляется либо исходя из структуры уравнений СПУ, либо исходя из области определения значений переменной.

Таким образом, характерной особенностью метода исключения переменных является образование в процессе вычисления совокупности СПУ Q и осуществление процессов удаления СПУ из Q и добавление новых СПУ в Q , что создает хорошие предпосылки для распараллеливания процесса вычислений на уровне отдельных СПУ из Q .

При описании метода исключения переменных множество Q обозначает текущую совокупность систем предикатных уравнений, D — решение исходной СПУ. С каждой системой S из Q в процессе вычисления связывается текущее (промежуточное) значение ее корня (корней), которое задается множеством вида

$$r = \{(x, a), (y, b), \dots\}, \quad (12)$$

где x, y, \dots — различные переменные системы S ; a, b, \dots , — значения переменных из области определения.

Если корень r вида (12) определяет окончательное значение корня (корней) системы S и некоторая переменная x_i не входит ни в одну из пар $(x, a), (y, b), \dots$, то, следовательно она может принимать любые значения из области ее определения и r определяет соответствующее множество корней.

Для достаточно строгого описания метода используется операция присваивания значений множествам. Например, $D := \emptyset$ — множеству D присвоить значение пустого множества; $Q := Q \cup Q'$ — множеству Q присвоить значение, равное объединению его прежнего значения с некоторым множеством Q' .

Нахождение решения по методу исключения переменных осуществляется в результате выполнения следующих шагов

Шаг 1. $Q := \{(S, r)\}$, $D := \emptyset$, где S — исходная СПУ, $r = \emptyset$ D — решение S .

Шаг 2. Если $Q = \emptyset$, процесс вычисления окончен и D содержит решение исходной СПУ. В противном случае перейти к шагу 3.

Шаг 3. Из Q выбирается любая пара (S, r) и $Q := Q \setminus \{(S, r)\}$. Каждое уравнение СПУ S редуцируется путем применения тождеств:

$$\begin{aligned} A \vee AB &\equiv A; A \vee A \equiv A; AA = A; A \vee 0 \equiv A; A \cdot 0 \equiv 0; \\ A \vee 1 &\equiv 1; A \cdot 1 \equiv A; (A \vee B)C \equiv AC \vee BC; (A \vee C)(B \vee C) \equiv \\ &\equiv AB \vee C, \end{aligned} \quad (13)$$

причем каждое из уравнений, превратившееся в тавтологию $1=1$, исключается из S . В результате получается система S' . Если все уравнения системы S превратились в тавтологии (S' не содержит уравнений), то найден корень r , $D:=D \cup \{r\}$ и нужно перейти к шагу 2. Если какое-либо уравнение превратится в противоречие $0=1$, то, значит, система S не имеет корней и следует перейти к шагу 2. В противном случае — перейти к шагу 4.

Шаг 4. Среди уравнений СПУ S' ищется уравнение, имеющее вид

$$F \vee (x^{\circ 1} \vee x^{\circ 2} \vee \dots \vee x^{\circ k}) = 1, \quad (14)$$

где F — произвольная формула (логическое выражение), x — одна из переменных системы S' , а $x^{\circ 1}, \dots, x^{\circ k}$ — узнавания. Заметим, что в случае алгебры логики $k \leq 2$, $x = x^1$ и $\bar{x} = x^0$.

Если среди уравнений S' не имеется уравнений вида (14), то следует перейти к шагу 5.

Если же среди уравнений S' имеется уравнение вида (14), то из S' формируется система S'' путем замены найденного уравнения вида (14) на уравнение $F=1$ (15).

Далее к Q добавляются k новых пар:

$$Q := Q \cup \{(S_1, r_1), (S_2, r_2), \dots, (S_k, r_k)\}, \quad (16)$$

где S_i образуется в результате подстановки значения переменной $x = \sigma_i$ во все уравнения системы S'' , а $r_i = r \cup \{(x, \sigma_i)\}$, $i = 1, 2, \dots, k$. Перейти к шагу 3.

Шаг 5. Пусть в S' имеется переменная x , принимающая значения из множества определения $A = \{a_1, a_2, \dots, a_l\}$. Тогда к Q добавляется l новых пар:

$$Q := Q \cup \{(S_1, r_1), (S_2, r_2), \dots, (S_l, r_l)\}, \quad (17)$$

где S_i образуется из S' в результате подстановки значения $x = a_i$ во все уравнения S' , а $r_i = r \cup \{(x, a_i)\}$. Перейти к шагу 3.

Достоинством метода исключения переменных является существенно меньший объем вычислений, чем в методе полного перебора. Действительно, основной трудоемкий процесс состоит в редуцировании заданной системы S уравнений (см. шаг 3). Предположим, что этот процесс требует E_m операций, хотя, очевидно, шаг 3 будет требовать тем меньше действий, чем меньше переменных и уравнений в редуцируемой системе.

Предположим, что исходная СПУ содержит m переменных, и их области определения содержат по l элементов. На шаге 4 или 5 происходит исключение одной из переменных системы и добавление новых пар (S, r) в множество Q . Очевидно, что в процессе построения каждого r вплоть до получения корня общее число выполнения шагов 4 и 5 не более m . Это число будет меньше m , если решение D будет содержать корни r , в которых заданы значения не всех переменных.

На шаге 3 происходит редукция систем, полученных на четвертом и пятом шагах метода. В результате редукции может быть обнаружено, что некоторые пары (S, r) не имеют корня (получено противоречие $0=1$). Предположим, что число систем, не имеющих корней из общего числа k , добавленных к Q на шаге 4, или числа l , добавленных к Q на шаге 5, определяется коэффициентом редукции $q \leq 1$, который определяет отношение числа систем, имеющих корень, к их общему числу k или l .

Рассмотрим два варианта:

1) за время вычисления решения D ни разу не выполняется шаг 5, а на шаге 4 число добавляемых пар (S, r) равно $k = \lfloor l/2 \rfloor$;

2) за время вычисления решения D $m' = \lfloor m/2 \rfloor$ переменных исключаются на четвертом шаге и число добавляемых пар равно $k = \lfloor l/2 \rfloor$, а остальные, т. е. $m'' = m - m'$, переменные исключаются на пятом шаге.

В первом варианте объем вычислений $E_1^{(2)}$ можно оценить как

$$E_1^{(2)} \approx E_m k^m q^{m-1}, \quad (18)$$

а во втором

$$E_1^{(2)} \approx E_m k^{m'} l^{m''} q^{m-1}, \quad (19)$$

где $m'' = m - m'$.

По сравнению с методом полного перебора имеем соответственно (см. формулу (11))

$$\frac{E_1^{(1)}}{E_1^{(2)}} = \frac{l^m E_\omega^{(1)}}{q^{m-1} k^m E_m} \approx 2^m q^{1-m} (E_\omega^{(1)} / E_m); \quad (20)$$

$$\frac{E_1^{(1)}}{E_1^{(3)}} = \frac{l^m E_\omega^{(1)}}{q^{m-1} k^{m'} l^{m''} E_m} \approx 2^{\lfloor m/2 \rfloor} q^{1-m} (E_\omega^{(1)} / E_m). \quad (21)$$

Таким образом, если предположить, что отношение $E_\omega^{(1)} / E_m$ не слишком мало, то выигрыш от применения метода исключения переменных по сравнению с методом полного перебора может оказаться очень существенным даже при q , близком к единице, при малых значениях q выигрыш существенно возрастает. В целом объем вычислений для первого варианта уменьшается примерно в $2^m q^{1-m}$ раз, а для второго — примерно в $2^{\lfloor m/2 \rfloor} q^{1-m}$ раз.

Метод исключения переменных позволяет применить распараллеливание вычислений, так как каждая пара (S, r) из множества Q может обрабатываться независимо от остальных пар. Как для первого, так и для второго варианта объем вычислений $E_\omega^{(2)}$ в наиболее длинной параллельной ветви при максимальном распараллеливании можно оценить как $E_\omega^{(2)} = m E_m$ (22).

В формуле (22) не учитываются затраты времени на шаги 4 и 5 метода.

Ускорения $S_{\omega}^{(2)}$ и $S_{\omega}^{(3)}$ соответственно для первого и второго вариантов оцениваются как

$$S_{\omega}^{(2)} = E_1^{(2)} / E_{\omega}^{(2)} = k^m q^{m-1} / m; \quad (23)$$

$$S_{\omega}^{(3)} = E_1^{(3)} / E_{\omega}^{(2)} = k^m l^{m'} q^{m-1} / m. \quad (24)$$

Итак, из формул (23) и (24) видно, что возможно достижение достаточно высоких значений ускорения вычислительного процесса, хотя в начальный момент вычислений он и будет сдерживаться древовидным характером развертывания процесса вычислений, так как в начальный момент имеется только одна СПУ в Q , на следующем шаге — k систем (вариант 1), далее — примерно k^2 и т. д.

Существенным недостатком метода исключения переменных с точки зрения распараллеливания является необходимость при создании каждого нового параллельного процесса передачи всей системы предикатных уравнений, определяемой соответствующей парой (S, r) из множества Q . Такой большой объем передач может сильно ограничить достижение больших значений ширины параллельного процесса.

Список литературы: 1. Закревский А. Д. Симметричные нормальные формы конечных предикатов//Докл. АН БССР. 1987. 31, № 5. С. 427—429. 2. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. Теория интеллекта. Математические средства. Х., 1984. 144 с. 3. Закревский А. Д. Логические уравнения. Минск, 1975. 96 с. 4. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. Теория интеллекта. Технические средства. Х., 1986. 136 с. 5. Котляров С. О. Эвристический алгоритм решения логических уравнений//Пробл. бионики. 1984. Вып. 32. С. 35—39.

Поступила в редколлегию 24.12.87

УДК 519.68

В. М. БОНДАРЕВ, В. И. РУБЛИНЕЦКИЙ, В. Л. СИГАЛОВ

ПРОГРАММА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКСТОВ

Постановка задачи. Автоматическая классификация текстов по темам — полезная прикладная задача инженерной лингвистики. Эта задача достаточно хорошо изучена [1—3] и обычно решается на основе распределения ключевых слов, подбираемых разными авторами по разным критериям. Описываемая ниже программа автоматической классификации текстов (ПАКТ) разработана в целом в рамках известных подходов. Однако известные подходы были модифицированы и дополнены с целью обеспечить независимость от языка (допускаются тексты на одном, но любом языке при условиях, что возможно разделить тексты и слова в них, причем тексты записаны в алфа-

витно-числовых символах — для определенности в символах кода ДКОИ); способность к обучению на сравнительно малых наборах текстов с возможностью дальнейшего дообучения; способность классифицировать тексты малого объема (50—150 слов); способность классифицировать тексты быстро (не медленнее, чем они передаются по телетайпу) даже на медленных машинах, типа ЕС-1020.

Задача ставится следующим образом. Пусть дано множество текстов $\{\tau_i\}$; человек-классификатор разделяет их по смыслу на темы — подмножества $T_i, i \in I = \{1, 2, \dots, t\}$. Подмножества являются типичным примером нечетких множеств [4]. Автоматический классификатор (АК) может разделить множество $\{\tau\}$ на обычные «четкие» множества; естественно, нужно считать, что АК работает хорошо, если результат его классификации — множества S_i — хорошо совпадает с T_i . Критерий совпадения, однако, нечеток, ибо нечетки множества T_i — разделение на них, по крайней мере, в граничных точках, субъективно и неустойчиво даже для одного субъекта. Чтобы оценить работу АК, был использован следующий прием: выбирался, по возможности, компетентный человек-классификатор (ЧК) и ему предлагалось дать единственное, четкое разбиение $\{\tau\}$ на классы T_i ; затем АК получал формальное разбиение S_i , после чего ЧК предъявлялись все тексты, которые АК классифицировал иначе, чем ЧК. При предъявлении конкретного текста реакция ЧК была двух видов; либо «Да, так тоже можно», либо «Нет, это неверно». Решение АК, вызвавшее первую реакцию, мы назовем расхождением, а вторую — ошибкой. При разработке ПАКТ мы стремились минимизировать число ошибок.

Обсуждение метода. Эффективность метода зависит от критерия отбора ключевых слов, от выбора объема и структуры словаря V ключевых слов, от вида решающего правила классификации.

Рассмотрим сначала критерий отбора слов в словарь V . Ключевые слова должны быть достаточно частыми и достаточно хорошо отличать темы друг от друга. К сожалению, частых слов, которые бы отличали данную тему от всех остальных, почти не бывает. Более реалистично искать для каждой пары тем такие ключевые слова, чтобы они отличали одну тему пары от другой. Если потом окажется, что ключевое слово отличает несколько пар, то тем лучше — словарь V будет короче.

Чтобы вывести критерий отбора, введем обозначения: V — число ключевых слов в V ; k — номер ключевого слова в $V, k \in K \{1, 2, \dots, v\}$; n_i — число слов во всех текстах темы i (короче, в теме i), слово считается столько раз, сколько оно встретилось; n — общее число слов в текстах обучения; π_i — оценка априорной вероятности темы, $\pi_i = n_i/n$ (1); d_k — число раз, которое k -е ключевое слово встретилось во всем корпусе обучения; $d(k/i)$ — число раз, которое k -е ключевое слово

встретилось в теме i ; $p(k/i)$ — оценка условной вероятности встретить k -е ключевое слово в теме i .

$$p(k/i) = \frac{d(k/i)}{n_i}, \quad (2)$$

$p(i/k)$ — оценка условной вероятности того, что текст относится к теме i , если в нем встретилось k -е ключевое слово.

Последнюю из введенных величин получим по формуле Байеса. Именно для любой темы

$$p(i/k) = \frac{\pi_i p(k/i)}{\sum_i \pi_i p(k/i)} = \frac{d(k/i)}{\sum_i d(k/i)} = \frac{d(k/i)}{d_k}. \quad (3)$$

Второе равенство получено после подстановки π_i и $p(k/i)$ по формулам (1), (2) и сокращений.

Пусть в некотором тексте τ k -е ключевое слово встретилось r_k раз ($r_k \geq 0$). Будем считать, что вероятность встретить в τ k -е ключевое слово не зависит от наличия в τ других ключевых слов или других экземпляров k -го ключевого слова. (Это допущение, особенно во второй части, не вполне корректно, но заменить его нечем; в конечном счете правильность допущения будет подтверждена общей эффективностью классификатора). Тогда вероятность того, что $\tau \in T_i$, равна

$$\Phi(i) = \prod_k p(i/k)^{r_k} = \prod_k \frac{d(k/i)^{r_k}}{d_k^{r_k}}.$$

Переходя для удобства счета к логарифмам, имеем

$$F(i) \equiv \lg \Phi(i) = \sum_k r_k (\lg d(k/i) - \lg d_k). \quad (4)$$

По принципу максимального правдоподобия будем относить текст к той теме, для которой функция $F(i)$ максимальна.

Пусть имеются две темы i и j , $i, j \in I$, а также ψ слов-кандидатов на ключевое слово для их различения. Слово w из множества $W = \{w_1, w_2, \dots, w_\psi\}$ дает вклад в (4):

$$r_w (\lg d(w/l) - \lg d_w), \quad l = i, j$$

и различает эти темы на величину

$$\Delta_w(i, j) = r_w (\lg d(w/i) - \lg d(w/j)). \quad (5)$$

Поэтому предпочтительнее включить в словарь V такое слово w , чтобы

$$\hat{\Delta} \equiv |\Delta_w(i, j)| = \max_{w \in W} \left(r_w \left| \lg \frac{d(w/i)}{d(w/j)} \right| \right).$$

Теперь остается оценить r_w . Возможность классификации текстов основана на том, что статистика распределения ключевых

слов в отдельном тексте τ ($\tau \in T_i$) такая же, что и во всей теме i . Поэтому

$$r_w \sim \frac{d(w/i) + d(w/j)}{n_i + n_j}$$

Поскольку при отыскании Δ знаменатель не существует, получаем следующее правило отбора ключевых слов в $V(i, j)$ для той части словаря V , которая заведует различием тем i и j : слова в V отбираются в порядке убывания критерия

$$\gamma = (d(w/i) + d(w/j)) \cdot \left| \lg \frac{d(w/i)}{d(w/j)} \right|. \quad (6)$$

Числитель и знаменатель подлогарифмического выражения могут быть равны нулю. В этом случае к числителю и знаменателю добавляется по 0,5. Критерий γ хорошо зарекомендовал себя при классификации, когда $p_i \approx n_j$. При $n_i \ll n_j$ или $n_i \gg n_j$ наблюдалась тенденция отбора в V слов, характерных для «богатой» темы. Чтобы уравновесить ситуацию, мы внесли в предлогарифмический множитель предлогарифмическую поправку и получили модифицированный критерий

$$\gamma' = \left(\frac{d(w/i)}{n_i} + \frac{d(w/j)}{n_j} \right) \left| \lg \frac{d(w/i)}{d(w/j)} \right|. \quad (7)$$

Отметим, что размер словаря V не должен быть велик по двум причинам. Первая вытекает из требования быстрой классификации текстов, а вторая состоит в том, что в большой словарь неизбежно попадут достаточно редкие слова и при малом корпусе слов обучения у них будут недостоверные частоты. Опыт применения ПАКТ показал, что удачная длина парного словаря $|V(i, j)| = 50$. Полный размер словаря V получается существенно меньше, чем $50 C_i^2$, поскольку многие слова входят в несколько парных словарей. Структура словаря V следующая: это — лексикографически упорядоченный список из V слов, составляющих теоретико-множественное объединение всех парных словарей $V(i, j)$; символьной части соответствует числовая — массив из V строк и C_i^2 столбцов, где в k -й строке и (i, j) -м столбце стоит число

$$V(k; i, j) = \begin{cases} \lg d(k/i) - \lg d(k/j), & w_k \in V(i, j); \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (8)$$

Что касается решающего правила, то при наличии t тем оно состоит в вычислении некоторых параметров полного орфа K_t . При рассмотрении подлежащего классификации текста τ сравнением с символьной частью V определяются r_k , а затем — все дуги из i в j :

$$c(i, j) = \sum_{w \in V} \Delta_w(i, j) = \sum_{w \in V(i, j)} \Delta_w(i, j). \quad (9)$$

Содержательно $c(i, j)$ означает, насколько вероятность события $\tau \in T_i$ больше (или меньше, в зависимости от знака), чем событие $\tau \in T_j$. Из (5) видно, что $c(i, j) = -c(j, i)$; второе равенство верно, так как $V(k; i, j) = 0$ при $W \in V(i, j)$. Затем определяются веса вершин

$$e_i = \sum_{w \in T_i} c(i, w). \quad (10)$$

В заключение этого пункта сделаем одно замечание относительно состава словаря V . Выше мы видели, что влияние на классификацию частоты ключевого слова и его различающей силы $d(w/i)$ не равносильны: первое относится ко второму, как число к своему логарифму. Поэтому очень частые слова (предлоги, союзы и т. п.), которые не различают тем из-за неполноты статистики, имеют несколько различные $d(w/i)$, поэтому они включаются в словарь V и вносят существенную путаницу в классификацию (такие слова Р. Г. Пиотровский [1] назвал антипризнаками). Поэтому нужно заранее составить словарь антипризнаков — в этом состоит единственная настройка на язык — и не допускать их в V .

Структура алгоритмов и характеристики программы. Алгоритм состоит из двух частей: обучения (создания словаря V) и классификации. Обучение не критично ко времени, на него затрачивается около минуты (ЭВМ ЕС-1022, 80000 операций/с) на каждые 160 слов обучающего корпуса; классификация осуществляется практически «мгновенно». При обучении вводятся тексты обучения с «ответами» и формируется лексикон — список всех встречных слов без повторений — с накоплением $d(w/i)$. Затем по критерию γ (или γ') формируется словарь V , причем антипризнаки отсеиваются. Дообучение принципиально не отличается от обучения и состоит в пополнении статистики по $d(w/i)$. В ходе дообучения (реже это может случиться и в первоначальном обучении) может не хватить памяти для новых слов. Тогда новым словам позволено вытеснять заданную долю старых слов с наименьшим значением γ (или γ') хотя старые слова могут быть все же лучше новых.

Классификация ведется с использованием словаря V по формулам (9), (10).

Разумеется, в алгоритме использованы экономные процедуры сортировки, дихотомического поиска слова и т. п. На этих деталях мы останавливаться не будем.

Программа написана на ПЛ/1 и рассчитана на длину лексикона до 3640 слов, число тем $t \leq 8$. В этом виде программа требует 160К байтов памяти и стандартный набор устройств ЕС ЭВМ, включая НМД типа ЕС-5061.

Результаты тестирования программы. Программа испытывалась на англоязычных текстах, взятых из периодической печати. Был подготовлен словарь антипризнаков из 200 самых

частых служебных слов. Для первоначального обучения вводилось около 6000 слов (40 текстов), неравномерно распределенных по пяти темам. Для парных словарей задавался размер 50, общий объем словаря V составил 151 слово (а не $500 = 50 \cdot c_s^2$) из-за пересечения парных словарей. Чтобы затруднить классификацию, в число тем включалась тема «путаница», куда специально подбирались тексты, похожие по набору слов на тексты других тем, но отличные от них по смыслу.

На экзамене программе предложили 10 текстов, не входящих в материал обучения, — по два на каждую тему. Классификация с использованием словаря V и V' (отобранными соответственно по критерию γ и γ') дала по одной ошибке.

Дообучение производилось на текстах примерно такого же объема, как и при первоначальном обучении. Словарь V увеличился принципиально на 20 слов. На экзамене с предъявлением 10-ти текстов снова была сделана одна ошибка. Однако при использовании V' не было ни одного расхождения, а при использовании V их — два.

Чтобы проиллюстрировать характер классифицировавшихся текстов и понятие расхождения, приведем пример текста

Actor Ned York, who played small parts in the Starsky and Huter TV series, failed yesterday in a strange bid for notoriety — as a killer. He was arrested as a suspect in the hunt for the Los Angeles strangler who has killed 12 girls. York — 6 ft 4 in tall and 17 stone — got himself into the action by making a weird call to detectives. But after questioning him for hours, police dismissed him as a just another crank with a phoney confession — the fourth since the hunt began last October.

Этот текст ЧК отнес к теме «путаница», а АК — к теме «криминальная хроника».

Список литературы: 1. *Пиотровский Р. Г.* Текст, машина, человек. Л., 1975. 327 с. 2. *Полеску А. Н.* Автоматическое индексирование и аннотирование научно-технических текстов//Тр. Всесоюз. семинара по информ. языкам. Секция семиотики. М., 1972. Вып. 4. С. 19—21. 3. *Перцова Г. М.* Автоматический анализ содержания текста (на материале текстов по стоматологии). Л., 1975. 195 с. 4. *Орлов А. И.* Задачи оптимизации и нечеткие переменные. М., 1980. 63 с.

Поступила в редколлегию 14.07.81

УДК 510.62

Н. В. РЯБОВА

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СУФФИКСАЛЬНОГО СЛОВООБРАЗОВАНИЯ ОТАДЪЕКТИВНЫХ ИМЕН СУЩЕСТВИТЕЛЬНЫХ

При решении проблемы математического описания смысла текста необходимым этапом является моделирование механизма формирования семантики производного слова, поскольку в сос

таве любого языка с высокоразвитой словообразовательной системой производные слова составляют основной массив. Это в полной мере относится к русскому языку. Поэтому в его изучении очень существенно освоение семантики производных слов. Формирование семантики производного слова выявляется посредством изучения типа отношений, существующих между значениями мотивированных и мотивирующих их слов.

В работах [1, 2] были рассмотрены вопросы построения тематической модели суффиксального словообразования отсубстантивных имен существительных и выявлены семантические роли словообразовательных суффиксов, непосредственно влияющие на семантику производного слова. В качестве аппарата формализации использована алгебра конечных предикатов, являющаяся универсальным средством для записи конечных многоместных отношений на множестве словообразовательных морфов [3].

С точки зрения семантики все производные слова делятся на две большие группы [4]. В одну входят слова, лексические значения которых полностью складываются из значений составляющих их частей. Например, значение слова *столик* («маленький стол») представляет собой чистую сумму значений производящей основы *стол* и значения суффикса *-ик* («маленький»). Аналогично складываются из значений морфем и значения многих других слов в русском языке. Другая группа — это слова, лексические значения которых не представляют собой простую сумму значений их частей. Так, складывая значения частей слова *синяк* (значение производящего прилагательного *синий* и предметное значение суффикса *-ак*), можно получить лишь значение «предмет синего цвета», но это не будет лексическим значением данного слова. Слов второй группы в русском языке не меньше, а может быть и больше, чем первой. Их лексические значения кроме значений морфем содержат добавочные смысловые компоненты, которых нет ни в значениях производящих основ, ни в значениях производящих аффиксов. Компоненты смысла, не получающие формального выражения, в лингвистической литературе получили название смысловых приращений [4]. Особенно характерно образование такого типа дериватов для отадеквативных существительных. Рассмотрим примеры дериватов обеих групп. При образовании названий лиц по характеризующему их признаку в качестве мотивирующей основы используются качественные прилагательные и различные суффиксы: *хитрец*, *добряк*, *богач*, *негодник*, *старик* и другие. Все эти слова описываются признаком x_{25} — «характеристика лица по характерному свойству, качеству» (см. [2]) с помощью оттенка «обладания»: «ZY — тот, кто обладает характерным признаком Z». В отличие от качественных прилагательных относительные всегда порождают слова с фразеологичной семантикой, в том числе и среди названий лиц. Если значения слов типа *подлец*, *хитрец* можно

определить как «тот, кто хитр, подл», то этого никак нельзя сказать о названиях типа *бумажник, западник, нефтяник, торфяник* и т. п. Нефтяник — это инженер или рабочий, связанный с нефтяной промышленностью, а не «тот, кто нефтяной», поскольку каждое такое слово имеет индивидуальную смысловую структуру. Но при моделировании словообразовательных процессов задача заключается в том, чтобы найти некий инвариант значения суффикса. Именно определение этого инварианта и позволяет решить вопрос, имеет ли этот суффикс только категориальное или еще и конкретное значение. Поэтому важно абстрагироваться от лексического значения производного слова и опираться на его словообразовательное значение. Несмотря на кажущееся сходство словообразовательных значений с лексическими значениями производных слов они коренным образом различаются между собой [5]. Принципиальное различие состоит в том, что лексические значения характеризуют отдельные слова, т. е. каждое слово имеет свое лексическое значение или определенный набор лексических значений и оттенков значений, словообразовательные же значения характерны для целых групп, рядов, категорий производных слов, однородных в структурном отношении, построенных по определенным словообразовательным моделям. Например «грузовик — автомобиль, предназначенный для перевозки грузов», «дождевик — пальто из непромокаемой ткани, предназначенно для защиты от дождя». Оба слова обозначают конкретные предметы, характеризующиеся признаком функционального предназначения.

Для моделирования отадективных существительных имеет значение то обстоятельство, что они также, как и отсубстантивные существительные, в большинстве случаев имеют в качестве словообразующего форманта суффиксы со значением носителя признака: *-ак/чак*: бедняк, синяк; *-арь*: глухарь, дикарь; *-ик(а)*: голубика; *-иц(а)*: светлица, темница; *-ство(о)еств(о)/-шество(о)*: лакомство, общество. Кроме того, имеется значительное количество отадективных существительных с суффиксами, выражающими значение отвлеченного признака: *-изм*: гуманизм, реализм; *-изн(а)*: желтизна, новизна; *-итет*: нейтралитет; *-ств(о)/-еств(о)/-инств(о)*: коварство, изыщество и т. д. Поскольку ранее была введена система признаков для моделирования конкретных существительных [1, 2] в данной работе введем признаки, необходимые для описания суффиксального словообразования абстрактных существительных, используя при необходимости и ранее введенные семантические. Предлагаемая система признаков справедлива не только при мотивации прилагательными, но также существительными и глаголами. Поскольку все признаки должны быть равноправны, так как являются аргументами, т. е. независимыми переменными морфологической функции $Y=F(X)$, где X — набор признаков, Y — соответствующий этому набор

екст, то нумерация признаков существенного значения не имеет. Поэтому нумерация признаков для моделирования абстрактных существительных продолжает нумерацию ранее введенных признаков. x_{36}^0 — «характеристика абстрактных сущностей», имеет значения: x_{35}^0 — «общие понятия», x_{36}^1 — «отвлеченное действие», x_{36}^c — «состояние», x_{36}^k — «отвлеченное качество, свойство, отвлеченный признак», x_{36}^n — «процесс», x_{36}^6 — «собирательное понятие». Область определения этого признака записывается уравнением

$$x_{36}^0 \vee x_{36}^1 \vee x_{36}^c \vee x_{36}^k \vee x_{36}^n \vee x_{36}^6 = 1. \quad (1)$$

Признак x_{37} — «признак типологии общих понятий» имеет значения: x_{37}^0 — «отрасль науки, искусства»; x_{37}^3 — «сфера занятий, склонностей лица»; x_{37}^n — «научные и общественные понятия»; x_{37}^a — «общественно-политические течения, явления»; x_{37}^c — «социальное положение лица»; x_{37}^n — «научные направления, идейные направления»; x_{37}^a — «общественные системы»; x_{37}^y — «должности, учреждения». Имеет область определения, записанную следующим уравнением:

$$x_{37}^0 \vee x_{37}^3 \vee x_{37}^n \vee x_{37}^a \vee x_{37}^c \vee x_{37}^n \vee x_{37}^a \vee x_{37}^y = 1. \quad (2)$$

Признак x_{38} — «типология собирательных понятий» принимает значения: x_{38}^a — «совокупность лиц», x_{38}^n — «совокупность предметов», x_{38}^n — «вещественная совокупность»;

$$x_{38}^a \vee x_{38}^n \vee x_{38}^n = 1. \quad (3)$$

Признак x_{39} — «характеристика отвлеченного признака, свойства, качества», имеет значения: x_{39}^k — «количественная характеристика признака, проявляющаяся в различной степени»; x_{39}^x — «качественная характеристика признака»; x_{39}^n — «носитель признака»:

$$x_{39}^k \vee x_{39}^x \vee x_{39}^n = 1. \quad (4)$$

x_{40} — «степень признака», имеет значения: x_{40}^n — «нормальная»; x_{40}^0 — «ослабленная», x_{40}^y — «увеличенная»:

$$x_{40}^n \vee x_{40}^0 \vee x_{40}^y = 1. \quad (5)$$

Продемонстрируем возможности системы признаков, описав уравнениями абстрактные имена существительные мужского и среднего рода. В этих уравнениях присутствуют общие для групп суффиксов множители

$$T_1 = x_1^c x_2^c x_3^c x_4^n x_5^a, \quad T_2 = T_1 x_8^n, \quad T_3 = T_1 x_8^c,$$

смысл которых сводится к следующему: рассматривается словообразование (x_1^c), суффиксальное (x_2^c), имен существительных (x_3^c), мотивированных прилагательными (x_4^p), абстрактных (x_5^p), мужского (x_8^m для T_2) и среднего рода (x_8^s для T_3). Запишем уравнение $T_1 T_2 x_{37}^p = \langle \text{ак} \rangle$ (6). Оно означает, что морфема *-ак/-як* появляется в абстрактных существительных со значением «общие понятия». Например, *сыпняк, брюшняк*. Уравнение $T_1 T_2 x_{36}^o x_{37}^p x_{31}^p = \langle \text{ар} \rangle$ (7) означает, что морфема *-ач* появляется в абстрактных существительных, обозначающих общие понятия, и при этом имеет сферу применимости (узус) в разговорной речи x_{31}^p . Например, *строгач*. Для морфемы *-итет* запишем уравнение

$$T_1 T_2 x_{36}^o x_{37}^p x_{33}^m x_{29}^m = \langle \text{итет} \rangle. \quad (8)$$

Отсюда видно, что суффикс *-итет* появляется при образовании абстрактных существительных, обозначающих общие понятия, суффикс по происхождению иностранный (x_{33}^m), тип непродуктивный (x_{29}^m). Морфема *-изм* участвует в образовании абстрактных дериватов со значением «общие понятия» (x_{36}^o), суффикс иностранный (x_{33}^m). Уравнение следующее: $T_1 T_2 x_{36}^o x_{33}^m x_{33}^m = \langle \text{изм} \rangle$ (9). Например, *нейтралитет, архаизм, вульгаризм*. Суффикс *-изм* участвует также в образовании абстрактных существительных со значением «общие понятия» (x_{36}^o), которое конкретизируется как «научные, идейные направления» (x_{33}^m): $T_1 T_2 x_{33}^o x_{37}^m = \langle \text{изм} \rangle$ (10). Суффикс *-ак/-як* образует абстрактные существительные со значением «общественные, политические явления, течения»

$$(x_{37}^m): T_1 T_2 x_{36}^o x_{37}^m = \langle \text{ак} \rangle \quad (11)$$

Уравнение $T_1 T_3 x_{36}^k x_{29}^p x_{31}^x = \langle \text{и}(e) \rangle$ (12) означает, что морфема *-и(е)/-ь(е)/-стви(е)* участвует в образовании абстрактных существительных со значением «отвлеченное качество, свойство, отвлеченный признак» (x_{35}^k), тип продуктивный (x_{29}^p) в художественной речи (x_{31}^x). Например, *величие, радушие, здорье*. Суффикс *-ств(о)/-еств(о)/инств(о)/-енств(о)* также появляется при образовании абстрактных существительных со значением x_{35}^k — отвлеченного качества, признака, свойства, отличается высокой продуктивностью (x_{29}^p). Уравнение имеет вид

$$T_1 T_3 x_{36}^k x_{29}^p (x_{31}^x \vee x_{31}^p) = \langle \text{ств}(o) \rangle. \quad (13)$$

Таким образом, на примере дериватов мужского и среднего рода мы показали, действие системы признаков при моделировании словообразования абстрактных существительных

Список литературы: 1. *Рябова Н. В.* Математические модели суффиксального словообразования отсубстантивных существительных с общим значением «носитель предметного признака»//Пробл. бионики. 1985. Вып. 35. С. 9—16. 2. *Рябова Н. В., Шаронова Н. В.* О математическом моделировании отсубстантивных имен существительных русского языка//Пробл. бионики. 1985. Вып. 34. С. 30—34. 3. *Шабанов-Кушнаренко Ю. П.* Теория интеллекта. Математические средства. Х., 1984. 144 с. 4. *Ермакова О. П.* Лексические значения производных слов в русском языке. М., 1984. 152 с. 5. *Немченко В. Н.* Современный русский язык. Словообразование. М., 1984. 255 с.

Поступила в редколлегию 15.12.87

УДК 800.1:801.322

А. Ю. АНТОМОНОВ

ПОСТРОЕНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛЕКСИКО-СЕМАНТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЯЗЫКА

Язык является чрезвычайно развитой системой и обладает сложной структурой. Более того, структура присуща каждому из его уровней, в том числе и лексике. Однако в современной лингвистике отсутствует единое мнение о структуре лексико-семантической системы, не существует и достаточно адекватных ее моделей. Ситуация здесь напоминает «состояние биологии в преддарвиновский период, когда теория эволюции еще не была создана, или положение химии в доменделеевское время, когда химические элементы группировались в пучки, триады, из них строились тетраграммы и другие привлекательные фигуры, но за всем этим не стояло единой и целостной системы» [1, 167].

Классификация. Ее «естественность» и «единственность». Для построения модели необходимо провести классификацию накопленных объектов. Под классификацией мы понимаем результат разбиения любого множества (класса) объектов на подмножества (подклассы) по любым признакам. В данном случае для построения модели структуры лексики выполним предварительную классификацию ее единиц — лексем или слов. Существует множество способов объединения слов в (синонимические ряды, антонимические пары, лексико-семантические поля, тематические и функциональные группы и т. д.). Наиболее адекватной поставленной задаче нам представляется следующая цепочка анализа: лексема — лексико-семантическое поле — лексика.

Прежде чем приступить к моделированию иерархической системы, необходимо решить два вопроса: естественность классификации и ее единственность.

Многообразие объектов, которое порождается некой общей исходной структурой («архетипом»), является онтологическим доводом естественности классификации. Архетип понимается

как прообраз, как конструкт, который не совпадает ни с одним соотносимым с ним объектом, но создающим для них норму и допускающим вариации. Архетип понимается также как структура частей (морфология) и внешняя функция связей (экология) объекта. Элементы, из которых складывается архетип, называются меронами. Упрощенно показать взаимосвязи между архетипом и меронами можно на простом примере. В содержательном плане понятия «стол» выделяются три мерона: «рабочая поверхность (крышка, доска), основание (ножки, тумба) и назначение. Отношения между первым и вторым меронами определяются словом «на», между вторым и третьим — «для». Между каждым мероном и архетипом устанавливаются отношения «часть—целое». Таким образом, архетип позволяет описывать объекты, представляя каждый из них через общее и особенное данного типа. При этом в соответствие меронам данного архетипа ставятся определенные признаки объектов.

Второй вопрос, является ли «естественная система» единственной для данной области знания, остается открытым. С. В. Мейен и Ю. А. Шрейдер [2] допускают существование «естественной системы» как некоего идеала, к которому следует стремиться. В действительности же возможно существование нескольких «естественных» систем, одновременно отражающих на данном этапе уровень понимания реального мира и степень их приближения к идеалу. Причину этого исследователи видят в субъективности выделения «естественной» системы, связанную с невозможностью проверки наличия всех выделенных признаков у каждого объекта системы.

Иерархия — способ классификации объектов. Мы, вслед за П. Кэем [3], считаем, что иерархическая форма классификации является объективным отражением данной иерархической формы организации лексики. Во всяком случае значительной ее части. Иерархическая структура (по П. Кэю) — это реляционная структура. Она состоит из конечного числа классов, каждый из которых включает несколько членов (животные), и типов связей между ними, а именно отношение строгого включения (множество птиц — множество чаек).

В отношении включения между классами П. Кэй выделяет еще один тип связи — непосредственное предшествование. Так, класс «птицы» включает подкласс «чайки» и непосредственно предшествует ему, так как нет никакого другого класса, который бы включался в класс «птицы» и при этом включал бы класс «чайки».

Отношение непосредственного предшествования и отношение строгого включения являются лишь одной семантической корреляцией из всех возможных между словами — иерархической. Профессор А. А. Белецкий в лекциях приводил следующую исчерпывающую схему семантических корреляций.

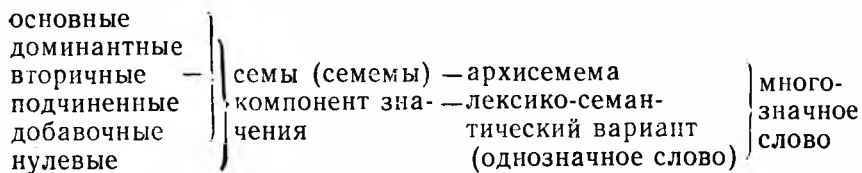
- А. 1. Энномические (мономические) — все, кроме А2.
- 2. Дианомические (экспликативные):
 - 2.1 — миксономические (семиотика — наука о знаках);
 - 2.2 — полиномические (интернациональный конгресс—международный съезд);
- Б. 1. Положительные (параллельные) — все, кроме Б2.
- 2. Отрицательные (полярные):
 - 2.1 — абсолютные полярные (есть—нет);
 - 2.2 — градуальные полярные (холод—прохлада—тепло—жара);
- В. 1. Эксплицитные (деривативные):
 - 1.1 — актуальные (человек—человеческий—человечество);
 - 1.2 — дезактуализированные (рвать—рыть).
- 2. ИмPLICITные:
 - 2.1 имплицитивные (муж—жена);
 - 2.2 тематические (семья—отец—мать—дети);
 - 2.3 иерархические (градуальные) (роза—цветок—растение—флора);
 - 2.4. — коммуникативные:
 - 2.4.1 — абсолютные (лингвист—языковед);
 - 2.4.2 — градуальные (красивая—прекрасная—великолепная);
 - 2.5 — атрибутивные (камень—твердый);
 - 2.6 — метафорические:
 - 2.6.1 — иконические (образные) (нос (человека) — нос (корабля));
 - 2.6.2 — символические (корень (растения) — корень (слова)).

Реляционная структура считается иерархической, если она удовлетворяет следующим двум аксиомам: существует только один член множества таксонов (где таксон — подмножество классификационного поля или ячейка (место) в структуре классификации), которое включает все остальные имена; для каждого таксона множества таксонов, не являющегося пустым, эти таксоны являются его подклассами.

Особое место в классификационной системе отводится родовым таксонам, выделение которых—один из основных процессов мышления. Они членят класс в соответствии с самым явным и очевидным членением реального мира. В классификационном поле таксон характеризуется объемом понятия, т. е. множеством всех мыслимых объектов, которые могут быть названы именем данного понятия. Объем и содержание понятия непосредственно связываются с «конкретными» и «абстрактными» словами в лексике. Поясним сказанное выше примером, приведенным А. А. Белецким. Пусть мы имеем класс птиц, в который включены его конкретные представители: воробей, курица, ласочка, чайка, крачка, голубь, лебедь, гусь, утка, грач, ворона, кворец, дрозд, снегирь, свиристель, синица и др. «Абстрактное»

слово «птицы» имеет значительно меньшее содержание, чем обозначение конкретной птицы — «воробья». В то же время «птицы» характеризуются значительно более широким (настолько широким, насколько узким содержанием) семантическим объемом. Мы считаем, что величина семантического объема может служить достаточно объективным критерием степени абстрактности слов. Наименования экспонентов — конкретных представителей птиц, вместе с именем класса («птицы») составляют одну предметную группу. Прделав ряд аналогичных операций по укрупнению, можно включить класс птиц наряду с остальными подобными классами в предметную группу более высокого уровня иерархии — «позвоночные». Последний уровень — «животные» завершает интеграцию всего животного мира в одну супергруппу. Родовым таксоном в цепочке позвоночные—птицы—воробей является слово «птицы» как наиболее часто используемое при классификации явлений.

Семантическая структура слова. Слова, располагаясь на нижних ярусах лексико-семантической системы, на уровне значения уже имеют довольно сложную структуру. Так, М. В. Жгенти [4] говорит о существовании макросем — основных элементов значения, которые являются понятийной основой словесного поля, и микросем — семантических признаков, лежащих в основе более тесных группировок разных участков и слов в поле. Отношения между значениями отдельных слов регулируются взаимодействиями основных, вторичных и добавочных сем (семем). Ю. Н. Караулов [3] называет семы (семемы) компонентами значения и выделяет доминантные, подчиненные и нулевые компоненты. Множество компонентов образуют слово, в котором лексико-семантический вариант приравнивается отдельной рубрике в статье толкового словаря. Множество лексико-семантических вариантов составляют отдельное многозначное слово. Множество слов — семантическое поле, которому присвоено имя Б. Потье [5], рассматривая класс названий предметов мебели, на основе анализа дифференциальных признаков отдельных объектов, обозначаемых словами, также установил общие для них семы (семемы), объединяемые в архисемему. Если допустить соответствие семем меронам, то понятию архисемемы будет соответствовать архетип. Итак, имеем



мероны

архетип

Слова объединяются в лексико-семантические поля, которым присваиваются имена. Задача упорядочения, систематизации имен полей предполагает сведение их в группы, которые также находятся в иерархических отношениях. Появляется еще один уровень, который Ю. Н. Караулов называет «понятием».

Структура лексико-семантического поля. Ранее она рассматривалась плоско: обычно в поле выделялся центр (семантическая доминанта, обобщающее слово) и периферия (зависимые слова). Считалось также, что имя поля (т. е. центр) находится на одном уровне с зависимыми элементами. Мы же считаем возможным дать следующее определение понятия «лексико-семантическое поле». Под «полем» мы понимаем совокупность слов, имеющую, как минимум, два уровня иерархии, где на первом уровне располагаются собственно элементы поля — слова, а на верхнем — слово, наиболее полным образом выражающее эту совокупность и не принадлежащее нижнему уровню. Связь между составляющими первого уровня признается факультативной, межуровневые — обязательными для всех компонентов поля.

Проиллюстрируем процесс образования полей. Например, пусть мы имеем сито с очень мелкими ячейками, отражающими такой уровень абстракции, который соответствует конкретному значению слова. Просеем весь словарь через такое сито. Конкретные слова, обозначающие предметы, их свойства, отношения и т. д., составят плоский слой первого уровня иерархической системы. Теперь можно приступить к объединению этих слов в группы. Возьмем сито с ячейками покрупнее, просеем оставшиеся слова. Получим второй слой лексики, соответствующий второму уровню иерархии. Логика подсказывает, что слов второго уровня будет, по крайней мере, на порядок меньше, чем первого. Часть слов второго яруса окажется именами некоторых групп слов первого яруса. Такие слова являются обобщающими, интегрирующими по сравнению с нижним ярусом.

Далее элементы полученного второго уровня объединяются на основе некоторых ассоциаций в группы, в пределах которых также возможно выделение доминирующих слов. Если условно обозначить элементы первого уровня — словами, второго — понятиями (т. е. обобщающими словами), то доминанты, выделенные на втором этапе построения иерархической системы лексики, окажутся понятиями понятий и образуют третий уровень. Такую процедуру продолжаем до тех пор, пока дальнейшее объединение окажется невозможным. Теоретически весь лексический состав языка должен поместиться в рамках такой иерархической системы.

Таким образом, модель лексико-семантической системы языка должна быть иерархической: семема—архисемема—лексема—понятие—...—лексика; классификация элементов лексики — естественной. Единственность такой классификации выте-

кает из существования единого архетипа каждого конкретного поля в мозгу человека; лексико-семантическое поле как промежуточное звено в цепи от отдельного слова к лексике в целом представляет собой многоуровневое явление.

Список литературы: 1. Караулов Ю. Н. Общая и русская идеография. М., 1977. 355 с. 2. Мейен С. В., Шрейдер Ю. А. Методологические аспекты теории классификации//Вопр. философии. 1976. № 12. С. 67—79. 3. Kay P. Taxonomy and semantic contrast//Language. 1971. 47, № 4. P. 866—887. 4. Жгенти М. В. Семантическое поле как принцип исследования словесных значений: Автореф. дис. ... канд. фил. наук. Тбилиси, 1983. 26 с. 5. Pottier V. Recherches sur l'analyse sémantique et traduction mécanique. Nancy, 1963. 40 p.

Поступила в редколлегию 20.10.87

УДК 510.62

С. Ю. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО, Н. В. ШАРОНОВА, канд. техн. наук,
И. Ю. ШУБИН

О НЕКОТОРЫХ АЛГОРИТМАХ КАНОНИЧЕСКОЙ КОНЪЮНКТИВНОЙ МИНИМИЗАЦИИ ФОРМУЛ АЛГЕБРЫ КОНЕЧНЫХ ПРЕДИКАТОВ

В алгебре логики имеет место принцип двойственности, в силу которого методы отыскания минимальной конъюнктивной нормальной формы оказываются совершенно аналогичными методам отыскания минимальной ДНФ. В универсальной алгебре конечных предикатов произвольного порядка [1] мы лишены принципа двойственности, операции дизъюнкции и конъюнкции уже неравноправны. Вследствие этого методы конъюнктивной минимизации должны рассматриваться отдельно и нельзя обойтись ссылкой на аналогию с дизъюнктивной минимизацией.

Данная статья развивает ранее введенные определения и алгоритмы канонической конъюнктивной минимизации для случая конечных предикатов произвольного порядка.

Прежде всего, докажем несколько важных утверждений, основывающихся на понятиях импликанты и имплиценты предикатов произвольного порядка и на основе свойств импликанты.

Под *имплицентой конечного предиката* f понимают такой конечный предикат g , если на любом наборе значений аргументов, для которых $g=0$, имеет место $f=0$. Говорят, что имплицента g накрывает своими нулями нули предиката f .

Если конечный предикат g есть имплицента предиката f , то предикат \bar{g} является импликантой предиката f , и наоборот. Предикат g является имплицентой предиката f в том и только том случае, когда $f \supset g \equiv 1$. В самом деле, если конечный предикат g есть имплицента предиката f , то, согласно доказанному ранее получим $\bar{g} \supset \bar{f} \equiv 1$, откуда $\bar{g} \vee \bar{f} \equiv 1$, $f \vee g \equiv 1$, $f \supset g \equiv 1$. Двигаясь тем же путем в противоположную сторону, получаем обратное.

Если $f \equiv g \cdot h$, где f, g, h — некоторые конечные предикаты, то предикат g является имплицентой предиката f . Действительно, пусть $f \equiv g \cdot h$. Если $g(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n) = 0$, то $f(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n) \equiv g(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)h(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n) \equiv 0h(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n) \equiv 0$.

Пример. Пусть $A_1 = \{a, b, c\}$, $A_2 = \{a, d\}$, $A_3 = \{e, f, g\}$, $B = \{x, y, z\}$ — некоторые алфавиты, $f \equiv x^a \vee y^d z^g$ — некоторый конечный предикат. С помощью второго дистрибутивного закона получим $f \equiv (x^a \vee y^d)(x^a \vee z^g)$. Элементарная дизъюнкция $x^a \vee z^g$ есть амплицента предиката f . Ее собственными частями служат предикаты $g_1 = x^a$ и $g_2 = z^g$. Проверим, являются ли эти предикаты имплицентами предиката f :

$$f \supset g_1 \equiv x^a \vee y^d z^g \supset x^a \equiv \overline{x^a} \vee \overline{y^d z^g} \vee x^a \equiv \overline{x^a} (\overline{y^d} \vee \overline{z^g}) \vee x^a \equiv \\ \equiv (\overline{x^a} \vee x^a)(\overline{y^d} \vee \overline{z^g}) \equiv x^a \vee \overline{y^d} \vee \overline{z^g} \neq 1.$$

$$f \supset g_2 \equiv x^a \vee y^d z^g \supset z^g \equiv \overline{x^a} \vee z^g \neq 1,$$

т. е. предикаты g_1 и g_2 не являются имплицентами предиката f , и, следовательно, предикат $x^a \vee z^g$ есть простая имплицента предиката.

Конъюнкция любого числа имплицент конечного предиката произвольного порядка является имплицентой этого предиката. Действительно, пусть g_1, g_2, \dots, g_p — имплиценты предиката f . Это означает, что $f \supset g_1 \equiv 1$, $f \supset g_2 \equiv 1, \dots, f \supset g_p \equiv 1$. Тогда

$$f \supset g_1 g_2 \dots g_p \equiv \overline{f} \vee g_1 g_2 \dots g_p \equiv (\overline{f} \vee g_1)(\overline{f} \vee g_2) \dots (\overline{f} \vee g_p) \equiv \\ \equiv (f \supset g_1)(f \supset g_2) \dots (f \supset g_p) \equiv 1.$$

Каждому конечному предикату соответствует множество обозначающих его конъюнктивных нормальных форм. Задача канонической конъюнктивной минимизации состоит в отыскании в множестве КНФ формулы с наименьшим числом узнаваний символов (минимальной КНФ).

Проблема канонической минимизации алгебры конечных предикатов имеет много общего с аналогичной проблемой алгебры логики. В алгебре логики известны алгоритмы минимизации Квайна—Мак-Класки, Порецкого—Блейка, Нельсона [1, 2].

Утверждение 1. Для любого конечного предиката f результатом применения алгоритма Квайна—Мак-Класки, распространенного на случай алгебры конечных предикатов, к его совершенной КНФ является сокращенная КНФ.

Доказательство. Представим окончательную форму записи предиката f в виде $q \wedge Q$, где q — одна из элементарных сумм, составляющих форму f_i , а Q — конъюнкция всех членов формы. Отождествим полученную форму f_i с заданным предикатом f и заметим, что q является имплицентой f . Это следует непосредственно из определения конъюнкции. Запись $f_i = q \wedge Q$ указывает также на полноту системы имплицент q и Q .

Пусть q — непростая имплицента предиката f . Тогда найдется элементарная сумма g , составленная из части элементарной суммы q и являющаяся имплицента предиката f . В силу свойств суммы, имплицента g также обращается в нуль на тех наборах, на которых q равно нулю, система имплицент q и Q является полной системой, и справедливо, что $f = q \wedge Q$. Поскольку к исходной форме $f = q \wedge Q$ может быть применена одна из операций алгоритма Квайна—Мак-Класки, то приходим к противоречию, источником которого является предположение о том, что имплицента q — непростая. Ввиду произвольности выбора q приходим к выводу, что применение алгоритма Квайна—Мак-Класки к исходной форме предиката f , заданной совершенной КНФ, представляет собой конъюнкцию некоторого множества ее простых имплицент, т. е. сокращенную КНФ предиката f .

Утверждение 2. Если в произвольной КНФ конечного предиката произвести все возможные обобщенные склеивания и устранить затем все элементарные поглощения (т. е. выполнить операции, предусмотренные алгоритмом Порецкого—Блейка), то получится сокращенная КНФ предиката f .

Для доказательства этого утверждения покажем, что при многократном применении операции обобщенного склеивания из произвольной КНФ предиката может быть получена простая имплицента этой функции. Действительно, в результате применения к КНФ операции обобщенного склеивания мы снова получаем некоторую КНФ. Каждый же член КНФ является элементарной суммой и имплицента предиката f . Поэтому он поглощается какой-либо простой имплицента предиката f . Таким образом, после получения всех простых имплицент устранение всех элементарных поглощений обязательно приведет к сокращенной КНФ.

Для доказательства того, что в результате обобщенных склеиваний из произвольной КНФ предиката f могут быть получены все ее простые имплиценты, проведем индукцию по числу переменных n , от которых зависит предикат f . Для $n=1$ это утверждение очевидно. Предположим, что оно справедливо для всех $n < m$, и докажем его для $n=m$.

Заметим, что простая имплицента p является конституэнтной нуля, входит во всякую КНФ F и, следовательно, получается из нее в результате пустого множества обобщенных склеиваний. Действительно, в КНФ F обязательно найдется элементарная сумма r , которая обращается в нуль на наборе, соответствующем конституэнту p . Но тогда, очевидно, $p = rl$, где l — некоторая элементарная сумма, и, поскольку r является имплицента предиката f , а p — ее простой имплицента, то $l=1$ и, следовательно, $p=r$.

Итак, когда простая имплицента p является конституэнтной нуля, она обязательно войдет в любую КНФ предиката f , в том числе и в ту КНФ, которая получается в результате при-

менения операций обобщенного склеивания к любой данной исходной КНФ F предиката f . Предположим теперь, что в p не входит хотя бы одна из переменных, от которых зависит предикат f . Этой переменной может быть, например, переменная x . В этом случае представим КНФ F в виде $F = Ax \wedge Bx \wedge C$, группируя члены и вынося x и \bar{x} за скобки. Являясь имплицентами функции F и не завися от x , элементарная сумма p будет, имплицентами функций, которые получаются из функции F в результате приравнивания к нулю и единице. Иными словами, p — имплицента функций $A \wedge C$ и $B \wedge C$. Но тогда p будет, очевидно, имплицентами суммы этих функций $(A \wedge C) \vee (B \wedge C) = AB \vee C$.

Обозначим это произведение через F_1 — имплиценту функции F , поскольку, применяя к F операцию обобщенного склеивания, мы получим

$$F = Ax \wedge B\bar{x} \wedge C = Ax \wedge B\bar{x} \wedge (AB \vee C) = Ax \wedge B\bar{x} \wedge F_1. \quad (1)$$

Теперь ясно, что никакая собственная часть элементарной суммы p не может быть имплицентами функции F_1 , так как в противном случае она была бы имплицентами функции F , что исключено ввиду простоты имплиценты p . Следовательно, p представляет собой простую имплиценту функции F_1 . Поскольку F_1 зависит от меньшего числа переменных, чем функция F , к ней можно применить индуктивное предположение. Поэтому можно считать, что простая имплицента p получается из любой КНФ функции F_1 , в результате некоторого числа обобщенных склеиваний. Но формула (1) показывает, что какая-то КНФ функции F_1 получается при обобщенных склеиваниях (по x) из исходной КНФ F . Следовательно, простая имплицента p возникает из КНФ F предиката f в результате применения операции обобщенного склеивания, повторенной некоторое число раз. Ввиду произвольности выбора p и F , утверждение доказано.

В методе канонической конъюнктивной минимизации Нельсона, обобщенного для случая алгебры конечных предикатов, исходной информацией служит произвольно выбранная ДНФ конечного предиката.

Если от произвольной ДНФ конечного предиката перейти к его КНФ, применить операцию конъюнктивного поглощения, основанную на использовании тождества $A(A \vee B) \equiv A$, то получаем сокращенную КНФ.

Покажем, что при выполнении перечисленных выше операций в произвольной ДНФ $H = H_1 \vee H_2 \vee \dots \vee H_s$ конечного предиката f может быть получена любая простая имплицента q этого предиката (где H_i — элементарная конъюнкция, $1 \leq i \leq s$). При этом будем исходить из того, что рассматриваемая форма предиката не является тривиальной, т. е. исходный предикат отличен от константы. Тогда, не нарушая общности рассуждений, представим простую имплиценту q данного предиката в виде суммы некоторого (непустого) множества узнаваний. В силу закона

истинности оно будет сведено к единице, либо к элементарной сумме узнаваний

$$q = x_{j_1 i}^{a_{j_1 i}} \vee x_{j_2 k}^{a_{j_2 k}} \vee \dots \vee x_{j_l r}^{a_{j_l r}} \quad (l \geq 1, 1 < i, k, \dots, r \leq p).$$

Нетрудно убедиться в том, что предположение о простоте имплиценты q не позволяет обратиться исходный предикат f в тождественную единицу, когда

$$x_{j_2 k}^{a_{j_2 k}} = 1, \quad x_{j_3 m}^{a_{j_3 m}} = 1, \quad \dots, \quad x_{j_l r}^{a_{j_l r}} = 1,$$

поскольку сумма узнаваний $x_{j_2 k}^{a_{j_2 k}} \vee x_{j_3 m}^{a_{j_3 m}} \vee \dots \vee x_{j_l r}^{a_{j_l r}}$ также была бы имплицентой предиката f . Это означает, что в форме H предиката f найдется хотя бы одна такая элементарная конъюнкция, которая не содержит узнаваний $x_{j_2 k}^{a_{j_2 k}}, x_{j_3 m}^{a_{j_3 m}}, \dots, x_{j_l r}^{a_{j_l r}}$. Сохраняя при этом общность рассуждений, можно считать такой элементарной конъюнкцией H_1 . Далее, полагая $x_{j_1 i}^{a_{j_1 i}} = 1, \dots, x_{j_l r}^{a_{j_l r}} = 1$ получим тождественное равенство единице и самого предиката f . С другой стороны, это возможно, когда в каждую элементарную конъюнкцию входит хотя бы одно из рассматриваемых нами узнаваний (так как вся форма равна единице при $f \equiv 1$). Из предположения о том, что H_1 не содержит узнаваний $x_{j_2 k}^{a_{j_2 k}}, x_{j_3 m}^{a_{j_3 m}}, \dots, x_{j_l r}^{a_{j_l r}}$, следует, что она содержит узнавание $x_{j_1 i}^{a_{j_1 i}}$, т. е. представима в виде $H_1 = x_{j_1 i}^{a_{j_1 i}} \wedge H_1^*$. Аналогично, не нарушая общности рассуждений, запишем:

$$H_2 = x_{j_2 k}^{a_{j_2 k}} \wedge H_2^*, \quad \dots, \quad H_l = x_{j_l r}^{a_{j_l r}} \wedge H_l^*.$$

В каждую из остальных $(s-l)$ элементарных конъюнкций входит, по крайней мере, одно из узнаваний вида $x_{j_1 i}^{a_{j_1 i}}, \dots, x_{j_l r}^{a_{j_l r}}$. Теперь нетрудно убедиться, что выполнение всех, где это возможно, операций объединения одинаковых дизъюнктивных членов и элементарного поглощения даст в полученной таким образом конъюнктивной форме член

$$q = x_{j_1 i}^{a_{j_1 i}} \vee x_{j_2 k}^{a_{j_2 k}} \vee \dots \vee x_{j_l r}^{a_{j_l r}}.$$

Ввиду произвольности выбора исходной дизъюнктивной нормальной формы и получения любой наперед заданной простой имплиценты конечного предиката f приходим к выводу, что конъюнктивная нормальная форма содержит все простые имплиценты рассматриваемого предиката, т. е. является его сокращенной КНФ.

Теория интеллекта исходит из конъюнктивности интеллекта. Свойство конъюнктивности чрезвычайно ограничивает класс уравнений алгебры конечных предикатов, которые могут эффективно решаться человеческим интеллектом. Конъюнктивности представляется одним из фундаментальных качеств человеческого интеллекта. При построении бионических интеллектуальных систем в этом свете приобретают большое значение эффективные методы минимизации конъюнктивных форм, описывающих процессы интеллекта.

Список литературы: 1. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. Теория интеллекта. Проблемы и перспективы. X., 1987. 150 с. 2. Глушков В. М. Синтез цифровых автоматов. М., 1962. 365 с.

Поступила в редколлегию 12.03.87

УДК 510.62

А. Н. ЮДО, П. М. ЧЕГОЛИН, д-р техн. наук

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ОБУЧАЕМОСТИ В АОС С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Интегральные показатели автоматизированных обучающих систем (АОС), построенные на базе таких параметров обучения, как время обучения, стоимость обучения и вероятность правильного воспроизведения (обучения) в основном применяются как показатели качества и эффективности обучения.

Применяемые АОС построены на методике подготовки и использования учебных материалов со схемой программированных учебников по одному из интегральных критериев без учета психофизиологических особенностей обучаемых. Избежать этого можно используя АОС с биологической обратной связью (БОС).

Одной из центральных проблем при создании АОС является оценка психологического состояния обучаемого, а также максимальное увеличение временного интервала активного усвоения получаемой им информации. В связи с появлением новых концепций в психофизиологии и теории обучения было показано, что, если обучаемому с помощью внешней обратной связи, реализованной техническими средствами, представляется информация о его состоянии, он может в этом случае научиться увеличивать мониторируемый показатель. В результате такого тренинга можно фиксировать вызванные модификации, обучаясь произвольной саморегуляции. В работе [1] за всеми разновидностями процедур обучения управлению психофизическим состоянием закрепился термин «метод биологической обратной связи».

Метод БОС опирается на кибернетический подход к механизмам регуляции и управления систем посредством цепи обратной связи (ОС) и представляет собой использование инженерных принципов управления психофизиологическим состоянием. С точки зрения кибернетики БОС — это биотехническая система, снабженная внешней цепью ОС, в которой функцию преобразования физической характеристики физиологического сигнала в сенсорную информацию, доступную для восприятия, выполняет электронное устройство.

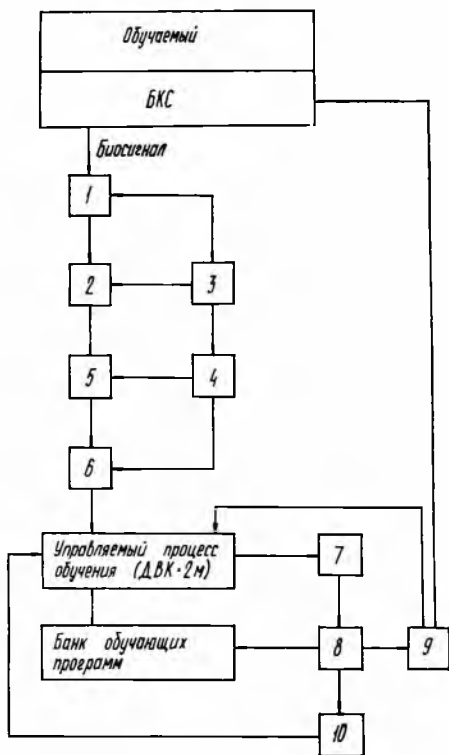
В качестве мониторируемого показателя предлагается использование величин спектральных составляющих интенсивности газоразрядного излучения обучаемого. Выбор такого пока-

зателя основан на том, что интенсивность свечения коррелирует с физическими показателями основных физиологических систем человека [2], а также с его общим психологическим состоянием.

Для реализации метода БОС к серийно выпускаемому комплекту ДВК-2М необходимо подключить ВЧ — фотометрический датчик, АЦП-12, КАМАК, блок контроля состояния (БКС).

Быстрое преобразование Фурье (БПФ), вычисление спектра мощности биосигнала осуществляется на ДВК-2М. Полученная информация выводится на монитор. В системе реализованы следующие этапы: получение интенсивности газоразрядного свечения; преобразование аналогового сигнала в дискретный; расчет коэффициентов БПФ и получение спектра мощности; вывод на дисплей полученных значений спектральных составляющих.

Общая схема эксперимента по методу БОС и логическая последовательность действий могут быть представлены так. В подготовительный период *А* экспериментатор объясняет обучаемому в самом общем виде суть эксперимента. Затем следует этап регистрации *В* предтренингового уровня — определение базового уровня спектральных составляющих. На этапе *С* обучаемому предлагается ряд зада-



ний по одному из разделов учебной программы. При этом фиксируются уровни спектральных составляющих. Данные этапов *В* и *С* заносятся в память ЭВМ.

Этап *Д* — собственно управление, состоит в том, что обучаемому предлагают значения этапов *В* и *С*. Используя один из методов саморегуляции (например, аутотренинг), обучаемый пытается вывести значения спектральных составляющих этапа *Д* на уровень, полученный на этапе *В*.

Кроме задач саморегуляции, с помощью предлагаемой БОС можно проводить исследования с целью определения уровня корреляции характеристик свечения с показателями других физиологических систем.

Применение спектрального анализа позволяет выделить частоты, «отвечающие» за ту или иную физиологическую систему.

Обобщая результаты исследований по созданию АОС с БОС, построим модель автоматической диагностики обучаемости (АДО) (рисунок).

Назначение блоков автоматического контура АДО следующее: 1 — блок аналоговой предобработки биосигналов, 2 — блок сегментации и выделения примитивов.

Последовательность сегментов получают как последовательность векторов признаков, определяемых на последовательных отрезках биосигнала равной длительности путем частотной трансформации и статистической обработки. Во всех случаях каждый сегмент представлен вектором, одна составляющая которого — его длительность по времени. На рисунке используются такие обозначения:

3 — блок отбора примитивов, 4 — блок восстановления грамматики, 5 — блок синтаксического анализа, 6 — блок программной предобработки биосигналов; 7 — блок идентификации (служит для классификации отклонений), 8 — блок генерации и выбора направления обучения, 9 — блок прогнозирования и статистической обработки, 10 — блок анализа выбранных обучающих программ.

В динамике обучения на вход распознающей части поступает реализация, т. е. некоторый конечный временной отрезок биосигнала, после ввода которого начинается процесс распознавания (блоки 1, 2, 5).

Программная предобработка заключается в аналого-цифровом преобразовании на АЦП-12.

Аналоговая предобработка включает фильтрацию биосигнала, амплитудно-временные преобразования, связанные с нормализацией, сжатие биосигнала посредством аппроксимации с последующим восстановлением.

Задачей синтаксического анализа является распознавание принадлежности анализируемой цепочки сигналов к одной из гармоник $n: L(G_1); L(G_2); \dots; L(G_n)$.

Для распознавания применяется грамматический разбор входной цепочки ω , который может успешно завершиться только при использовании той G_k , для которой $\omega \in L(G_k)$.

По полученному дереву вывода выдается дополнительная информация о структуре и числовых признаках реализации, необходимая для последующих иерархических уровней обработки данных.

Подход к построению обучающих программ основан на формализации предметных областей с фиксацией характерных для них свойств и отношений с другими предметными областями и построении на этой основе моделей представления знаний. При этом используется семантическая концепция представления знаний.

Общая схема последовательности действий обучаемого может быть представлена следующим образом. Обучаемый размещается в кресле учебно-лабораторного тренажера (УЛТ) с встроенными датчиками БКС. В течение 2—3 мин он привыкает к условиям обстановки, после чего проводится тестовый опрос. Значения управляемого показателя предьявляются на экране дисплея и обрабатываются ЭВМ (блоки 7, 8).

Полученный ряд значений в темпе тестирования служит для вычисления параметра, определяющего критерий управления

После каждой порции обучающей программы начинается этап воспроизведения с контролем времени. По окончании работы на УЛТ обучаемому выдается программа самостоятельной работы с показом на экране достигнутых превышений высоты гармоник над линией начального уровня обучаемости.

Список литературы: 1. Сахадзе Э. И., Штарк М. Б. Биологическая (биотехническая обратная связь — мониторинг и анализ физических параметров физиологических систем в линии с ЭВМ. Новосибирск, 1984. С. 32. (Принт/АН СССР Сиб. отд.). 2. Меньшин Г. Г. Автоматизированная подсистема эргономических исследований в задачах обеспечения качества человеко-машинных комплексов//Эрготическое обеспечение автоматизированных систем. Минск, 1980. С. 25—31.

Поступила в редколлегию 23.11.87

УДК 510.62

А. П. КУВЕНЕВА, Н. В. КОНОНЕНКО, Л. Г. БОГДАНОВА
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ В ОБУЧЕНИИ ГРАММАТИКЕ
АНГЛИЙСКОГО ЯЗЫКА СПЕЦИАЛИСТОВ ТОЧНЫХ НАУК

Во многих исследованиях по методике преподавания иностранного языка учитываются особенности основной учебной и профессиональной деятельности студентов и специалистов в области точных наук [1—3].

Профессиональная привычка этого контингента, изучающего иностранный язык, к восприятию информации в виде графиков и формул, логичность мышления, познание нового в виде решения задач могут быть использованы при введении и закреплении грамматического материала при изучении личных и неличных глагольных форм английского языка. Задача статьи — продемонстрировать идею Л. С. Выготского об общности процессов усвоения иностранного языка и системы научных понятий, развитую Л. В. Шеншевым [4]. Предложенный материал также показывает осуществление перехода от изучения иностранного языка как предмета к его практическому применению в профессиональных целях.

Методически эти задачи решаются предложением студентам, аспирантам физико-математических специальностей изучать грамматические явления английского языка в привычной для

них форме — символической. С целью улучшения усвоения сложной системы личных и неличных глагольных форм предлагается опираться на особенности их профессионального мышления. Во-первых, с помощью математических (здесь — алгебраических) символов достигается высокая степень систематизации материала, повышается мотивация и интерес к изучению английского языка как привычная для данного специалиста форма наглядности. Во-вторых, алгоритмизация моделей личных и неличных форм, представленных в виде математических формул, обеспечивает логическую выводимость нового материала из уже пройденного в математической форме. Представление глагольных форм в виде алгоритмизированных моделей, а затем простейших алгебраических уравнений со сквозными обозначениями наглядно показывает изучающему английский язык, что все формы состоят из одних и тех же «компонентов» (основа глагола, окончания *ed* и *ing*, парадигмы вспомогательных глаголов), и выявляет связь между ними в привычной символической форме. При традиционном подходе эта связь часто не замечается. Подобное представление грамматики облегчает ее запоминание. Такая репрезентация грамматического материала решает и ряд сопутствующих задач. Так, представление глагольной формы в виде суммы компонентов способствует обучению анализу структуры слова на морфемном уровне. Умение быстро и правильно выделить основу, окончание, суффикс у смыслового и вспомогательного глаголов позволяет сразу определить число, время, залог, а следовательно, расширяет возможности обучаемого ориентироваться в тексте.

Такое преподнесение английской глагольной системы представляет также интерес при использовании ЭВМ в учебном процессе. Для составления программы необходима предварительная формализация учебного материала. В данной презентации это уже в значительной степени имеет место. Нами в качестве примера предложено, как использовать некоторые алгебраические понятия и символы для записи моделей личных глагольных форм в виде простых алгебраических уравнений. Предлагается составлять эти уравнения по следующему принципу (табл. 1).

Таблица 1

Модели личных форм	Группа времени
ask be asked be asking be being asked have asked have been asked	Indefinite — модели 1,2 Continuous — модели 3,4 Perfect — модели 5,6

Из табл. 1 видно, что все модели имеют одни и те же «составляющие»: ask, be, have, been. Также в состав моделей вхо-

дят окончания *ed, ing*. Та или иная комбинация этих составляющих дает одну из шести моделей глагола *to ask*. Для других смысловых глаголов в этих моделях *ask* заменяется на их первую форму. Поэтому удобно все эти составляющие обозначить буквами, а всю модель в целом представить в виде суммы. Надо также учесть, что при изменении по лицам и числам вспомогательные глаголы, а иногда и смысловые глаголы (модель 1, время *Present Indefinite*) принимают личные окончания. В линейной алгебре есть понятие, которое поможет нам записать все шесть личных окончаний (1, 2, 3-е лицо единственного и множественного числа) одним знаком. Это понятие матрицы. Матрица — совокупность чисел или символов, расположенных рядами друг под другом, т. е. в виде таблицы. Эти числа или символы являются элементами матрицы и имеют двойной индекс который определяет место каждого элемента по отношению к другим элементам:

$$a = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}.$$

Цифры 11, 12, 21, 22 указывают, на пересечении какой строки и какого столбца данный элемент находится. Например, 11 — на пересечении 1-й строки и 1-го столбца (a_{11}); 12 — на пересечении 1-й строки и 2-го столбца (a_{12}). Элементы a_{11}, a_{12} обозначаются следующим образом: $a_{ik}, i=1, 2; k=1, 2$ (i — номер строки, k — номер столбца). Таким образом, спряжение глагола *to be* — быть, находиться в настоящем времени *Present Indefinite* (модель 1) записывается в виде матрицы

$$b = \begin{pmatrix} \text{am} & \text{are} \\ \text{are} & \text{are} \\ \text{is} & \text{are} \end{pmatrix}.$$

Матрица обозначена b по первой букве глагола *to be*. При этом $b_{11} = \text{am}; b_{31} = \text{is}; b_{12} = b_{21} = b_{22} = b_{32} = \text{are}$.

Точно так же, в виде матрицы, записывается спряжение глагола *to have* — иметь, обладать:

$$h = \begin{pmatrix} \text{have} & \text{have} \\ \text{have} & \text{have} \\ \text{has} & \text{have} \end{pmatrix}.$$

Так можно в виде формулы представить спряжение любого глагола (типа *ask*), записав буквой A неизменяемую основу *ask*, в виде матрицы — окончания. Основу обозначаем через A , так как в математике большими латинскими буквами принято обозначать постоянные неизменные величины.

Поскольку спряжение глагола *to ask* выглядит так:

I ask	we ask
you ask	you ask
he/she asks	they ask,

го окончание в виде матрицы записывается как

$$s = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ s & 0 \end{pmatrix}.$$

Это значит, что во всех случаях, кроме 3-го лица единственного числа, окончания отсутствуют, т. е. математически равны нулю, а в 3-м лице единственного числа глагол принимает окончание s , т. е. $s_{31}=s$. Тогда в виде формулы $X=A+s_{ik}$, где $i=1, 2, 3-1, 2, 3$ -е лицо; $k=1, 2$ — единственное и множественное число; $X=1, 2$ (модель 1); $A=ask$. Это выражение годится не только для глагола to ask, но и для всех глаголов, кроме модальных. В левой части формулы стоит X — неизвестная величина в математике, обозначающая неизвестную глагольную форму. Точно так же, в виде формул, представляются все 6 моделей.

Так, модель 1, объединяющая формы действительного залога в настоящем, прошедшем и будущем неопределенном времени в повествовательном утвердительном предложении, которая записана в виде алгебраической формулы, облегчает распознавание этих временных форм, их запоминание, позволяет организовать тренировку в их усвоении в привычной и наглядной для специалиста форме.

Сравните две записи модели 1 (группа Indefinite Active Voice) на примерах и в формулах (табл. 2).

Таблица 2

Настоящее— Present	Прошедшее— Past	Будущее— Future
He answers — он отвечает	He answered — он ответил	He will answer — он ответит
$X = (A + s_{ik})$	$X = \begin{cases} A + ed \\ B_{11} \end{cases}$	$X = s/w_{ik} + A$

Изучающим английский язык специалистам и студентам точных наук второй вид записи (формульный) более импонирует и привлекает. Опыт обучения грамматике английского языка с привлечением алгебраических моделей личных и неличных форм глагола в Харьковском государственном педагогическом институте им. Г. С. Сковороды [5] показал следующее; эффективность усвоения нового материала, введенного описанным способом, более высокая в группах физико-математического факультета, чем при традиционном; студенты проявляют больший интерес к изучению английского языка с положительной мотивацией; ускоряется введение и усвоение грамматического материала при обработке его в виде математических задач, со-

стоящих из алгебраических моделей; лучше преодолеваются трудности, связанные с плохим знанием лингвистической терминологии, студентами и специалистами.

Представляется, что для практики обучения будущих специалистов точных наук с учетом их профессиональных способностей необходимо рекомендовать предложенный способ обучения грамматике английского языка. Подобное моделирование различных временных, залоговых форм глаголов английского языка необходимо использовать при составлении учебных пособий для специалистов данного профиля. Можно также использовать указанные модели грамматических явлений английского языка в виде алгебраических формул для перевода всей грамматики на язык ЭВМ, что позволит применить компьютеры при обучении английскому языку и на практике перейти к машинному переводу специальных текстов.

Список литературы: 1. Балкевич Н. В. Методика обучения аудирования французской речи в условиях ускоренного курса: Автореф. дис. ... канд. пед. наук. М., 1980. 16 с. 2. Бейдер Е. И., Цветкова З. М. Условия рациональной организации работы памяти при обучении иностранному языку студентов факультетов точных наук//Психологические механизмы памяти и ее закономерности в процессе обучения: I Всесоюз. симпозиум по психологии памяти. Х., 1970. С. 16—19. 3. Бердов В. И. Психологические особенности решения вербальных задач (филологическая и техническая ориентация образования испытуемых — студентов): Автореф. дис. ... канд. психол. наук. М., 1983. 16 с. 4. Шеншев Л. В. Общие моменты мышления в процессах усвоения математики и иностранного языка//Вопр. программирования. 1960. № 4. С. 21—29. 5. Кононенко Н. В., Кувенева А. П. Алгебраическое моделирование личных и неличных глагольных форм//Методические указания по грамматике английского языка. Х., 1987. 59 с.

Поступила в редколлегию 04.12.87

УДК 007

К. И. КУРБАКОВ, д-р техн. наук

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАТИКИ

Новый этап научно-технической революции (НТР) в значительной мере определяется возрастанием роли процессов информатизации и компьютеризации нашего общества. Эти два взаимосвязанных процесса понимаются неоднозначно [1—14].

Эффективность общественного производства в значительной степени связана с информационным обеспечением решаемых задач, с оперативной глубиной и характером обработки и использования различной информации. Существующая информационная технология, включая методы и средства обработки и использования информации в народном хозяйстве, в значительной мере устарела. Между тем информатизация и компьютеризация общественного производства — необходимое условие дальнейшего социально-экономического развития общества.

Одна из проблем, возникающих в связи с этим, настройка общественного сознания на правильное понимание роли и значения информации в обществе; информация есть исходный и необходимый ресурс решения любой задачи, и его необходимо умело и своевременно использовать как любой другой ресурс. Другой важной проблемой является повышение информационной культуры населения в целом и в особенности специалистов народного хозяйства, т. е. создание всеохватывающей системы информационной подготовки населения, как части общеобразовательной и специальной подготовки кадров.

Разработка новой информационной технологии (приемов и методов представления, обработки и распространения информации) — одна из актуальнейших современных проблем. Приведенные выше проблемы, а также ряд других и составляют так называемый процесс информатизации.

Однако новейшая, современная технология обработки и использование информации невозможны без применения соответствующих технических средств информационного обеспечения (вычислительной техники, репрографии, микрофильмирования и др.). Разработка и использование средств вычислительной техники в информационной технологии и составляют основу процесса компьютеризации.

Отметим, что за рубежом и в СССР наблюдаются попытки ученых и особенно производителей вычислительной техники понимать под информатикой вычислительную технику или реже — вычислительную технику и информатику. Причем под информатикой понимается в этом случае теория ЭВМ (компьютера), алгоритмизация и программирование. Смещение данных понятий размывает их научный смысл, а в практической деятельности может привести к абсурдности. В связи с этим рассмотрим более подробно одну из актуальных проблем — разграничение понятий информатики и вычислительной техники, процессов информатизации и компьютеризации.

Информатика как раздел кибернетики есть наука и область практической деятельности, которая связана с информационным обеспечением науки, техники, производства и управления (НТПУ). Причем процесс создания профессиональной информации к этому разделу не относится: он принадлежит к соответствующей научной или практической области знаний. Но, когда эти знания выработаны, то далее они становятся предметом и объектом исследования и деятельности информатики, т. е. она охватывает все вопросы выражения и представления информации (по форме, объему, содержанию, виду и др.), классификацию (по различным признакам), стандартизацию терминологии, сбор, хранение (организация, систематизация, шифрация — кодирование и др.), создание массивов информации — банков данных и методов эффективного доступа — поиска в них, методов и средств рационального хранения информации, выдачу и представление информации потребителю, пере-

дачу и эффективное использование информации с целью выработки последующего знания и др.

Одним из важнейших направлений деятельности информатики является создание специальных и универсальных информационных систем автономного (**информационно-поисковые системы** — ИПС, т. е. системы-справочники различного вида и назначения), универсального или совмещенного типа (информационно-соответствующие системы, которые на базе ИПС выполняют ряд простейших функций, облегчающих потребителю принятие решения, информационно-управляющие системы типа автоматизированных систем управления — АСУ, в которых информационное обеспечение представляет собой исходную основу и продукт деятельности). Очевидно, что информационное обеспечение служит исходной составляющей, а в большинстве случаев ИПС — банк данных является основным, базовым элементом всех управляющих систем.

Информатика включает простейшие ручные методы и средства обработки информации и автоматизированные любой сложности, т. е. она решает, в первую очередь, информационно-логические, смысловые, содержательные вопросы, занимается **информационной технологией** домашнего и машинного типа. Из анализа соотношений информатики и вычислительной техники (рис. 1) видно, что любые технические средства (компьютер,

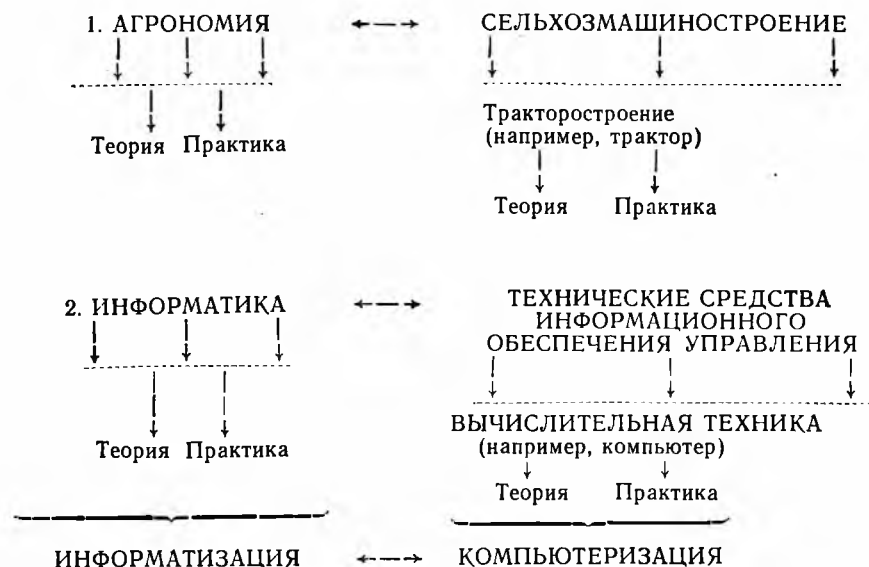


Рис. 1

вычислительная техника в целом не исключение — средства решения задач информатики и играют обслуживающую, хотя и весьма важную роль.

Вычислительная техника (ВТ). Ведущий представитель ВТ — компьютер любого типа. Это современное техническое средство обработки информации. Научно-технический характер ВТ, возможности ее использования в информатике и управлении, производстве, в том числе и на конкретном рабочем месте специалиста, обусловили рост мирового производства компьютеров: от суперкомпьютеров, предназначенных для централизованного, коллективного использования и выполняющих до нескольких сот миллионов операций в секунду, до персональных компьютеров специального или универсального типа, которые позволяют решать задачи непосредственно самому потребителю и быть конечным пунктом (терминалом) для выхода на большой компьютер или их объединение в виде информационно-вычислительной сети.

Использование ВТ (компьютеров) и компьютеризация НТПУ служат важной характеристикой современного НТП, которая определяет не только его уровень, но и качество, поскольку компьютеризация создает небывалые возможности для автоматизации умственного труда. Производительность умственного труда в целом значительно отстала от автоматизации производства, поэтому автоматизация умственного труда неизбежно вызовет революционное преобразование в управлении и производстве. Для развития ВТ необходимы технические средства, в первую очередь, компьютеры. Должна получить дальнейшее развитие теория компьютеров и компьютеризации, т. е. теория математического обеспечения — алгоритмизация и программирование, теория решения различных задач на компьютерах, теория взаимодействия самих компьютеров между собой — теория и практика создания информационно-вычислительных систем и сетей, теория эффективного использования компьютеров потребителями, теория эффективности, рациональности создания средств ВТ, удобство пользования ими потребителем и пр.

Таким образом, информатика — это не вычислительная техника (компьютеры), а вычислительная техника (компьютеры) — не информатика. Это разные области знания и деятельности, их заменить друг другом невозможно. Смещение этих понятий не только антинаучно, но и вредно для практики. Так, недооценка информационного обеспечения при создании АСУ в 60—70 гг. в СССР, гипертрофированный приоритет ВТ перед информатикой обусловили более низкую эффективность и даже порой отрицание АСУ. Информатика и ВТ (компьютеры) на длительном и начальном этапах развивались независимо. С созданием более совершенных компьютеров информатика как информационная технология, а компьютер как техническое средство этой технологии, оказались взаимосвязаны и иногда настолько сильно, что одно понятие подменяют другим. Учитывая, что компьютеризация (комплексная проблема применения компьютеров) развивается опережающими темпами, некоторые ведущие представители компьютерного направления склонны рассматривать информатику как составную часть, входящую в ВТ, в лучшем

случае как часть теории компьютеров, принимая при этом ту информацию, которая нужна лишь для понимания алгоритмизации и программирования. Само же информационное обеспечение, информационная технология вроде бы не отрицается, но то, что именно она является основой информатики, нигде, никем из них никогда даже не упоминается.

Между тем и информатика и ВТ являются самостоятельными, смежными, взаимосвязанными областями знаний, каждая из которых имеет свои цели и задачи, область знаний. Например, как агрономию (основную сельскохозяйственную науку) нельзя заменить сельскохозяйственным машиностроением (трактором), так и информатику в принципе нельзя подменить вычислительной техникой (компьютером). Только взаимное объединение усилий, тесное сотрудничество этих двух важных отраслей кибернетики позволит успешно решать задачи повышения эффективности общественного производства. Информатика и ВТ взаимосвязаны и также взаимосвязаны процессы информатизации и компьютеризации, которые развиваются на их основе (см. рис. 1).

В СССР с целью успешного решения проблемы взаимосвязи и развития информатики и вычислительной техники осуществлен ряд мероприятий общегосударственного назначения.

Создание отделения информатики в АН СССР позволило официально признать информатику как самостоятельное, крупное и перспективное научное направление и своеобразно поставить задачу дальнейшего ускорения развития информатики как науки.

Создан Госкомитет по вычислительной технике и информатике. В задачи его входит объединение всех научных, производственных и других усилий в области ВТ с целью ускоренного и более совершенного производства ВТ, и в первую очередь современных компьютеров, создание перспективных, опережающих практику решений индустриализации и коллективизации в области программного обеспечения, оказание шеф-монтажа ВТ, компьютерного сервиса и пр. Такая научно- и капиталоемкая индустрия, как ВТ, должна быть высокоэффективной по своим возможностям и эффективно использоваться потребителем. Назрела задача своеобразной коллективизации вычислительных средств, создания экономического механизма эффективного использования этих современных производительных сил, необходимы дальнейшие организационно-структурные и другие решения, которые приведут в соответствие общественную значимость, высокую стоимость и назначение этих перспективных и эффективных средств обработки информации.

Ответственность за информационное обеспечение НТПУ, весь комплекс вопросов «организации научной информации в стране» возложен на Госкомитет СССР по науке и технике [1, с. 240]. Всесоюзный институт научной и технической информации ГКНТ СССР и АН СССР, как головной всесоюзный информационный

институт, уже более 30 лет издает широко используемые в СССР и за рубежом реферативные журналы «Научно-техническая информация», «Информатика», журнал «Научно-техническая информация», экспресс-информацию «Информатика» и др.

Это означает в целом, что информатика и ВТ рассматриваются как важнейшие рычаги ускоренного развития экономики нашей страны.

В 1985 г. в средних школах СССР введено обязательное обучение основам информатики и вычислительной техники, т. е. осуществляется упреждающая подготовка рабочей смены на принципиально новой, информационно-компьютерной основе для условий компьютеризованного производства.

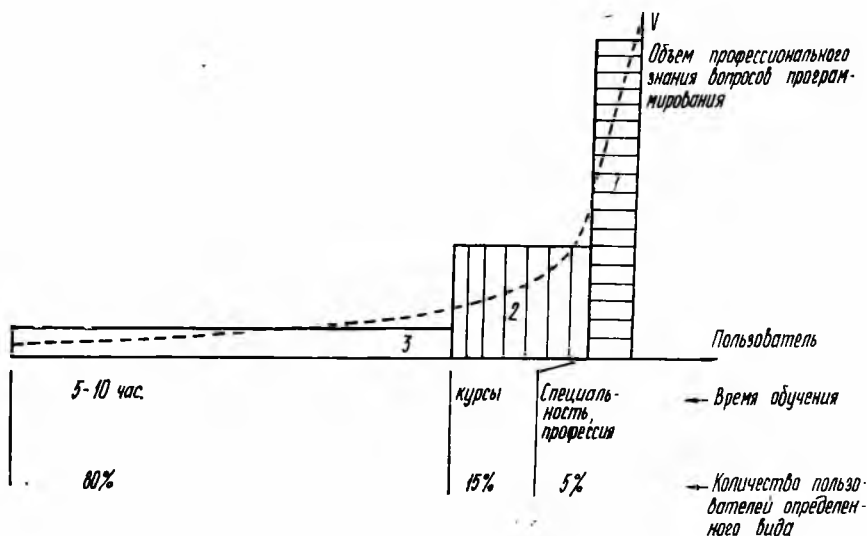


Рис. 2.

Однако процессы информатизации и компьютеризации порождает ряд проблем, например, определение и реализация необходимых методов и средств информационного обеспечения различных задач, решаемых специалистами; разработка и внедрение компьютеров, особенно массового назначения — персональных ЭВМ (ПЭВМ); обучение потребителей — пользователей ЭВМ (и особенно массового пользователя, который взаимодействует с ПЭВМ) основам технологии работы на компьютерах, повышение уровня информационной и компьютерной грамотности.

В настоящее время в СССР наблюдается тенденция диктата производителей ВТ пользователям, потребителям компьютеров. Это особенно заметно на уровне ПЭВМ. Так, школьный курс «Основы информатики и ВТ» не дает основ информатики как информационного обеспечения решаемых задач, он знакомит

с алгоритмизацией, программированием и способствует овладению практическими навыками работы на ЭВМ. При этом массовому пользователю предлагается обязательное изучение языков программирования (пусть даже простейших типа БЭЙСИК). Эта необходимость объясняется конструкцией ПЭВМ.

Как показывает зарубежный и отечественный опыт, это неверная посылка. Примерный объем обучения программированию для различных видов пользователей: 1 — профессиональный программист; 2 — специалист определенного профиля, овладевший основами программирования; 3 — массовый пользователь (домохозяйка, школьник, специалист, руководитель и др.) иллюстрирует рис. 2. Как видно, массовому пользователю знание даже примитивных основ программирования не нужно. Обучение им можно квалифицировать как попытку переноса сложностей решения конструкторских проблем производителя ПЭВМ на пользователя, как стремление облегчить решение своих задач за счет массового пользователя (по такой логике можно было бы каждого телезрителя заставить овладеть приемами радиомонтажа и технического обслуживания телевизора). Массовому потребителю необходимо знание ПЭВМ в объеме 5—10 ч., в противном случае это или не массовый пользователь или ему дается объем знаний, превышающий требуемый.

Во-вторых, необходимо осознать, что знание основ информатики как информационного обеспечения решаемых задач, как умение использовать соответствующие данной задаче информационные ресурсы, массивы информации, банки данных, знаний — необходимое условие решения любой задачи, а не дань моде.

Одна из сложнейших комплексных проблем информатики, кибернетики, бионики и других областей знания — создание искусственного интеллекта. Решение этой проблемы основано на глубоком проникновении в процессы информатизации и компьютеризации мышления, созданию на современной автоматизированной основе таких информационно-логических систем, которые по ряду операций будут успешно соперничать с человеческим интеллектом, а в некоторых случаях — опережать его. Информатика как новейшая информационная технология, как наука о сущности информации, способах и средствах ее организации, хранения, переработки и использования будет краеугольным камнем решения этой проблемы.

Информационное обеспечение получило широкое и комплексное развитие, реализуется как в обычном письменном, бумажном документе, так и до автоматизированного банка данных включительно. Именно поэтому осознание роли и места информации, информатики в целом в нашей деятельности, умение ее создавать, обрабатывать и воспринимать с использованием современных технических средств (и не только компьютеров) является главной задачей информатики и ВТ, а следовательно, и процессов информатизации и компьютеризации.

Список литературы: 1. *Материалы XXVII съезда КПСС*. М., 1986. 352 с. 2. *Бозм Б. У.* Инженерное проектирование программного обеспечения: Пер. с англ. М., 1985. 512 с. 3. *Винокуров В. А., Зуев К. Н.* Актуальные проблемы развития вычислительной техники//Коммунист. 1985. № 5. С. 18—29. 4. *Глушков В. М.* Основы безбумажной информатики. М., 1982. 552 с. 5. *Громов Г. Р.* Национальные информационные ресурсы: проблемы промышленной эксплуатации. М., 1985. 240 с. 6. *Индустрия информатики*//Правда. 1986. 17 авг. 7. *Кибернетика: Становление информатики*. М., 1986. 192 с. 8. *Курбаков К. И.* Информационно-логические системы. М., 1967. 48 с. 9. *Михалевич В. А., Каныгин Ю. Н.* Пирамиды из электроники//Правда. 1987. 7 марта. 10. *НТР: Проблемы и решения*//Бюл. всесоюз. о-ва «Знание». 1985. № 2. С. 2; № 10. С. 4. 11. *Персональные компьютеры*. Информатика для всех. М., 1987. 149 с. 12. *Радкевич И. В.* О компьютере без дифирамбов//Лит. газ. 1986. 17 сент. 13. *Ракитов А. В.* Информатизация общества и стратегия ускорения//Правда. 1987. 23 янв. 14. *Синяк В. С., Агаджанян С. И.* Информационное обеспечение АСУ. М., 1976. 136 с.

Поступила в редколлегию 19.10.87

УДК 62.506 : 007.52

В. А. ИЛЬИН, Л. В. БАРАБЫШКИНА

ПЛАНИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РОБОТОВ В НЕИЗВЕСТНОЙ СРЕДЕ

В настоящее время алгоритмически хорошо разработаны подходы к планированию действий в интеллектуальных системах, когда планирование осуществляется в условиях полного знания о возможных ситуациях и взаимном расположении объектов среды, с которыми работает система [1]. Однако для широкого круга практических задач получение полной информации о среде крайне затруднительно или принципиально невозможно. Подобные ситуации возникают при планировании действий исследовательского и сборочного роботов, а также последовательности операций в гибком производственном модуле.

При разработке теории и алгоритмов планирования действий в условиях неопределенности предлагают использовать оценки правдоподобия, приписываемые возможным состояниям среды и результатов действий. Оценки следует строить на основе вероятностной, размытой или модальной логик и др. [2, 3]. Однако внедрение в практику данных подходов осложнено трудностью обоснованного выбора значений оценок правдоподобия и их последующего улучшения, а также трудностью алгоритмизации процессов планирования с применением подобного рода формализаций.

Нами разработан подход к планированию действий интеллектуальных роботов (ИР) в условиях неполной, накапливающейся в процессе функционирования информации о среде. Сущность подхода состоит в следующем. Пусть состояние ИР и известной части среды описывается вектором, матрицей или строкой символов. Заданы начальное и конечное состояния. На

основе информации, доставляемой сенсорной системой ИР и позволяющей детально определить состояния ИР и среды в окрестности текущего состояния, формируется конечный набор таких состояний, в одно из которых возможен переход за один шаг из текущего состояния. Под алгоритмом планирования понимается правило, которое для каждого шага движения ИР выбирает состояние на основе последовательности пройденных состояний и сформированного локального множества возможных состояний. После выбора состояния осуществляется переход в него. На основе сенсорной информации формируется новое локальное множество возможных состояний и т. д. В основе правила выбора состояний из множества возможных лежит мера различия между текущим и целевым состояниями. Моделированием на ЭВМ проиллюстрирована работоспособность и вычислительная простота алгоритмов на основе предлагающегося подхода.

Постановка задачи. Рассмотрим подробно задачу планирования действий робота-сборщика в условиях неполной информации о внешней среде. Пусть в поле зрения ИР могут возникать объекты из множества $\{A_i, i=1, \dots, N\}$. Объекты возникают по одному в произвольном порядке, что соответствует неупорядоченной подаче деталей и узлов из разных мест на пункт (или участок) сборки. В рабочем пространстве ИР находится сборочный стол, на котором поступающие в произвольном порядке детали должны быть расставлены ИР в заранее заданном порядке, называемом целевым состоянием или целевым расположением. Предполагается, что необязательно все объекты A_1, \dots, A_N присутствуют в целевом расположении. Считаем также, что в рабочем пространстве ИР находится некоторое число промежуточных рабочих ячеек, где поступающие объекты могут накапливаться, переставляться, переформироваться. Итак, пусть целевое состояние задается следующей упорядоченной последовательностью объектов: $\{A_{s_1}, A_{s_2}, \dots, A_{s_{N_1}}\}$, $N_1 \leq N$, указывающей, что на сборочный стол сначала должен быть подан объект A_{s_1} , затем A_{s_2} , A_{s_3} и т. д. Пусть количество промежуточных рабочих ячеек равно m . Ячейке с номером 1 сопоставляется входная ячейка (или конвейер), где по одному появляются объекты из серии A_1, \dots, A_N , ячейке с номером m сопоставляется сборочный стол. Предполагается, что ИР снабжен некоторым исполнительным устройством (например, манипулятором), осуществляющим перестановку объектов между ячейками и сборочным столом.

Предполагается, что из каждой ячейки 2, 3, ..., m объекты могут быть взяты только в порядке, обратном тому, в котором они туда помещались. Вводим целочисленную величину $n(j, i)$, $j=1, \dots, r_i$; $i=1, \dots, m$, значение которой равно тому номеру объекта из серии A_1, \dots, A_N , который находится в ячейке с номером i при условии, что до него в ячейку i помещено $j-1$ объектов. Величина $n(j, i)$ равна 0, если в ячейке i находится меньше,

чем $j-1$ объектов. Таким образом, состояния в рассматриваемой задаче задаются таблицей $b = \|n(j, i)\|$ с числом m столбцов и с числом $r_i, i=1, \dots, m$, элементов в каждом столбце. Целевое расположение, следовательно, определяется классом B_T таблиц, в каждой из которых $n(j, m) = S_j, j=1, \dots, N_1, n(j, m) = 0, j = N_1+1, \dots, r_m$, а элементы $n(j, i), j=1, \dots, r_i, i=1, \dots, m-1$, соответствуют какому-либо произвольному расположению $N-N_1$ объектов в первых $m-1$ ячейках. При этом не исключается случай $n(j, i) = 0, j=1, \dots, r_i, i=1, \dots, m-1$, соответствующий отсутствию в рабочем пространстве ИР каких-либо других объектов, кроме $A_{1, \dots}, A_{S_{N_1}}$, или соответствующий случаю, когда $N_1 = N$. В последней ситуации целевое множество B_T вырождается в единственное состояние.

Пусть в некоторый момент времени t_k состояние задано таблицей $b(t_k), k=1, 2, \dots$. Перечень возможных действий ИР задается в виде

$$D = \{d(i, j), i \neq j, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, m\},$$

где действие $d(i, j)$ при фиксированных i и j заключается в переносе объекта из ячейки i в ячейку j . Для каждого состояния в $b(t_k), k=1, 2, \dots$ не все действия из D осуществимы в силу того, например, что не во всех ячейках могут находиться объекты или некоторые ячейки могут быть уже заполнены и в них нельзя помещать объекты. Через $D(b(t_k))$ обозначим множество действий, осуществимых из состояния $b(t_k), k=1, 2, \dots$. Каждому действию из множества $D(b(t_k))$ соответствует некоторое новое состояние $b(t_{k+1})$, являющееся результатом выполнения действия. Через $B(b(t_k))$ обозначим множество состояний, которые могут возникнуть в результате применения действий из $D(b(t_k)), k=1, 2, \dots$.

В каждый момент времени $t_k, k=1, 2, \dots$ состояние $b(t_k)$ меняется не только в результате совершения действия, но и в результате появления нового объекта, заранее неизвестного, в ячейке с номером 1.

Необходимо по последовательности состояний $b(t_k)$ и множеств $B(b(t_k)), k=1, \dots, n$, так выбирать действие на шаге $(n+1), n=1, 2, \dots$, чтобы в конечном итоге при каком-то k_0 выполнялось соотношение $b(t_{k_0}) \in B_T$.

Мера различия. Введем меру различия между состояниями, задаваемыми в виде таблиц, определенных выше. Пусть даны два состояния b_1 и b_2 :

$$b_1 = \|n_1(j, i)\|, \quad b_2 = \|n_2(j, i)\|.$$

Меру различия $f(b_1, b_2)$ зададим в виде

$$f(b_1, b_2) = \sum_{s=1}^{N_0} c_s f_s(b_1, b_2), \quad (1)$$

где $c_s, s=1, \dots, N_s$ — весовые коэффициенты; N_0 — количество объектов, фигурирующих в описании состояний b_1 и b_2 ; $f_s(b_1, b_2)$ — минимальное количество действий, требующихся для перестановки объекта $A_s, s=1, \dots, N_0$, из положения, в котором он находится в таблице b_1 , в положение, в котором он находится в таблице b_2 . Предполагается, что в описаниях состояний b_1 и b_2 фигурируют одни и те же объекты. Если в состоянии b_1 отсутствует некоторый объект, имеющийся в b_2 , то соответствующее этому объекту значение $f_s(b_1, b_2)$ принимается равным какому-либо положительному числу, одинаковому для всех таких объектов. Если же в описании b_2 нет объекта, имеющегося в b_1 , то соответствующее $f_s(b_1, b_2)$ считаем неопределенным и, следовательно, неопределенной является и мера $f(b_1, b_2)$. Введем определение величин $f_s(b_1, b_2), s=1, \dots, N_0$, для объектов присутствующих в описаниях состояний b_1 и b_2 .

Рассмотрим несколько случаев расположения объекта A_s .

Случай 1. Объект A_s в состоянии b_1 находится в ячейке i_1 , а в состоянии b_2 — в ячейке $i_2, i_1 \neq i_2$. Пусть положение объекта A_s в i_1 задается номером j_1 , а в i_2 — j_2 . Через q_{i_1} и q_{i_2} обозначаем количество объектов, находящихся соответственно в ячейках i_1 и i_2 в состоянии b_1 . Введем величины

$$d_s^{(1)}(b_1, b_2) = q_{i_1} - j_1 + 1, \quad (2)$$

$$d_s^{(2)}(b_1, b_2) = \begin{cases} q_{i_2} - j_2 + 1, & \text{если } q_{i_2} \geq j_2, \\ j_2 - q_{i_2} - 1, & \text{если } j_2 > q_{i_2}. \end{cases} \quad (3)$$

Смысл (2), (3) состоит в следующем. Для того, чтобы объект A_s переместить из ячейки i_1 в ячейку i_2 , необходимо, прежде всего, убрать те объекты из i_1 , которые были помещены туда после объекта A_s (находятся сверху объекта A_s). Для этого необходимо проделать $q_{i_1} - j_1$ перестановок объектов, что и записано в (2). Добавление единицы в (2) отражает тот факт, что объект A_s сам будет переставлен из ячейки i_1 в i_2 . Первая строка (3) определяет количество действий (количество перестановок объектов), которые необходимо совершить, чтобы освободить место с номером j_2 в ячейке i_2 . Таких перестановок нужно сделать $q_{i_2} - (j_2 - 1) = q_{i_2} - j_2 + 1$. В случае, если $j_2 > q_{i_2}$, то прежде чем поставить объект в ячейку i_2 на место с номером j_2 , необходимо доставить в ячейку i_2 $j_2 - q_{i_2}$ объектов, включая и объект A_s . Так как действие по перестановке объекта A_s учтено в (2), то, следовательно, необходимо доставить только $j_2 - q_{i_2} - 1$ объектов. Итак, если $i_1 \neq i_2$, то $f_s(b_1, b_2)$ задается формулой

$$f_s^{(1)}(b_1, b_2) = d_s^{(1)}(b_1, b_2) + d_s^{(2)}(b_1, b_2), \quad (4)$$

где $d_s^{(1)}$ и $d_s^{(2)}$ определяются по (2), (3).

Случай 2. Объект A_s в состоянии b_1 находится в ячейке i_1 , а в состоянии b_2 — в $i_2, i_1 = i_2 = i$. Через q_i обозначаем количест-

во объектах в ячейке i в состоянии b_1 , через j_1 и j_2 — положения A_s в состояниях b_1 и b_2 . Введем величину

$$f_s^{(2)}(b_1, b_2) = \begin{cases} q_i - 2j_1 + 2 + j_2, & \text{если } j_1 < j_2 \leq q_i \\ q_i - j_2 + 2, & \text{если } j_2 < j_1 < q_i \\ q_i - 2j_1 + 2 + j_2, & \text{если } j_1 \leq q_i < j_2 \\ 0, & \text{если } j_1 = j_2. \end{cases} \quad (5)$$

Первая строка в формуле (5) определяет минимально возможное количество действий, которые нужно совершить, чтобы объект A_s из положения j_1 переставить в положение j_2 при условии, что $j_1 < j_2 \leq q_i$. Это количество действий складывается из $q_i - (j_1 - 1)$ действий по перестановке объектов, находящихся сверху объекта A_s в ячейке i , и из $j_2 - (j_1 - 1)$ действий по перемещению в ячейку i недостающих до количества j_2 объектов, включая и объект A_s . Сумма $q_i - (j_1 - 1) + j_2 - (j_1 - 1)$ и дает величину $q_i - 2j_1 + j_2 + 2$. Аналогично разъясняются три другие строчки в формуле (5). Окончательно $f_s(b_1, b_2)$ задаем в виде

$$f_s(b_1, b_2) = \begin{cases} f_s^{(1)}, & \text{если } i_1 \neq i_2 \\ f_s^{(2)}, & \text{если } i_1 = i_2, \end{cases}$$

где $f_s^{(1)}$ и $f_s^{(2)}$ задаются формулами (4), (5).

В зависимости от выбора коэффициентов c_s , $s=1, \dots, N_0$, получаются алгоритмы с разными свойствами. В случае, когда целевое состояние представляет собой упорядоченное расположение объектов A_1, \dots, A_N , выбор коэффициентов согласно следующим условиям: $c_s = 1$, если $f_r(b, b_r) = 0$ для $r=1, \dots, s-1$, и $f_s(b, b_r) \neq 0$; $c_s = 0$, если есть хотя бы один номер $r < s$, для которого $f_r(b_s, b_r) \neq 0$ — обеспечивает достижение ИР этого упорядоченного расположения. Коэффициенты в этом случае являются переменными величинами, принимающими значение 0 и 1 в зависимости от текущего состояния.

Алгоритмы планирования. Наиболее простой алгоритм планирования действий ИР состоит в выборе $b(f_k)$, $k=1, 2, \dots$ из условия уменьшения меры различия между текущим и целевым состояниями. Но если ИР попадает в ситуацию, из которой невозможен переход в состояние, уменьшающее меру различия, то происходит заикливание ИР в этой ситуации.

Пусть $b(t_1), b(t_2), \dots, b(t_n)$ — последовательности состояний, реализованных ИР в моменты времени $t_1 < t_2 < \dots < t_n$. Невозможность перехода робота из состояния $b(t_n)$ в состояние, уменьшающие меру различия между текущим и целевым состояниями, означает, что $b(t_n)$ — тупиковое. Следовательно, можно предположить, что и близкие к состоянию $b(t_n)$ состояния тоже тупиковые. Для того чтобы ИР мог перейти в состояние, из которого затем можно беспрепятственно двигаться к цели, необходимо как можно дальше отойти от $b(t_n)$ и ближайших к нему состояний. Так как последовательность состояний $b(t_1)$,

..., $b(t_{n-1})$ привела ИР в тупиковое состояние $b(t_n)$, то в качестве характерных точек окрестности уместно выбрать состояния $b(t_{n-1})$, $b(t_{n-2})$, ..., т. е. при попадании в тупиковое состояние уместнее всего не возвращаться в предыдущие состояния, а как можно дальше отходить от них.

Приведенные рассуждения, разумеется, нельзя считать строгими. Они играют всего лишь роль идеи и дают возможность сконструировать и объяснить формальный алгоритм.

Пусть $b^{(s)}(t_{n+1})$, $s=1, 2, \dots$ — одно из состояний множества $B(t_{n+1})$. Рассмотрим разность

$$f(b^{(s)}(t_{n+1}), b(t_i)) - f(b(t_n), b(t_i)),$$

которая принимается за меру отклонения состояния $b^{(s)}(t_{n+1})$ от состояния $b(t_i)$. Состояние $b^{(s)}(t_{n+1})$ дальше отстоит от состояния $b(t_i)$, чем $b(t_n)$, если

$$f(b^{(s)}(t_{n+1}), b(t_i)) - f(b(t_n), b(t_i)) \geq 0. \quad (6)$$

Условие (6) принимается в качестве условия перехода в состояние $b^{(s)}(t_{n+1})$, уводящее от состояния $b(t_i)$.

Распишем подробно один алгоритм планирования действий.

Шаг 1. Пусть пройдены состояния $b(t_0), \dots, b(t_n)$ $n=0, 1, \dots$

Если

$$f(b(t_{n-1}), B_T) > f(b(t_n), B_T),$$

то $b(t_{n+1})$ выбирается из условия

$$\min_{b \in B(t_{n+1})} f(b, B_T).$$

Если $f(b(t_{n-1}), B_T) \leq f(b(t_n), B_T)$, то алгоритм переходит к шагу 2.

Шаг 2. Из множества $B(t_n)$ выбрасываются состояния, которые не удовлетворяют неравенству

$$f(b^{(s)}(t_{n+1}), b(t_{n-1})) - f(b(t_n), b(t_{n-1})) \geq 0,$$

полученному из (6) при $i=n-1$. После выбрасывания остается множество $B^{(1)}(t_{n+1}) \subset B(t_{n+1})$. Из $B^{(1)}(t_{n+1})$ выбрасываются состояния, не удовлетворяющие (6) при $i=n-2$.

Остается множество $B^{(2)}(t_{n+1}) \subset B^{(1)}(t_{n+1})$. Процесс выбрасываний состояний продолжается до тех пор, пока не исчерпаются состояния $b(t_{n-1}), b(t_{n-2}), \dots, b(t_0)$, либо пока на некотором шаге q не появится пустое множество $B^{(q)}(t_{n+1})$. Состояние $b(t_{n+1})$ выбирается из условия

$$\min_{b \in B^{(q-1)}(t_{n+1})} f(b, B_T).$$

Если состояния последовательности $b(t_{n-1}), \dots, b(t_0)$ исчерпаны а пустого множества не возникло, то $b(t_{n+1})$ выбирается из условия

$$\min_{b \in B^{(n)}(t_{n+1})} f(b, B_T),$$

где $B^{(n)}(t_{n+1})$ — множество состояний, оставшихся после всех выбрасываний из $B(t_{n+1})$. Переход к шагу 3.

Шаг 3. Если $b(t_{n+1}) \in B_T$, то алгоритм заканчивает работу, иначе производится переход к шагу 1 с увеличением n на 1.

С точки зрения теоретико-графовой интерпретации, применяемой в задачах эвристического поиска [1], алгоритмы рассматриваемого подхода являются алгоритмами поиска в глуби-

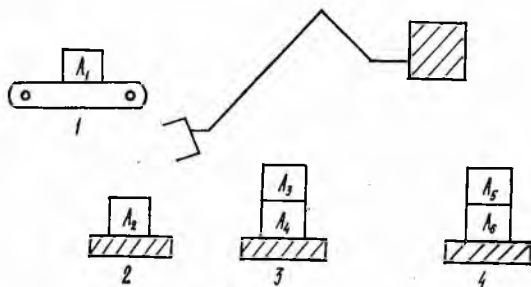


Рис. 1

ну. В отличие от эвристического поиска поиск последовательности действий в нашем случае рассматривается на заранее неизвестном графе. Известно, что алгоритмы поиска в глубину в общем случае не гарантируют достижение целевого состояния. Однако в нашем случае это не так. Введение меры различия позволяет решать задачу анализа сходимости алгоритмов планирования. Для этого все пространство состояний необходимо рассматривать как топологическое с топологией, порождаемой введенной мерой различия. Первые результаты в этом направлении опубликованы в работе [4].

Пример. Рассмотрим пример реализации на ЭВМ алгоритма, планирования действий робота-сборщика.

Рассматривается случай, когда количество рабочих ячеек равно 4 (рис. 1). Первая ячейка является входной и соответствует конвейеру, поставляющему объекты. Ячейки с номерами 2 и 3 являются рабочими ячейками, ячейка с номером 4 — сборочный стол, но в рассматриваемом примере предполагается, что ячейка 4 может использоваться и для промежуточного хранения объектов. Предполагается, что в поле зрения ИР на конвейере могут появляться объекты восьми типов, которые мы обозначаем, как кубики с соответствующими номерами. Последовательность появления объектов A_1, \dots, A_8 заранее неизвестна. Цель ИР заключается в составлении пирамиды на сборочном столе из пяти кубиков в порядке возрастания номеров, начиная с номера 1. В качестве меры различия между состояниями использована мера (1). Состояния описываются матрицами $\|n(j, i)\|$, $j=1, \dots, 5$; $i=1, \dots, 4$ (рис. 2), где определения величин $n(j, i)$ даны выше. На рис. 2 первым представлено целевое состояние. Далее приведена подпоследовательность из

последовательности состояний $b(t_0), b(t_1), \dots$, которая была получена согласно алгоритму планирования, описанному выше. Объекты подавались в последовательности $A_2, A_4, A_5, A_6, A_3, A_7, A_8, A_1$.

На шаге 13 ИР попадает в тупиковое состояние. Начинает действовать процедура шага описанного выше алгоритма. На-

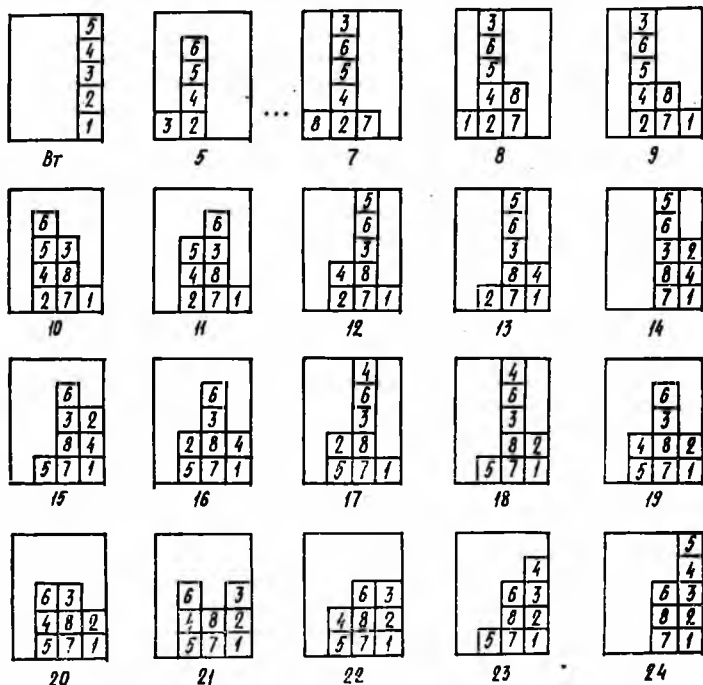


Рис. 2

чая с шага 16, ИР действует согласно шагу 1. Общее число шагов по достижению целевого состояния равно 24. Время работы программы, реализующей алгоритм планирования, на ЭВМ ЕС 1033 — 3 мин.

Список литературы: 1. Нильсон Н. Принципы искусственного интеллекта. М., 1985. 373 с. 2. Аристова М. В., Игнатьев М. Б., Караванов Э. В. Логико-необходимая часть инструментария искусственного интеллекта//Изв. АН СССР. Сер. Техн. кибернетика. 1983. № 3. С. 128—133. 3. Ефимов Е. И., Поспелов Д. А. Семантические модели в задачах планирования для систем искусственного интеллекта//Изв. АН СССР. Сер. Техн. кибернетика. 1977. № 5. С. 60—68. 4. Ильин В. А., Ильина Т. Р., Кориков А. М. Вопросы теории алгоритмов управления движением роботов в условиях неполной информации о внешней среде//Информационные и управляющие системы роботов. М., 1982. С. 170—177.

Поступила в редколлегию 30.06.87

В. В. ЛЯШЕНКО, Е. П. ПУТЯТИН, д-р техн. наук, А. Г. РЫСТЕНКО,
В. Т. ХОДАРЕВ

ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Важную роль в создании робототехнических комплексов третьего поколения занимает проблема оцувствления органов управления промышленных роботов [1]. Основополагающее значение в решении этой проблемы отводится системам технического зрения (СТЗ), разработка которых связана с исследованием зрительных функций человека. Трудности, возникающие на пути решения этой задачи, во многом определяются сложностью обработки визуальной информации (изображений) и большим разнообразием приложений СТЗ. Разработка СТЗ также в значительной степени зависит от ее функционального назначения (специализированная, исследовательская, промышленная), определяющего основные требования к параметрам технических и программных средств. Многообразие методов и алгоритмов обработки изображений требует от разработчиков СТЗ оценки их эффективности для различных задач. Комплексное решение вопросов выбора и (или) разработки соответствующего аппаратного и программного обеспечения приводит к необходимости создания специализированных средств, объединенных в инструментальную автоматизированную систему обработки изображений (ИАСОИз). Такая система позволяет автоматизировать многие этапы проектирования и дать оценку эффективности разрабатываемых средств.

Основное назначение ИАСОИз — сервисное, информационное и технологическое обеспечение разработчиков СТЗ. Все аспекты этой проблемы тесно взаимосвязаны между собой, и поэтому такое деление весьма условно. Под сервисным обеспечением здесь понимаются возможности системы управления ИАСОИз по оперативному управлению процессом обработки изображений и оценке его эффективности, наличие простых в обращении средств обмена изображениями между внешними устройствами и обрабатывающими программами, получение справочного материала о состоянии разработки и возможностях системы. Технологическое обеспечение включает средства автоматизации проектирования технических и программных средств (САПР, трансляторы, редакторы, компоновщики, отладчики, эмуляторы и т. п.).

Информационное обеспечение поддерживается двумя специализированными базами данных — базой визуальных данных (БВД) и базой программ обработки изображений (БПОИ). БВД содержит необходимые для отладки и испытаний тестовые,

контрольные и демонстрационные изображения. БПОИ составляет основу прикладного программного обеспечения ИАСОИз и дает возможность использования ранее разработанных программ и выбора алгоритмов с заданными характеристиками. Широкий доступ к БВД и БПОИ независимых разработчиков СТЗ поддерживается соответствующими системами управления.

Содержание изображений в БВД обычно определяется функциональным назначением разрабатываемых СТЗ. Это могут быть образцы промышленных деталей и узлов сборочного производства, печатные платы радиоэлектронной аппаратуры, микросхемы и т. д. Однако необходимость хранения этих изображений в БВД определяется не только их содержанием, но и другими характеристиками, существенными для тех или иных алгоритмов. Например, изображения деталей, полученные в реальных условиях, могут отличаться освещенностью, зашумленностью, фоном, взаимным расположением и т. п. Поэтому информация о таких характеристиках также хранится в БВД, а система управления БВД обеспечивает доступ как непосредственно к этим данным, так и через них — к визуальным данным (выбор изображений с заданными характеристиками). В отличие от известных баз изображений [2] это позволяет планировать и проводить испытания алгоритмов и программ на широком классе изображений, моделируя реальные и экстремальные условия работы СТЗ с целью повышения ее устойчивости и надежности.

Другое отличие БВД для задач СТЗ состоит в возможности хранения последовательности изображений одних и тех же объектов, полученных в последовательные моменты времени. Используя данное отличие, можно моделировать обработку в реальном масштабе времени (например, движение конвейера), что особенно важно на этапе объединения СТЗ с исполнительными устройствами (отладка и испытания динамики манипуляторов, оценка эффективности СТЗ в целом и т. д.).

Для устранения дублирования работ при разработке СТЗ БПОИ включает программы (алгоритмы), наиболее часто используемые в различных приложениях — улучшение качества изображения, фильтрация, построение гистограмм яркости, выделение характерных признаков, контрастирование и т. д.

При разработке программного обеспечения часто возникает задача нахождения приемлемого компромисса между быстродействием программы, требуемым объемом оперативной памяти, универсальностью и специализацией. С этой целью БПОИ содержит группы функционально эквивалентных программ, отличающиеся в пределах каждой группы своими характеристиками (быстродействием, памятью, условиями применения). Эта информация также содержится в БПОИ и позволяет организовать доступ к программам не только по их функциям, входным и выходным параметрам, но и по эксплуатационным характеристикам. Используя данные из БВД, для конкретного приложения

можно выбрать требуемые алгоритмы и программы или сделать заключение о необходимости их разработки. Такой подход к организации БПОИ позволяет существенно расширить ее возможности по сравнению с обычными библиотеками программ.

Целевое и функциональное назначения БВД и БПОИ определили основные проектные решения, положенные в основу их реализации.

БВД и БПОИ имеют двухуровневую организацию, на первом уровне которой хранятся собственно объекты (изображения и программы), а на втором — характеристики объектов первого уровня. Соответствующие системы управления обеспечивают доступ к объектам по запросам как первого, так и второго уровня.

На первом уровне БВД и БПОИ представляют собой совокупности личных (для каждого пользователя) библиотек и общей библиотеки, т. е. доступ к данным осуществляется по уникальному имени объекта (номер изображения, имя программы). Личные библиотеки дают возможность любых манипуляций над объектами (удаление, модификация, переименование и т. д.), обеспечивают защиту данных от несанкционированного доступа и повышают гибкость системы. Общая библиотека доступна для всех пользователей, однако любые изменения в ней запрещены.

Основной единицей хранения и передачи в БВД является кадр — двумерный массив произвольных конечных размеров, представляющий собой оцифрованное стандартное изображение, чаще всего телевизионного типа. Максимальные размеры кадра определяются возможностями аппаратных средств ввода-вывода и визуализации изображений.

Основной единицей хранения и передачи в БПОИ является модуль — загрузочный, объектный или исходный.

Системы управления БВД и БПОИ имеют два режима работы — интерактивный и автоматический. В интерактивном режиме пользователь имеет возможность оперативного доступа к данным, управления их обменом и выполнения вспомогательных функций. Автоматический режим поддерживает взаимодействие программы пользователя с соответствующей системой управления.

Обе базы данных тесно взаимосвязаны друг с другом. При добавлении нового кадра в БВД требуется определить его характеристики для их записи и хранения на втором уровне. С этой целью система управления БВД обращается в БПОИ за соответствующими программами вычисления требуемых характеристик. То же самое происходит при модификации кадров в БВД. Аналогично, при включении новой программы в БПОИ, ее характеристики могут быть получены с помощью данных из БВД.

Системы управления первого уровня были реализованы для вычислительного комплекса ПС-2000/СМ-2М [3], в аппаратную часть которого входят: мониторная подсистема на базе ЭВМ

СМ-2М; мультипроцессор ПС-2000; субкомплекс внешней памяти, включающий накопители на магнитных дисках ЕС-5061 емкостью 29 Мбайт и накопители на магнитных лентах ЕС-5010; штатные периферийные устройства; нестандартное устройство ввода-вывода и визуализации телевизионных изображений.

Кадры, входящие в БВД, хранятся на магнитных дисках. Для повышения скорости обмена с базой данных и более рационального использования дискового пространства работа с дисками ведется как с физическими устройствами.

Программное обеспечение каждой из систем управления делится на три информационно-совместимые независимые подсистемы: генерации, предназначенной для проведения предварительных работ по запуску системы в эксплуатацию (разметка внешних носителей, создание системных каталогов); «Администратор», выполняющая функции, связанные с защитой информации, учетом пользователей и обслуживанием общей библиотеки; управления доступом и обменом данными, выполняющая также ряд сервисных функций (получение копий библиотек, корректировка и печать каталогов и т. д.).

В диалоговом режиме работы реализованы команды трех видов: обмена, сервисные, загрузки и запуска программ.

Команды обмена предназначены для обмена данными между устройствами, входящими в состав комплекса. Сервисные обеспечивают обслуживание библиотек. Команды загрузки и запуска позволяют осуществлять под управлением систем управления БВД и БПОИ выполнение пользовательских программ на СМ-2М и микропрограмм на мультипроцессоре ПС-2000.

Опыт эксплуатации системы даже в таком усеченном виде показал ее высокую эффективность при разработке и отладке алгоритмов и программ в задачах технического зрения роботов.

Список литературы: 1. *Системы очувствления и адаптивные промышленные роботы.* М., 1985. 256 с. 2. *Гимельфарб Г. Л.* Аппаратные средства и особенности программного обеспечения диалоговой цифровой обработки изображений//Зарубежная радиоэлектроника. 1985. № 10. С. 87—128. 3. *База данных визуальной информации на основе вычислительного комплекса ПС-2000/Ляшенко В. В., Орлова И. И., Рыстенко А. Г., Ходарев В. Т.*//Всероюз. шк.-семинар «Бионика интеллекта». Программа и аннотации докладов. Х., 1987. 32 с.

Поступила в редколлегию 03.12.87

В. А. ГОРОХОВАТСКИЙ, канд. техн. наук, В. П. МАШТАЛИР, канд. техн. наук, И. А. КОБЫЛИН

ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИЙ УОЛША ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПРИЗНАКОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Преобразование Уолша (ПУ) наиболее известно среди несинусоидальных ортогональных преобразований [1]. Оно широко применяется в цифровой обработке сигналов, так как может быть вычислено только с использованием операций сложения и вычитания. При формировании признаков дискретных изображений, описываемых матрицами большой размерности, фактор времени является определяющим. Поэтому естественно применить ПУ, а также отдельные функции Уолша в целях построения пространства признаков, имеющего значительно меньшую размерность, чем исходные изображения. Немаловажен и факт наличия быстрых алгоритмов преобразования Уолша (БПУ), а также возможность построения инвариантных описаний на базе ПУ.

Работа посвящена результатам экспериментального исследования ПУ и использования отдельных функций Уолша в целях построения инвариантных признаков и сокращения размерности исходного описания изображений.

Двумерное дискретное ПУ от изображения $B(m_1, m_2)$, $m_1 = 0, N_1, m_2 = 0, N_2$, в матричной форме имеет вид

$$U(u_1, u_2) = \frac{1}{N_1 N_2} H(n_1) B(m_1, m_2) H(n_2), \quad (1)$$

где $H(n)$ — матрица Адамара порядка n , $n_i = \log_2 N_i$, $u_i = \overline{1, N_i}$, $i = 1, 2$. Обратное ПУ определяется как

$$B(m_1, m_2) = H(n_1) U(u_1, u_2) H(n_2). \quad (2)$$

Преобразования (1), (2) можно вычислить с использованием быстрых одномерных алгоритмов ПУ, если вначале осуществлять БПУ для строк исходного изображения $B(m_1, m_2)$, а затем применить БПУ к столбцам полученного массива [1].

В задачах выделения объектов на изображении и определения параметров объектов [2], как правило, предполагают finитность функции яркости объектов в некотором поле зрения. Тогда преобразование смещения объекта $B(m_1, m_2) = B_0(m_1 + l_1, m_2 + l_2)$, где B_0 — эталон, (l_1, l_2) — параметры смещения, эквивалентны преобразованию циклического сдвига с параметрами l_1, l_2 в массиве $B(m_1, m_2)$. При этом предполагается, что преобразование смещения не выводит точек объекта за пределы поля зрения. Тогда можно воспользоваться свойством инвариантности энергетического спектра ПУ к циклическому сдвигу

сигнала [3]. В общем случае одномерный энергетический спектр ПУ определяется как

$$S(r) = U^2(0); \quad S(r) = \sum_{k=2^{r-1}}^{2^r-1} U^2(k), \quad (3)$$

$$r = \overline{1, n}, \quad n = \log_2 N,$$

N — размерность сигнала. Спектр $S(r)$, $r = \overline{0, n}$ инвариантен к преобразованиям смещения. Так, при $N=16$, $n=4$ имеем 5 инвариантов

$$S(0) = U^2(0); \quad S(1) = U^2(1); \quad S(2) = U^2(2) + U^2(3);$$

$$S(3) = \sum_{i=4}^7 U^2(i); \quad S(4) = \sum_{i=8}^{15} U^2(i).$$

Инварианты двумерного изображения могут быть вычислены либо прямым обобщением формул (3) на двумерный случай (двойная сумма), либо по аналогии с двумерным БПУ путем последовательных операций над строками и столбцами. Например, для изображения 16×16 элементов получим 25 инвариантов к смещению $S(r_1, r_2)$, $r_i = \overline{0, 4}$. Этот пример иллюстрирует значительное сокращение информации об изображении при переходе в инвариантное подпространство признаков: исходное изображение представляется 256 коэффициентами (отсчетами яркости), преобразованное — 25. С увеличением размерности изображения этот выигрыш растет.

Для оценки сходства изображений в признаковом пространстве часто используют просто вычисляемую величину

$$L(B, B^*) = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^t |PB(i, j) - PB^*(i, j)|, \quad (4)$$

где $PB(i, j)$ — координата признакового пространства для изображения B ; t — величина, определяющая размерность пространства.

Первая серия экспериментов преследовала цель сокращения полного объема количества коэффициентов ПУ, представляющих изображение. Алгоритм обработки состоял из следующих этапов.

1. Формирование эталонного и входного изображений. Входное изображение отличается от эталонного наличием аддитивного флуктуационного шума с гауссовым распределением амплитуд, т. е.

$$B(m_1, m_2) = B_0(m_1, m_2) + \xi(m_1, m_2), \quad \xi \in N(0, \gamma^2).$$

Действие шума характеризуется соотношением сигнал/шум $\mu = B_c/\tau$, где B_c — среднее значение яркости объекта на нулевом фоне, τ — среднеквадратическое значение шума.

2. Вычисление БПУ входного изображения B по формуле (1).

3. Логическая пороговая обработка функции U с целью обнуления коэффициентов, модуль которых меньше порога δ .

4. Восстановление изображения по формуле (2) (обратное ПУ).

5. Вычисление сходства восстановленного изображения B^* и эталона B_0 (формула (4)), где в качестве признаков использовались непосредственно значения функции яркости.

Эталоном было выбрано двухградационное изображение из 30... 40 точек в пределах 8×8 на поле 16×16 элементов, где объект кодировался значением 1, фон — значением 0.

Вначале были проведены эксперименты для случая отсутствия помех, т. е. когда $\mu = \infty$. Они показали, что для большого разнообразия возможных изображений, ограниченных указанными рамками, могут быть обнулены коэффициенты Уолша с порогом $\delta \approx 0,02$. При этом мера сходства (4) возрастает в пределах 1—30 площади объекта ($8 \times 8 = 64$ элемента) в зависимости от числа отбрасываемых коэффициентов, а максимально возможное число отброшенных коэффициентов колеблется в пределах 32—55. Дальнейшее сокращение объема информации приводит к существенному росту величины (4) (для полностью совпадающих изображений сходство (4) равно нулю).

Эксперименты при наличии шума проводились, исходя из порога δ , выбранного без шума. Исследовался диапазон значений μ в пределах 2—10. Эксперименты показали, что отклонение меры сходства от истинного значения в тех же пределах (до 30 % площади объекта) достигается при меньшем числе отбрасываемых коэффициентов и зависит от значения μ . При $\mu > 8$ результаты практически соответствуют случаю отсутствия шума.

По результатам экспериментов делаем выводы о возможном сокращении количества коэффициентов ПУ в пределах до 10 % от их общего количества. При этом количество отбрасываемых коэффициентов зависит от анализируемого изображения.

Следующая серия опытов на ЭВМ была предназначена для оценки помехозащищенности алгоритмов инвариантного к смещениям распознавания изображений. Последовательность обработки: формирование множества эталонных изображений (16×16 элементов) и текущего изображения, полученного из эталона путем применения преобразования смещения; зашумление текущего изображения аддитивным шумом с уровнем μ ; вычисление инвариантных признаков для эталонов и изображения с использованием (3), количество инвариантов равно 25; принятие решения о классе изображения путем поиска минимума величины (4) на множестве эталонных инвариантов.

Исходные эталонные изображения — ортогональные в смысле существенного отличия от нуля меры (4) пять изображений объектов с теми же параметрами, что и в первой серии экспериментов. Сходство двух различных эталонов близко к их суммарной площади. По результатам экспериментов оценивалась

частота (вероятность) правильного распознавания при фиксированном уровне шума μ . Для каждого значения μ проведена серия из 50 экспериментов.

Эксперименты показали высокую помехозащищенность алгоритмов с использованием инвариантов на базе ПУ. До соотношения сигнал/шум $\mu=1$ обеспечивается безошибочное распознавание. Более того, вероятность $P \geq 0,95$ при $\mu \geq 0,8$. Для сравнения отметим, что алгоритмы распознавания с использованием моментных инвариантов [4] обеспечивают эту же вероятность при значениях $\mu \geq 5$.

По результатам экспериментов делаем вывод о целесообразности применения ПУ для формирования признаков объектов на изображениях, а также о высокой помехозащищенности алгоритмов распознавания с использованием инвариантных свойств ПУ.

Интересным с практической точки зрения представляется использование в задачах выделения признаков изображений не полного набора функций Уолша, задающих ортогональное разложение изображения, а отдельных функций Уолша. В работе [5] предложен интегродифференцирующий фильтр для выделения локальных признаков объектов на изображениях. В основу такого фильтра могут быть положены автокорреляционные функции от функций Уолша

$$g_r(x) = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H wal_r(h) wal_r(x+h), \quad (5)$$

где wal_r — r -я функция Уолша из полного набора $r=0, \overline{H-1}$, $h=1, \overline{H}$ — дискретный аргумент, H — интервал определения функций Уолша, $g_r(x)$ — импульсная характеристика фильтра. Фильтр (5) для отдельных r обладает рядом интересных свойств, например, не реагирует на линейное изменение фона на изображении, обеспечивает более высокое соотношение сигнал/шум на обработанном изображении по сравнению с исходным, позволяет выделять импульсные сигналы с заданными характеристиками.

При проведении экспериментов в качестве входного был выбран одномерный сигнал, соответствующий строке изображения размерностью 32 дискретных элемента. Изображению объекта в таком сигнале отвечает импульс произвольной полярности и фиксированной длительности l . Одномерный сигнал искажался аддитивным шумом с интенсивностью μ . Изучался максимальный отклик фильтра (5) и соответствие координат этого отклика центру импульсного сигнала при различных μ .

Согласно расчетам фильтр, построенный с использованием $wal_1(h)$ при $\mu \geq 3$, позволяет с точностью до ± 1 элемента дискретизации и вероятностью $P \approx 0,75$ правильно определять координату центра импульса в интервале длительностей $3 \leq l \leq 15$. Для

$7 \leq l \leq 13$ вероятность достигает 0,95 и более, а для отдельных значений, например, $l=7$, $P \approx 0,98$. Фильтр с использованием $wal_2(h)$ более избирателен к длительностям сигнала. Он обеспечивает $P \geq 0,96$ для $3 \leq l \leq 7$. Вне этого диапазона вероятность резко падает: при $l=9$, например, $P \approx 0,72$, а при $l=11$ значение $P \approx 0,43$. Еще большей избирательностью обладает фильтр с $wal_3(h)$. В диапазоне $3 \leq l \leq 7$ значение $P = 0,62 \dots 0,88$. Для других l значение P близко к нулю. Фильтры с другими функциями Уолша, имеющими большую частотность, отличаются высокой вероятностью определения координат импульсов лишь для отдельных, как правило, небольших длительностей импульсов: $l=2$, $l=3$.

Аналогично соотношению (5) может быть построен и двумерный фильтр на базе автокорреляционных функций двумерных дискретных функций Уолша.

Таким образом, результаты применения функций Уолша в задачах формирования признаков изображений говорят о перспективе этого подхода и его широких возможностях, связанных прежде всего с простотой реализации.

Список литературы: 1. Ахмед Н., Рао К. Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов. М., 1980. 247 с. 2. Баклицкий В. К., Бочкарев А. М., Мусьяков М. П. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации. М., 1986. 216 с. 3. Трахтман А. М., Трахтман В. А. Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах. М., 1975. 208 с. 4. Путьтин Е. П., Гороховатский В. А. Исследование алгоритмов нормализации при инвариантной классификации изображений// АСУ и приборы автоматики. 1982. Вып. 64. С. 4—8. 5. Метод экстремально-логической фильтрации в задачах автоматической сегментации изображений//Е. П. Путьтин, В. А. Гороховатский, О. Н. Ерьсько, В. И. Стрельченко//АСУ и приборы автоматики. 1987. Вып. 83. С. 3—8.

Поступила в редколлегию 09.12.87

УДК 512.541

В. Ф. КНЯЗЕВА, канд. физ.-мат. наук, Г. В. МИХАЙЛИК

О РАЗЛОЖЕНИИ МАКСИМАЛЬНОЙ АБЕЛЕВОЙ ПОДГРУППЫ ГРУППЫ 1-ТРЕУГОЛЬНЫХ МАТРИЦ В ПРОИЗВЕДЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ПОДГРУПП

Описание работы органов чувств и мыслительной деятельности человека может успешно осуществляться с помощью аппарата алгебры конечных предикатов. Особую роль при этом играют бинарные предикаты, заданные на группах преобразований множеств. В связи с чем возникает потребность в теоретико-групповых результатах, описывающих структуру конкретных классов групп преобразований.

Большой интерес в этом плане представляет изучение подгрупп полной линейной группы $GL(n, F)$ ($n \times n$)-матриц над произвольным полем F . В частности, заметную роль играют теоремы о структуре абелевых подгрупп группы $UT(n, K)$ — всех верхних 1-треугольных матриц над произвольным конечным полем K . Это объясняется тем, что группа $UT(n, K)$ в некотором смысле универсальна, являясь силовой p -подгруппой полной линейной группы $GL(n, K)$, где p — такое простое число, что $\text{char } K = p$.

Нами исследовано разложение максимальных абелевых подгрупп группы верхних 1-треугольных матриц над конечным полем в произведение циклических подгрупп. Каждый элемент $g = \|a_{ij}\| \in UT(n, F)$ однозначно определяется элементами верхнего треугольника соответствующей ему матрицы. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать только матричные элементы

$$\{a_{ij}(g) | \forall g \in UT(n, F) \forall i, j \in [1, n] : i < j\}$$

и соответствующие им клетки.

Лемма 1. Пусть A — произвольная максимальная абелева подгруппа группы $UT(n, F)$, где F — произвольное поле; $a_{ij}(g)$ — матричные элементы, рассматриваемые как функции от элементов $g \in A$ со значениями в поле F . Пусть $a_{i_1, j_1}(g), \dots, a_{i_s, j_s}(g)$ — произвольная максимальная линейно независимая подсистема функций $a_{ij}(g)$ на A . Тогда 1) произвольный элемент $g \in A$ однозначно определяется элементами $a_{i_1, j_1}(g), \dots, a_{i_s, j_s}(g)$; 2) для любого s -мерного вектора $(\alpha_1, \dots, \alpha_s)$, $\alpha_i \in F$ существует и единственна такая матрица $g \in A$, что $a_{i_r, j_r}(g) = \alpha_r$ ($r = 1, \dots, s$).

Доказательство. Утверждение 1 является элементарным следствием максимальной системы функций $a_{i_1, j_1}(g), \dots, a_{i_s, j_s}(g)$. Для доказательства утверждения 2 рассмотрим следующие алгебры нильпотентных матриц:

$$N = \{g - e\}_{g \in UT(n, F)}, \quad M = \{g - e\}_{g \in A},$$

где e — единица группы $UT(n, F)$. Очевидно, M — максимальная коммутативная подалгебра в алгебре N . Любой элемент $g \in A$ может быть представлен в виде $g = t + e$, где $t \in M$. В силу аддитивности функций $a_{ij}(g)$ для любых $i, j \in [1, n] : i < j$ имеем

$$a_{ij}(g) = a_{ij}(t + e) = a_{ij}(t) + a_{ij}(e) = a_{ij}(t).$$

Таким образом, достаточно доказать лемму для $g \in M$.

Пусть h_1, \dots, h_s — базис M как линейного пространства над полем F . Тогда M есть множество всех матриц вида

$$\lambda_1 h_1 + \dots + \lambda_s h_s, \quad (1)$$

где λ_{i1} произвольные элементы поля F .

Тогда в силу (1) матричные элементы $a_{ij}(g)$, соответствующие элементам $g \in A$, задаются формулой

$$a_{ij}(g) = \sum_{l=1}^s \lambda_l a_{ij}(h_l). \quad (2)$$

Утверждение 2 является непосредственным следствием формулы (2), а единственность матрицы g вытекает из утверждения 1. Лемма доказана.

Следствие. Если K -конечное поле порядка p^m , $m \in \mathbb{N}$, то порядок A -максимальной абелевой подгруппы группы верхних 1-треугольных матриц равен $|A| = p^{ms}$, где s — число элементов максимальной линейно независимой подсистемы среди функции $\{a_{ij}(g)\}$.

Согласно лемме 1 матрицы $g \in A$ устроены следующим образом: в некоторых клетках $(i_1, j_1), \dots, (i_s, j_s)$ расположены произвольные элементы $\alpha_1, \dots, \alpha_s$ поля F , которые мы будем называть свободными параметрами, а в остальных клетках (i, j) — линейные комбинации $\lambda_1 \alpha_1 + \dots + \lambda_s \alpha_s$, причем коэффициенты λ_l фиксированы для каждой клетки (i, j) .

Ниже покажем, что такое строение матриц $g \in A$ позволяет получить в случае конечного поля K полезное разложение группы $UT(n, K)$ в произведение примерных циклических подгрупп. Для этого специальным образом выбираются клетки (i, j) , где располагаются свободные параметры $\alpha_1, \dots, \alpha_s$.

Введем на множестве клеток верхнего треугольника отношение порядка следующим образом:

$$(i_1, j_1) < (i_2, j_2) \stackrel{\leq}{\sim} (i_1 < i_2) \vee (i_1 = i_2, j_1 < j_2), \\ (i_1, j_1) = (i_2, j_2) \stackrel{\leq}{\sim} (i_1 = i_2) \wedge (j_1 = j_2):$$

Пусть A — произвольная максимальная абелева подгруппа группы $UT(n, F)$. Тогда матричные элементы $a_{ij}(g)$ задаются формулами (2). Укажем индуктивный алгоритм выбора системы клеток для свободных параметров максимальной абелевой подгруппы группы верхних 1-треугольных матриц. Пусть (i_1, j_1) — первая из клеток, для которой $a_{ij}(g) \neq 0$. Предположим, что уже выбраны произвольные параметры $\alpha_1, \dots, \alpha_q$, расположенные соответственно в клетках $(i_1, j_1) < \dots < (i_q, j_q)$ так, что для любой клетки (i, j) ,

$$(i, j) \leq (i_r, j_r) \quad (r = 1, \dots, q),$$

функция $a_{ij}(g)$ является линейной комбинацией параметров $\alpha_1, \dots, \alpha_q$. Если для всех клеток (i, j) элементы $a_{ij}(g)$ суть линейные комбинации параметров $\alpha_1, \dots, \alpha_q$, то построение системы свободных параметров закончено. Пусть (i_{q+1}, j_{q+1}) — первая из клеток (i, j) , $(i, j) > (i_q, j_q)$ таких, что функция $a_{ij}(g)$ не является линейной комбинацией функций $a_{i_1, j_1}(g) = \alpha_1, \dots, a_{i_q, j_q}(g) = \alpha_q$. Тогда полагаем $\alpha_{q+1} = a_{i_{q+1}, j_{q+1}}(g)$. Так действуем до тех пор, пока на некотором шаге для всех клеток (i, j) элементы

$a_{ii}(g)$ станут линейными комбинациями свободных параметров, построенных на предыдущих этапах. На этом построение системы клеток для свободных параметров завершается.

Теорема 1. Пусть A — максимальная абелева подгруппа группы $UT(n, K)$, где K — простое поле порядка p (p — простое); $(i_1, j_1) < \dots < (i_s, j_s)$ — система клеток, в которых располагаются свободные параметры соответственно a_1, \dots, a_s . Пусть $g_t (t=1, \dots, s)$ — матрицы из подгруппы A , содержащие нули во всех клетках $(i, j) < (i_t, j_t)$, и $a_{i_t, j_t}(g) = \gamma_t \neq 0$. Тогда каждый элемент $g \in A$ однозначно записывается в виде

$$g = g_1^{\mu_1} \dots g_s^{\mu_s} \quad (0 \leq \mu_i < p, i = 1, \dots, s). \quad (3)$$

Доказательство. Пусть g — произвольный элемент группы A и $a_{i_r, j_r}(g) = \beta_r (r=1, \dots, s)$. Поэтому формула (3) будет доказана, если мы установим существование таких целых чисел

$\mu_1, \dots, \mu_s, 0 \leq \mu_i < p$, что для матрицы $\tilde{g} = g_1^{\mu_1} \dots g_s^{\mu_s}$ выполняется равенство

$a_{i_t, j_t}(\tilde{g}) = \beta_t (t=1, \dots, s)$. Так как согласно лемме 1 матрица $g \in A$ однозначно определяется свободными параметрами β_1, \dots, β_s , то $\tilde{g} = g$. Будем рассматривать элементы поля K как классы вычетов $0, 1, \dots, p-1$ по $\text{mod } p$.

Проведем индукцию по числу свободных параметров. Пусть μ_1 — такой элемент поля K , что $\mu_1 \gamma_1 = \beta_1$. Тогда матрица $g_1^{\mu_1}$ содержит в клетке (i_1, j_1) элемент β_1 . Предположим доказано, что для некоторых натуральных чисел $\mu_1, \dots, \mu_r, 0 \leq \mu_i < p, i = 1, \dots, r$, матрица $g' = g_1^{\mu_1} \dots g_r^{\mu_r}$ содержит в клетках $(i_1, j_1), \dots, (i_r, j_r)$ соответственно элементы β_1, \dots, β_r , а также $a_{i_{r+1}, j_{r+1}}(g') = \delta_{r+1}$. Пусть далее в поле K имеет место равенство $\delta_{r+1} + \mu_{r+1} \gamma_{r+1} = \beta_{r+1}$. Тогда матрица

$$g' g_{r+1}^{\mu_{r+1}} = g_1^{\mu_1} \dots g_r^{\mu_r} g_{r+1}^{\mu_{r+1}}$$

имеет в клетках $(i_1, j_1), \dots, (i_{r+1}, j_{r+1})$ соответственно элементы $\beta_1, \dots, \beta_{r+1}$. На s -м шаге индукции мы получим матрицу

$$g = g_1^{\mu_1} \dots g_s^{\mu_s} \quad (0 \leq \mu_i < p);$$

$$g_{i_t, j_t}(g) = \beta_t \quad (t = 1, \dots, s),$$

что дает формулу (3).

Так как имеется p^s различных элементов вида (3), а по следствию из леммы 1 порядок группы A равен p^s , то очевидна единственность записи (3). Теорема доказана.

Замечание 1. Теорема 1 легко переносится на максимальные абелевы подгруппы A над конечным полем $GF(p^m)$, где m — произвольное натуральное число.

Пусть u_1, \dots, u_m — базис линейного пространства $GF(p^m)$ над простым полем K , а $g_{ir} \in A$ — такая матрица, которая

в клетке (i_r, j_r) содержит элемент $\gamma_{i_r} \mu_{i_r}$ ($\gamma_{i_r} \in K$, $\gamma_{i_r} \neq 0$) и нули в клетках $(i, j) < (i_r, j_r)$. Тогда любая матрица $g \in A$ однозначно записывается в виде

$$g = \prod_{t=1}^s \prod_{q=1}^m g^{\mu_{tq}}, \text{ где } 0 \leq \mu_{tq} < p.$$

Замечание 2. В силу (3) группа A над простым полем K порядка p представляется в виде произведения циклических подгрупп

$$A = (g_1) \cdot \dots \cdot (g_s). \quad (4)$$

Это произведение, вообще говоря, не прямое, ибо единственность записи (3) получается только при ограничениях $0 \leq \mu_t < p$ ($i=1, \dots, s$).

Пусть элементы g_1, \dots, g_s в (4) — фиксированы. Если в формуле (3) для элемента $g \in A$, $g \neq 1$ выполняются равенства $\mu_1 = \dots, \mu_r = 0$, но $\mu_{r+1} \neq 0$, то положим $l(g) = r+1$; если $\mu_1 \neq 0$, то $l(g) = 1$.

Пусть $M = \{(i_1, j_1), \dots, (i_s, j_s)\}$ — множество указанных выше клеток, в которых расположены свободные параметры a_1, \dots, a_s . Будем говорить, что клетка $(i_t, j_t) \in M$ подчинена клетке $(i_r, j_r) \in M$, если $t > r$ и для некоторой степени p^m ($m \geq 0$) имеем $l(g_r^{p^m}) = t$.

Подмножество

$$M' = \{(i_{r_1}, j_{r_1}), \dots, (i_{r_q}, j_{r_q})\} \quad (5)$$

множества M назовем базовым, если одновременно выполняются два условия: каждая из клеток $(i_r, j_r) \in M$ подчинена по крайней мере одной из клеток M' ; в любой паре различных клеток из M' ни одна из них не подчинена другой.

Теорема 2. Пусть M' — базовое подмножество клеток для фиксированных элементов g_1, \dots, g_s в (4).

Тогда $A = (g_{r_1}) \cdot \dots \cdot (g_{r_s})$.

Доказательство. Множество M можно представить в виде объединения попарно непересекающихся множеств $M = M_1 \cup \dots \cup M_q$, где M_1 состоит из всех клеток M , подчиненных клетке (i_1, j_1) ($r_1 = 1$), и если уже построены множества M_1, \dots, M_k , то множество M_{k+1} определяется как множество всех клеток из M , подчиненных клетке $(i_{r_{k+1}}, j_{r_{k+1}})$ и не лежащих в $M_1 \cup \dots \cup M_k$.

Рассмотрим элементы g_{r_1}, \dots, g_{r_q} , соответствующие клеткам из M' . Пусть $(i_k, j_k) \in M_m$, $(i_k, j_k) \in M'$. Тогда для некоторой степени p^a имеем $l(g_r^{p^a}) = k$, а также положим $g'_k = g_r^{p^a}$ (6).

В силу теоремы 1 $A = (g_{r_1}) \dots (g_{r_q}) B$, где B — произведение элементов g'_k вида (6), соответствующих клеткам $(i_k, j_k) \in M$, $(i_k, j_k) \in M'$. Учитывая (6), каждая подгруппа $(g'_k) \in B$ содержится в одной из подгрупп (g_{r_t}) ($t=1, \dots, q$). Следовательно,

$$A = (g_{r_1}) \cdot \dots \cdot (g_{r_t}). \quad (7)$$

Теорема доказана.

Замечание 3. Базовое множество M' может быть выбрано следующим образом: полагаем $(i_{r_1}, j_{r_1}) = (i_1, j_1)$ и далее из множества M выбрасываем все клетки, отличные от (i_1, j_1) и подчиненные этой клетке. В оставшемся множестве \tilde{M} берем первую клетку (i_{r_1}, j_{r_1}) (в смысле установленного выше упорядочения) и выбрасываем из \tilde{M} все клетки, отличные от (i_{r_2}, j_{r_2}) и подчиненные ей, и т. д.

Разложение (7) содержит, вообще говоря, меньше множителей, чем разложение (3). Для многих типов максимальных абелевых подгрупп группы $UT(n, F)$ оно оказывается прямым*. В частности, так будет для максимальной абелевой подгруппы D вида

$$D = \begin{pmatrix} 1 & \alpha_1 & \alpha_2 & \dots & \alpha_{n-1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \alpha_2 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \alpha_1 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{pmatrix}.$$

Поступила в редколлегию 06.05.87

УДК 519.85

С. В. ЯКОВЛЕВ, канд. физ.-мат. наук, И. В. ГРЕБЕННИК

СВОЙСТВА ЕВКЛИДОВЫХ КОМБИНАТОРНЫХ МНОЖЕСТВ k -РАССТАНОВОК С ПОВТОРЕНИЯМИ И БЕЗ ПОВТОРЕНИЙ

Пусть $M = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, $a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_n$. Рассмотрим множество A_n^k k -расстановок (размещений) без повторений [1]. Элементами этого множества являются упорядоченные наборы $a = (a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_k})$ из k различных символов множества M . Элементы могут отличаться друг от друга как символами, так и порядком их следования. Множество сочетаний без повторений C_n^k состоит из возможных наборов $c = (c_{i_1}, c_{i_2}, \dots, c_{i_k})$ по k символов из n , отличающихся только составом символов в каждом наборе $c^i \in C_n^k$. Не теряя общности, будем считать, что в каждом наборе $c^i \in C_n^k$ элементы упорядочены по возрастанию $c_1^i \leq c_2^i \leq \dots \leq c_k^i$. Из каждого набора $c^i \in C_n^k$ можно образо-

* Князева В. Ф. Максимальные абелевы подгруппы группы 1-треугольных матриц над произвольным полем // Докл. АН УССР. Сер. А, 1984. № 12. С. 13—16.

вать $k!$ перестановок. Прделав такую операцию со всеми наборами $c^i \in C_n^k$, получим множество A_n^k . Таким образом, A_n^k представимо в виде

$$A_n^k = \bigcup_{i=1}^N P_n^i,$$

где $N = \text{Card } C_n^k$, P_n^i — множество перестановок из k символов, принадлежащих набору $c^i \in C_n^k$.

Осуществим биекцию множеств A_n^k и P_n^i на подмножества E_n^k и $E_k^{(i)}$ евклидова пространства R^k . Элементу $a \in A_n^k$ поставим в соответствие $x \in E_n^k$ по правилу $a_i = x_i$, $i = \overline{1, k}$. Элементу $p^i \in P_n^i$ поставим в соответствие элемент $e^i \in E_k^{(i)}$ по правилу $p_j^i = e_j^i$, $j = \overline{1, k}$, $i = \overline{1, N}$. Очевидно, что $E_n^k = \bigcup_{i=1}^N E_k^{(i)}$.

Доказана теорема [2], которая дает представление множества $F_k^{(i)}$ как пересечения многогранника и границы гиперсферы.

Теорема 1. Точки множества $E_k^{(i)}$ и только они удовлетворяют системе

$$\sum_{j=1}^k e_j^i = \sum_{j=1}^k c_j^i; \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m e_{s_j}^i \geq \sum_{j=1}^m c_{s_j}^i; \quad (2)$$

$$\forall m \in I_{k-1}, s_j \in I_k, s_l \neq s_j \forall l \neq j; j, l \in I_n;$$

$$\sum_{j=1}^k (e_j^i)^2 = \sum_{j=1}^k (c_j^i)^2. \quad (3)$$

Здесь и далее I_r — множество первых r натуральных чисел. Многогранник, описываемый системой (1), (2), называется перестановочным многогранником [3, 4]. Обозначим его Π_k , а замкнутое множество, ограниченное гиперсферой (1), (3), обозначим \bar{S}_{k-1}^i . С учетом приведенных рассуждений можно сформулировать следующую теорему о представлении множества E_n^k .

Теорема 2. Множество E_n^k представимо в виде объединения множеств вершин перестановочных многогранников Π_k , причем никакие два многогранника Π_k^i и Π_k^j ($i \neq j$) не имеют общих вершин, т. е.

$$E_n^k = \bigcup_{i=1}^N [\Pi_k^i \cap \bar{S}_{k-1}^i] = \bigcup_{i=1}^N E_k^{(i)},$$

где $N = \text{Card } C_n^k$, а Π_k^i и \bar{S}_{k-1}^i определяются соотношениями (1), (2) и (1) (3) соответственно.

Рассмотрим множество сочетаний с повторениями \bar{C}_n^k . Его элементами являются всевозможные наборы $\bar{c} = (\bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_k)$ по k символов из n , причем каждый из символов \bar{c}_i может повторяться в наборе \bar{c} от 1 до k раз ($\bar{c}_i \in M$). Наборы $\bar{c}^i \in \bar{C}_n^k$ отличаются друг от друга только составом символов в каждом наборе. Не теряя общности, будем считать, что $\forall \bar{c}^i \in \bar{C}_n^k \bar{c}_1^i \leq \bar{c}_2^i \leq \dots \leq \bar{c}_k^i$. Каждый набор $\bar{c}^i \in \bar{C}_n^k$ порождает множество перестановок с повторениями $P_{k(n_1, n_2, \dots, n_t)}^i \left(\sum_{l=1}^t n_l = k \right)$.

Образовав всевозможные перестановки с повторениями из всех элементов множества \bar{C}_n^k , очевидно, получим множество \bar{A}_n^k , k -расстановок (размещений) с повторениями [1]. Таким образом, \bar{A}_n^k представимо в виде

$$\bar{A}_n^k = \bigcup_{i=1}^L P_{k(n_1, n_2, \dots, n_t)}^i,$$

где $L = \text{Card } \bar{C}_n^k$.

Осуществим описанным выше способом биекцию множеств \bar{A}_n^k и $P_{k(n_1, \dots, n_t)}^i$ на множества \bar{E}_n^k и $\bar{E}_{k(n_1, \dots, n_t)}^{(i)} \forall i = \overline{1, L}$. Здесь $\bar{E}_n^k = \bigcup_{i=1}^L \bar{E}_{k(n_1, \dots, n_t)}^{(i)}$. Распространив теорему 1 на множества $\bar{E}_{k(n_1, \dots, n_t)}^{(i)}$, получим, что точки $\bar{E}_{k(n_1, \dots, n_t)}^{(i)}$ удовлетворяют системе (1)–(3). Многогранник, описываемый (1), (2) для $\bar{E}_{k(n_1, \dots, n_t)}^{(i)}$ обозначим

$$\Pi_{k(\bar{e}_1, \dots, \bar{e}_k)}^i \quad (\bar{e} = (\bar{e}_1, \bar{e}_2, \dots, \bar{e}_k) \in \bar{E}_{k(n_1, \dots, n_t)}^{(i)}).$$

Теорема 3. Множество \bar{E}_n^k представимо в виде объединения множеств вершин общих перестановочных многогранников $\Pi_{k(\bar{e}_1, \dots, \bar{e}_k)}^i$, причем никакие два многогранника не имеют общих вершин, т. е.

$$\bar{E}_n^k = \bigcup_{i=1}^L [\Pi_{k(\bar{e}_1, \dots, \bar{e}_k)}^i \cap S_{k-1}],$$

где $L = \text{Card } \bar{C}_n^k$.

В [4] дано описание так называемого многогранника размещения. Он является совокупностью всех решений следующей системы неравенств:

$$\sum_{i=1}^{|\omega|} a_{n-l+1} \leq \sum_{i \in \omega} x_i \leq \sum_{i=1}^{|\omega|} a_i \forall \omega \subset J_k. \quad (4)$$

Многогранник размещения, как следует из [4], служит выпуклой оболочкой множества $E_{n, k}^k$.

Теорема 4. Множество E_n^k симметрично относительно гиперплоскостей вида $x_i - x_j = 0$, где начало координат находится в точке $a^0 = (a_0, a_0, \dots, a_0)$, $a_0 = \min_{1 \leq i < j \leq n} \{a_j\}$.

Доказательство. Рассмотрим произвольную точку $y^1 \in E_n^k$ $y^1 = (y_1, \dots, y_i, \dots, y_j, \dots, y_k)$. Расстояние d^1 от точки y^1 до плоскости (5)

$$d^1 = \frac{y_i - y_j}{\sqrt{2}}.$$

Точке y^1 соответствует точка $y^2 = (y_1, \dots, y_j, \dots, y_i, \dots, y_k)$, расстояние которой до плоскости (5)

$$d^2 = \frac{y_j - y_i}{\sqrt{2}} = -d^1.$$

Следовательно, точки y^1, y^2 лежат по разные стороны от плоскости (5). Кроме того, $y^2 \in E_n^k$, так как отличается от y^1 лишь порядком следования координат. Отсюда точки $y^1, y^2 \in E_n^k$ симметричны относительно плоскости $x_i - x_j = 0$. Из произвольности выбора i, j ($1 \leq i < j \leq k$) и точки $y^1 \in E_n^k$ вытекает утверждение теоремы. Аналог теоремы 4 для множества перестановок с повторениями, погруженного в R^k , доказан [6].

Число плоскостей вида (5) равно $k(k-1)/2$. Кроме того, аналогично можно показать, что множество E_n^k симметрично относительно гиперплоскостей вида (5) в предположении, что начало координат находится в точке a^0 .

Теорема 5. Множество $\overline{E_n^k}$ лежит на семействе гиперплоскостей $\{T_i^r\}$ вида

$$x_r = a_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (6)$$

Доказательство. Уравнению $x_r = a_i$ удовлетворяют все точки $\overline{E_n^k}$, у которых r -я координата равна a_i . На r -м месте может находиться только один из элементов множества M . Таким образом, все точки $\overline{E_n^k}$ лежат на семействе гиперплоскостей T_i^r . Таких семейств $\{T_i^r\}$ можно построить ровно k .

При $k \leq n$ множество $E_n^k \subset \overline{E_n^k}$. Значит, E_n^k также лежит на семействе гиперплоскостей $\{T_i^r\}$ вида (6).

Теорема 6. Множество E_n^k лежит на семействах k -плоскостей $\{T_s^i\}_i$ вида

$$\frac{s}{k-s} x_1 + \frac{s}{k-s} x_2 + \dots + \frac{s}{k-s} x_{k-s} - x_{k-s+1} - \dots - x_k + a_i^{s(i)} = 0 \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, \gamma_s < \frac{k!}{s!(k-s)!}; \quad s \in \{1, 2, \dots, k-1\};$$

$$i = 1, 2, \dots, N; \quad N = \text{Card } C_n^k.$$

Доказательство. В соответствии с теоремой 2 множество $E_n^k = \bigcup_{t=1}^N E_k^{(t)}$, где $N = \text{Card } C_n^k$. По теореме 2 [6] каждое множество $E_k^{(t)}$ лежит на семействе k -плоскостей вида

$$\frac{s}{k-s} x_1 + \frac{s}{k-s} x_2 + \dots + \frac{s}{k-s} x_{k-s} - x_{k-s+1} - \dots - x_k + a_t^s = 0$$

где $t = 1, 2, \dots, \gamma_s \leq \frac{k!}{s!(k-s)!}$, $s \in \{1, 2, \dots, k-1\}$.

При этом число γ_s плоскостей, образующих семейство $\{T_s^t\}$ не превышает $\frac{k!}{s!(k-s)!}$. Если для каждого $E_k^{(t)}$ построить семейство $\{T_s^t\}_t$, то все множество таких плоскостей ($i = \overline{1, N}$) будет содержать множество E_n^k . Оценка числа k -плоскостей в этих семействах равна $C_n^k C_k^s = \frac{n!}{s!(n-k)!(k-s)!}$.

Рассмотрим множество $E_k^{(t)} \subset E_n^k \subset R^k$. Как показано выше, его элементами являются образы всевозможных перестановок без повторов из k символов $a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_k}$, выбранных из множества M . По теореме 6 множество $E_k^{(t)}$ лежит на семействе гиперплоскостей $\{T_s^t\}_t$, причем $T_{k-1}^t \in \{T_s^t\}_t$. Все точки $E_k^{(t)}$, принадлежащие T_{k-1}^t , имеют одно и то же значение координаты x_k . Обозначим множество всех таких точек через $E_k^{t_i}$. Справедливо соотношение $E_k^{(t)} = E_k^{t_i} \times x_k$, где $x_k \in R^1$ и может принимать одно из значений $a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_k}$; $E_k^{t_i}$ — множество точек, координатами которых являются первые $k-1$ координат точек $E_k^{t_i}$, $E_k^{t_i} \subset R^{k-1}$.

Рассуждая аналогично, можно провести дальнейшее разложение $E_k^{t_i}$. Из теоремы 6 следует, что $E_k^{(t)} = \bigcup_{t_i=1}^{\gamma_s} E_k^{t_i}$. Тогда

$$E_k^{(t)} = \bigcup_{t_i=1}^{\gamma_s} [E_k^{t_i} \times x_k];$$

$$E_n^k = \bigcup_{t=1}^N \bigcup_{t_i=1}^{\gamma_s} [E_k^{t_i} \times x_k].$$

Приведенные метрические свойства «погруженных» множеств k -расстановок представляют интерес для задач оптимизации широкого класса, заданных на этих множествах.

Список литературы: 1. Виленкин Н. Я. Комбинаторика. М., 1969. 328 с. 2. Стоян Ю. Г., Яковлев С. В. Свойства выпуклых функций на перестановочном многограннике//Докл. АН УССР. Сер. А. 1988. № 3. С. 134—136. 3. Стоян Ю. Г., Яковлев С. В. Математические модели и оптимизационные геометрического проектирования. К., 1986. 276 с. 4. Емилчев В. А., Ковалев М. М., Кравцов М. К. Многогранники, графы, оптимизация. М., 1981. 344 с. 5. Стоян Ю. Г. Некоторые свойства специальных комбинаторных множеств. Х., 1980. 22 с. (Препринт/АН УССР. Ин-т пробл. машиностроения, № 85). 6. Стоян Ю. Г. Об одном отображении комбинаторных множеств в евклидово пространство. Х., 1982. 33 с. (Препринт/АН УССР. Ин-т пробл. машиностроения, № 173).

Поступила в редколлегию 25.12.87

УДК 681.142

К. Л. МАЙСТРЕНКО

ЧАСТОТНАЯ НОРМАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИИ В ЗАДАЧАХ ОПЕРАТИВНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАТОРОВ С ТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ АСУ

В нашей стране и за рубежом значительно увеличилось количество научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по проблеме распознавания и синтезирования речевых образов, слов, команд, а также начались исследования по распознаванию слитной речи [1—11]. Это обусловлено тем, что в связи с интенсивной автоматизацией самых различных областей человеческой деятельности появился спрос на устройства, позволяющие человеку-оператору общаться с ЭВМ на естественном языке [1—3]. Кроме того, для дальнейшего повышения оперативности взаимодействия человека и ЭВМ ведутся работы по созданию программных средств для ЭВМ на естественном нормализованном языке [4].

Аппаратура речевого общения включает в себя синтезаторы и анализаторы речи. Однако, если проблема речевого вывода практически решена и появились надежные синтезаторы речи [8, 9], то распознаватели речевых образов, речевых команд и слитной речи все еще находятся на уровне экспериментальных или опытных образцов. Одним источником сложностей при решении этой проблемы является чрезвычайно большое разнообразие акустических образов для слов обычной человеческой речи [3]. Другим — значительная изменчивость акустических образов, соответствующих звукам речи. Частично эта изменчивость обусловлена помехами, накладываемыми на речевой сигнал в процессе его передачи по каналу связи. Основная же доля этой изменчивости определяется различием в геометрических размерах речеобразовательного аппарата людей (в пределах 25 %), что приводит, согласно акустической теории речеобразования, к соответствующему разбросу в значениях резонансных частот (формант) [6]. Кроме того, тембр, темп и динамический диапазон речи зависят от физического и эмоционального состояния оператора.

Нами разработаны способ и устройство частотной нормализации сигнала речевых образов (частотный инвариантор), которые позволяют в определенной степени продвинуться по пути создания надежных распознавателей речи в устройствах речевого общения человека и ЭВМ [10, 11].

В основу предложенного способа нормализации частоты положен принцип «анализ—синтез» речевого сигнала. Частотный инвариантор, построенный по этому способу, преобразует спектр сигнала голоса диктора таким образом, что голос синтезированных звуков не зависит от высоты тона голоса диктора. На выходе инвариантора частоты будут всегда прослушиваться нормализованный голос, кто бы ни говорил перед микрофоном (мужчина, женщина или ребенок), поскольку частотную нормализацию сигнала речевых образов осуществляют выделением спектра формант речевых образов при анализе и воспроизведением по нему сигнала речевых образов при синтезе. Одновременно при анализе и синтезе образуют инварианты сигнала речевых образов по частоте путем процентной полосной расфилтровки сигнала речевых образов при анализе с последующим формированием сжатия полос при синтезе процентной расфилтровкой. При этом выделенная в процессе анализа огибающая первого спектра формант сигнала речевых образов определяет начало ее на частотной оси в процессе синтеза. Затем последовательно находят место огибающих спектральных компонент остальных формант сигнала речевых образов и синхронно воспроизводят их при синтезе.

Устройство нормализации частоты (инвариантор частоты), как сказано выше, предназначено для такого преобразования спектра формант речевых образов, при котором обеспечивается нормализация положения формант в спектре с сохранением смысловой артикуляции элементарных речевых образов и их окрасок.

Идеальным инвариантором частоты (ИЧ) является устройство, производящее умножение или деление всех компонент спектра в постоянное число раз. Ближним аналогом идеального устройства нормализации может служить магнитофон, записывающий сигнал речевого образа с одной скоростью, а воспроизводящий — с другой скоростью. Устройство с применением магнитной записи (рис. 1) работает следующим образом. Сигнал речи поступает на гребенчатый фильтр 2 (ГФ) магнитофона 1 (М). По интенсивности и продолжительности селектируемой частоты

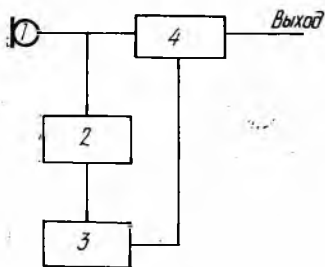


Рис. 1.

анализатор основного тона 3 (АЧОТ) определяет частоту основного тона элементарного образа. Эта частота сравнивается с частотой эталонной и воспроизводится блоком 4 в соответствии с результатом сравнения.

Недостатком такого ИЧ являются искажения, вносимые за счет временных зависимостей записи и воспроизведения.

Разработанный электронный инвариантор частоты, один из вариантов которого представлен на рис. 2, состоит из двух

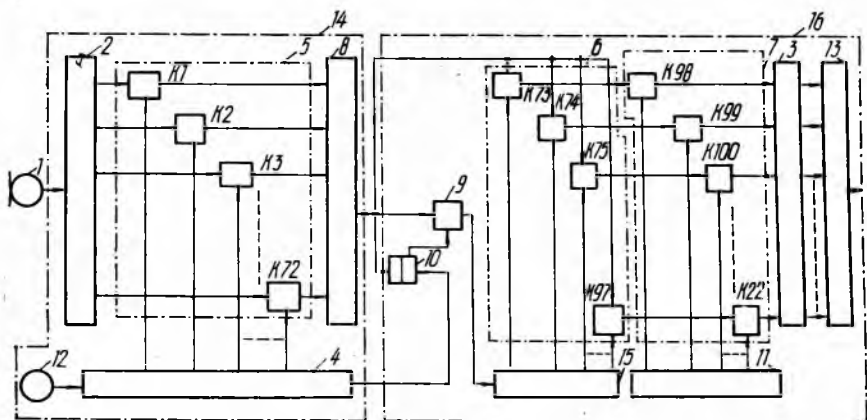


Рис. 2

гребенок процентных фильтров 2 и 3 ($\Gamma \% \Phi 1$, $\Gamma \% \Phi 2$), двух линий задержки 4 и 15 (ЛЗ1, ЛЗ2), трех групп ключей 5, 6, 7 (K1—K122), сумматоров 8, 13 (С1, С2), заторможенного блокинг-генератора 9 (ЭБГ), триггера 10 (ТГ1), генератора шума 11 (ГШ) и генератора импульсов 12 (ГИзап).

Прежде чем привести описание принципа действия устройства, отметим некоторые важные свойства процентных фильтров 2 и 3. Эти фильтры настроены так, что их средние частоты отличаются друг от друга на некоторый постоянный процент. Это обусловлено тем, что спектр речевых образов может быть иногда сплошным.

В экспериментальном макете все средние частоты фильтров 2 и 3 ($\Gamma \% \Phi 1$ и $\Gamma \% \Phi 2$) отличаются друг от друга на 10 %, хотя, в принципе, интервал между ними может быть и меньше. Эти частоты в Гц приведены в таблице.

Анализируя спектр средних частот гребенки (таблица) процентных фильтров, можно установить, что в диапазоне частот $25 \text{ Гц} \pm 22 \text{ кГц}$ общее число фильтров составляет 72. Если допустить, что наименьшая частота основного тона выбрана равной 80 Гц, а наивысшая — 13 кГц, то число фильтров для системы распознавания можно сократить до 54.

В описанной гребенке общее число фильтров на одну октаву или несколько октав постоянно (инвариантно). Так сигнал основного тона — допустим 25 Гц, и его третья гармоника — 75 Гц — пропускается двенадцатью фильтрами, перекрывающими полосу частот 25—73,3 Гц, т. е. почти три октавы. Любые

25	27,5	30,25	33,28
37,61	41,37	45,51	50,06
55,07	60,05	66,64	73,3
80,63	88,69	97,56	107,32
118,05	129,86	142,85	157,14
172,85	190,14	207,14	230,07
258,08	278,39	305,23	336,85
370,54	407,54	448,35	439,9
542,51	596,76	536,44	728,08
794,29	873,72	961,09	1057,2
1162,92	1279,21	1407,13	1547,84
1702,62	1872,88	2060,17	2265,19
2492,61	2742,09	3016,3	3317,93
36,49,72	4114,69	4416,16	4877,78
5343,56	5877,92	6465,71	7112,28
7823,51	8605,86	9466,45	10413,41
11454,41	12599,85	13859,84	15245,83
16770,4	18447,44	20232,18	22491,4

другие три октавы также перекрываются двенадцатью фильтрами, четыре октавы — пятнадцатью, пять — восемнадцатью и т. д.

Отсюда, поскольку спектральные составляющие речи двух разных дикторов отличаются друг от друга в кратное число раз, то при произнесении разными дикторами одного и того же речевого образа (слога) в работу включается одинаковое количество процентных фильтров. Однако, если при произнесении слога «но» работает, например, восемь фильтров (для любых дикторов), то при произнесении слога «до» число работающих фильтров может быть и больше, и т. д.

После детектирования сигналы поступают на группу ключей 5 (K1—K72), на управляющие входы которых поступают сигналы с выходов ЛЗ1. При подведении ко входу ЛЗ1 одиночного импульса от ГИзап и при его обходе всех выводов на выходе С1 будет воспроизведена огибающая спектра формант речевого образа. При повторном опросе на выходе С1 будет воспроизведена огибающая спектра формант в следующий момент времени и т. д. При непрерывной работе ГИзап на выходе С1 будут воспроизводиться все текущие разрезы значений спектральных компонент формант речевого сигнала.

Если перед микрофоном 1 (М) воспроизводятся образы шипящих «ш», «щ» и другие, то на выходе С1 функция $S(\omega)$ будет распределяться до некоторой степени равномерно. Если же перед микрофоном воспроизводятся элементарные речевые образы, то воспроизводимые $S(\omega)$ (огибающие спектров) будут иметь вид обычных формант. Причем, благодаря выбранному закону построения процентных полосовых фильтров 1% $\Phi 1$, общее число фильтров не будет зависеть от местоположения формант в спектре данного речевого образа. Поэтому синтез инвариантов речевых образов может быть начат непосредственно с момента отыскания при анализе начала первой форманты.

Поскольку фильтры анализатора $\Gamma\% \Phi 1$ и синтезатора $\Gamma\% \Phi 2$ по структуре одинаковы, то модуляция каждого канала синтезатора должна производиться синхронно с последующим анализом. Анализатор 14 состоит из элементов блок-схемы 2, 4, 5, 8, 12, синтезатор 16 — из элементов 3, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 15.

Таким образом, процедура отыскания инвариантов по частоте заключается в следующей последовательности действий: благодаря важной особенности речевых образов, инварианты по частоте образуются одновременно при анализе и синтезе, использованием процентных фильтров; при анализе выделяется огибающая спектра и определяется место ее начала; в момент обнаружения начального участка спектра запускается синтезатор, который синхронно повторяет точную копию воспроизводимого спектра формант. Причем синтез осуществляется также с применением процентных фильтров и генератора шума.

В устройстве (см. рис. 2) синтез начинается в момент запуска ЗБГ, что одновременно указывает на местоположение форманты в спектре. Импульс ЭБГ поступает на ЛЗ2 и по очереди обходит все ее выходы. Число выходов ЛЗ2 равно 25 из расчета воспроизведения десяти частотных октав, в то время как при анализе их может быть в пределах 72, а в практически действующей схеме — 40 (из расчета наименьшей частоты основного тона 80 Гц и наивысшей частоты основного тона 3·5 кГц).

В экспериментальном устройстве инвариантора частоты частота основного тона выбрана равной 336,85 Гц. Десятая октава (25-й фильтр) будет иметь частоту 3317,93 Гц. Выбор этих частот обусловлен требованиями получения наилучшего артикуляционного качества воспроизведения.

Таким образом, импульс ЭБГ, проходя ЛЗ2, обегает ключи К73—К97 и коммутирует по очереди сигнал С1 на модуляторе К7—К122.

Повторный запуск ЗБГ может произойти только с полным окончанием цикла анализа. Выходной импульс ЛЗ1 опрокидывает триггер 10 в исходное состояние, и ЗБГ готов к приему информации.

Синтезированный сигнал получают на выходе сумматора 13 синтезатора 16.

Использование предложенного частотного инвариантора позволяет обеспечить возможность регулирования полосы сигнала речевых образов, улучшить качество артикуляционного воспроизведения, повысить помехозащищенность.

Поскольку инвариантор относительно прост по устройству, несложен в изготовлении и эксплуатации, он может найти широкое применение в средствах оперативного взаимодействия человека и ЭВМ в АСУ, интерактивных системах, системах искусственного интеллекта, бионике и медицине.

Список литературы: 1. Попов Э. В. Общение с ЭВМ на естественном языке. М., 1982. 360 с. 2. Звездин В. С. Речевое общение человека и ЭВМ. М., 1982. 64 с. 3. Robinson A. «Communicating with computers by voice»//IEEE Trans. Prof. Commun. 1979. N 3. P. 13—21. 4. Китов А. И., Орлова Ю. Д. Реализация диалогового режима взаимодействия человека и ЭВМ с использованием нормированного естественного языка//Программирование. 1984. № 6. С. 17—25. 5. Загоруйко Н. Г., Волошина Г. Я. Распознавание слуховых образов. Новосибирск, 1970. 72 с. 6. А. с. 404122. Способ обработки речевого сигнала/В. Н. Сорокин, В. С. Файн (СССР). № 1624604/18—24; Заявлено 15.01.71//Открытия. Изобретения. 1973. № 43. С. 158. 7. А. с. 847317. Устройство для ввода речевой информации/Ю. В. Звягинцев (СССР). № 2733780/18—24; Заявлено 06.07.79//Открытия. Изобретения. 1981. № 26. С. 250. 8. А. с. 710067. Устройство для ввода речевой информации из цифровых вычислительных машин/Г. Ф. Захарченко, В. И. Куля (СССР). № 2405842/18—24; Заявлено 17.09.76//Открытия. Изобретения. 1980. № 2. С. 211. 9. А. с. 643959. Устройство для частотной нормализации сигнала речевых образов/Б. В. Болотов, К. П. Майстренко (СССР). № 233989/18—24; Заявлено 20.10.76//Открытия. Изобретения. 1979. № 3. С. 126. 10. А. с. 650093. Способ распознавания речевых команд и устройство для его реализации/Б. В. Болотов, К. П. Майстренко, А. М. Жилаев (СССР). № 233998/18—24; Заявлено 08.06.76//Открытия. Изобретения. 1979. № 8. С. 187. 11. А. с. 758238. Устройство для распознавания речевой информации/Б. В. Болотов, К. П. Майстренко, Г. Г. Чуб (СССР). № 240871/18—24; Заявлено 03.01.77//Открытия. Изобретения. 1980. № 31. С. 242.

Поступила в редколлегию 30.03.87

УДК 658.52.011.56

В. М. ЛЕВЫКИН, канд. техн. наук

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СЛОЖНОЙ ГИБКОЙ СИСТЕМЫ

Решение задач планирования, контроля, учета и управления в рамках интегрированной сложной гибкой системы (ИСГС) за установленное время при соответствующих ограничениях на материальные и трудовые ресурсы зависит от многих факторов, и в частности от качества обеспечения системы F^c и ее подсистем F_i , $i = \overline{1, n}$ (n — число подсистем). В обеспечение ИСГС входят информационное, лингвистическое, программное, организационное, математическое, техническое и т. д. Для упрощения задачи оценки уровня обеспечения системы рассмотрим только информационное E_u^c , программное E_n^c и техническое E_T^c обеспечения.

Показатель гибкости системы непосредственно зависит от качества обеспечения системы E^c . Гибкость системы и ее подсистем будет тем выше, чем меньше разность между существующим уровнем обеспечения системы S^c и совершенным обеспечением S^c' . В идеальном случае $S^c' - S^c = 0$. Это относится и к составляющим обеспечения системы $S_u^c' - S_u^c = 0$; $S_n^c' - S_n^c = 0$;

$$S_T^c' - S_T^c = 0.$$

При аддитивности составляющих обеспечений получаем общее обеспечение системы $E^c = E_u^c + E_n^c + E_T^c$ (1).

Так как комплекс задач планирования, контроля, учета и управления A^0 состоит из совокупности задач a_{it} , реализуемых подсистемами, то $A^0 = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^p a_{it}$, p — количество задач, решаемых i -й подсистемой.

Для реализации задач a_{it} подсистемой необходимо иметь соответствующее обеспечение подсистемы E_i , состоящее из информационного E_{iu} , программного E_{in} и технического E_{iT} обеспечений. По аналогии с (1) $E_i = E_{iu} + E_{in} + E_{iT}$ (2). Общее информационное E_u^c , программное E_n^c и техническое E_T^c обеспечения для всей системы определяется соответственно

$$E_u^c = \sum_{i=1}^n E_{iu}; E_n^c = \sum_{i=1}^n E_{in}; E_T^c = \sum_{i=1}^n E_{iT}. \quad (3)$$

Тогда (1) запишем

$$E^c = \sum_{i=1}^n E_{iu} + \sum_{i=1}^n E_{in} + \sum_{i=1}^n E_{iT}. \quad (4)$$

Все обеспечения подсистем состоят из набора определенных элементов и процедур, которые соответствуют номенклатуре задач, решаемых каждой i -й подсистемой:

$$E_{iu} = \sum_{j=1}^q b_{iju}; E_{in} = \sum_{j=1}^q b_{ijn}; E_{iT} = \sum_{j=1}^q b_{iTj}, \quad j = \overline{1, q}, \quad (5)$$

где b_{ij} — j элемент i -й подсистемы, q — число элементов и процедур соответствующих обеспечений.

Представим (3) в виде

$$E_u^c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q b_{iju}; E_n^c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q b_{ijn}; E_T^c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q b_{iTj}. \quad (6)$$

Общее обеспечение системы

$$E^c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q (b_{iju} + b_{ijn} + b_{iTj}). \quad (7)$$

Как указывалось ранее, вероятность решения всего комплекса задач A^c , стоящих перед системой, определяется качеством обеспечения системы и стремится к 1, если имеющееся обеспечение системы E^c близко к идеальному требуемому обеспечению $E^{c'}$. Для сравнения уровня существующего E^c и требуемого обеспечений введем показатель качества обеспечения

$$k^c = E^c / E^{c'}, \quad (8)$$

k^c изменяется в пределах $0 < k \leq 1$. Для подсистем k определяется по формуле $k_i = E_i / E'_i$.

Аналогично такой же показатель можно ввести и для каждого типа обеспечений системы: информационного (k_u^c), программного (k_n^c) и технического (k_T^c) соответственно

$$k_u^c = E_u^c / E_u^{c'}; K_n^c = E_n^c / E_n^{c'}, K_T^c = E_T^c / E_T^{c'} \quad (9)$$

и для подсистем

$$k_{iu} = E_{iu} / E'_{iu}; k_{in} = E_{in} / E'_{in}; k_{iT} = E_{iT} / E'_{iT}. \quad (10)$$

Качество обеспечений определяется характеристиками элементов и процедур подсистем b_{ji} , т. е. способностью реализовать комплекс задач a_i за время $t_{пл}$. Это возможно, если $E^c \approx E^{c'}$. В этом случае качество обеспечения системы будет тем выше, чем меньше разность между E^c и $E^{c'}$.

Применительно к ИСГС близость E^c к $E^{c'}$ зависит от многих факторов, и в частности структуры обеспечения, состава элементов или процедур, наличия типовых элементов или процедур, универсальности, адаптируемости, развития.

В качестве основных прием показателей, характеризующие качество обеспечения системы: универсальность k_y^c , определяющую способность обеспечения решать различные классы задач с минимальным привлечением дополнительных ресурсов для его доработки; адаптируемость k_a^c , определяющую способность обеспечения перейти на выполнение нового класса задач с минимальным привлечением дополнительных затрат; развитие обеспечения k_p^c , определяющее его способность к эволюции, связанную с расширением номенклатуры и объема решаемых задач.

Такой комплекс показателей характеризует способность системы решать стоящие перед ней задачи A^c в установленные сроки при ограничении на соответствующие ресурсы, требующиеся для улучшения этих показателей.

В целом показатель качества обеспечения системы

$$k^c = \alpha_1 k_y^c + \alpha_2 k_a^c + \alpha_3 k_p^c, \quad (11)$$

где α — коэффициенты значимости соответствующих показателей.

Таким образом, степень приближения E^c к $E^{c'}$ определяется комплексным показателем качества обеспечений системы k^c . Улучшение k^c непосредственно связано с использованием соответствующих ресурсов.

Определим зависимость совершенствования обеспечения от используемых для этого ресурсов $B^c = 1 - r_d / r$ (12), где r — ресурсы, используемые на создание обеспечения системы; r_d — дополнительные ресурсы на разработку типовых элементов и процедур, с помощью которых возможно создание более совершенного обеспечения.

Величина B^c находится в пределах $0 < B^c \leq 1$. Обеспечение системы будет совершенным при $B^c = B_{\max}^c = 1$, когда использование дополнительных ресурсов практически не приводит к улучшению его качества. Кроме того, степень улучшения B^c до B_{\max}^c не должна быть неограниченной, так как на ее достижение необходимо затрачивать различные ресурсы в зависимости от характера приближения B^c к B_{\max}^c . Поэтому необходимо определить тот предел, который дает требуемое приближение с минимальными дополнительными затратами и тот уровень затрат, который позволит создание требуемого обеспечения E^c .

В работах [1, 2] дается оценка повышения эффективности сложных систем. Для определения требуемых затрат на совершенствование обеспечения системы используем выражение $H = a \ln V$ (13), где H — энтропия; V — неупорядоченность обеспечения системы; a — величина, характеризующая минимальный объем информации, который необходим для снижения энтропии.

Совершенство обеспечения E^c , применительно к требованиям определенного класса задач, будет прежде всего зависеть от набора типовых, стандартных элементов или процедур, которые минимизирует время подготовки решения задачи и используются для максимального числа решаемых задач в рамках данного обеспечения.

Фактически в данном случае можно говорить об уровне обеспечения, определяемого выражением $S = n'/n$ (14), где n — число всех элементов или процедур обеспечения; n' — число универсальных элементов и процедур.

Разность энтропий совершенства обеспечения H_0 (с min уровнем обеспечения) и H (с max уровнем обеспечения) дает количество информации, характеризующее процесс создания более совершенного обеспечения:

$$I = H_0 - H = a \ln V_0 - a \ln V = a \ln V_0/V, \quad (15)$$

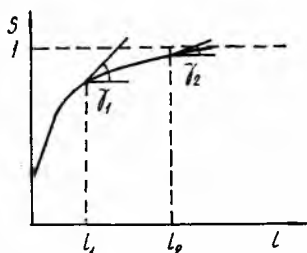
где V , V_0 — несовершенство обеспечения соответственно с максимальным и минимальным его уровнями, $V = V_0 e^{-I/a}$.

Обозначим $a = I_0$. Это то количество информации, которое обрабатывается в обеспечении без стандартных элементов. Тогда получим выражение несовершенства обеспечения при использовании стандартных элементов и процедур $V = V_0 e^{-I/I_0}$.

Несовершенство обеспечения зависит от уровня S , и чем выше уровень, тем меньше несовершенство обеспечения:

$$V = 1 - S; \quad S = 1 - V = 1 - V_0 e^{-I/I_0}. \quad (17)$$

Ресурсы, связанные с разработкой обеспечения, зависят от объемов преобразования информации, т. е. $I/I_0 = r/r_d = l$. Тогда



выражение (17) примет вид $S=1-V_0e^{-l}$ (18), т. е. $S=f(l)$ (рисунок).

По минимальному значению угла $\operatorname{tg}\gamma=ds/dl$, когда $\operatorname{tg}\gamma_1$ и $\operatorname{tg}\gamma_2$ будут отличаться незначительно, можно определить те дополнительные ресурсы r_d , с помощью которых будет создан требуемый уровень обеспечения $S_{\text{тр}}$. Так как уровень обеспечения S связан с его несовершенством V выражением $S=1-V$, то кривая V будет иметь зеркальное отображение кривой S .

Список литературы: 1. Трапезников В. А. Автоматическое управление и его экономическая эффективность//Автоматика и телемеханика. 1966. № 1. С. 5—53. 2. Селезнев М. Я. Информационно-вычислительные системы и их эффективность. М., 1986. 104 с.

Поступила в редколлегию 12.06.87

УДК 62.506.2

*Б. В. ДЗЮНДЗЮК, канд. техн. наук, В. Я. ТЕРЗИАН,
канд. техн. наук, Л. В. СЕВЕРИНА*

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ДИАЛОГОВЫХ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ ОХРАНЫ ТРУДА НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОЙ МАТЕМАТИКИ

Вопросам охраны труда в нашей стране уделяется большое внимание. На совещании в ЦК КПСС 14 ноября 1986 г. отмечалось, что активная, настойчивая работа в направлении решения этих вопросов во многом будет способствовать обеспечению четкого, бесперебойного функционирования общественного производства, закреплению позитивных сдвигов в народном хозяйстве, успешной реализации курса XXVII съезда КПСС на ускорение социально-экономического развития страны [1].

С переходом к широкому применению информатики и кибернетики во всех областях нашей жизни изменяется также характер подхода к различным проблемам, в том числе и проблеме охраны труда. На одно из главных направлений в области кибернетики выдвигается искусственный интеллект, который успешно решает проблему взаимодействия непрограммирующихся пользователей и ЭВМ. В областях, где знания представлены в текстовой форме, а выводы делаются на основе человеческих рассуждений, сейчас интенсивно развиваются экспертные системы искусственного интеллекта, которые подкрепляют человеческую память и интенсифицируют способности человека к объективному выводу и умозаключениям [2].

Нами исследуются принципы построения экспертных систем применительно к проблеме охраны труда, продолжая предыдущие исследования [3]. Цель работы — анализ возможности использования аппарата дискретной математики для описания знаний подобных систем и механизмов обработки этих знаний. Создаваемая экспертная система должна иметь набор знаний,

позволяющих в результате анализа производства с точки зрения наличия производственных вредностей, а также анализа состояния здоровья работающих на производстве людей определить набор средств защиты и лечебных воздействий на организм, которые позволят длительно сохранять трудоспособность на данном рабочем месте или восстанавливать утраченную.

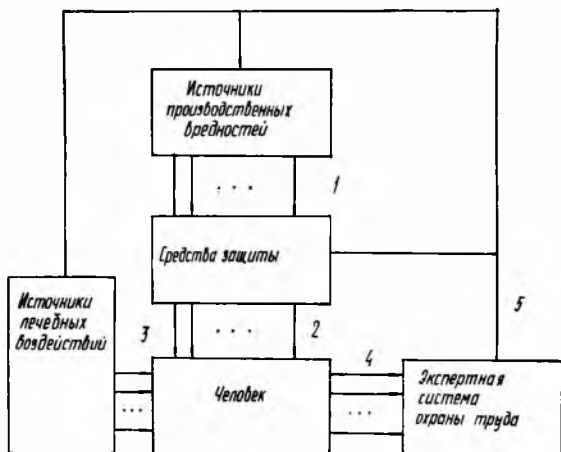


Схема управления процессами охраны труда представлена на рисунке, где 1 — вредные воздействия на выходе источника; 2 — результат прохождения воздействий через систему защиты; 3 — лечебные воздействия (лечебно-профилактические мероприятия); 4 — параметры, характеризующие состояние здоровья человеческого организма; 5 — управляющие воздействия экспертной системы на другие системы на основе анализа состояния здоровья человека с целью удержания параметров, характеризующих это состояние в допустимых пределах.

В данной работе не рассматриваются количественные оценки входных и выходных параметров отдельных блоков приведенной схемы, берется лишь один логический признак наличия или отсутствия заданного параметра. С этим допущением в работе предлагается для представления знаний системы о вредных воздействиях, средствах защиты, лекарственных препаратах, человеке и об их взаимосвязи использовать уравнения алгебры логики.

Обозначим через R_1, R_2, \dots, R_z признаки трудоспособности человека для конкретных видов работы:

$$R_i = \begin{cases} 1, & \text{если в данной ситуации человека по состоянию здоровья можно допустить к } i\text{-й работе;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Пусть x_1, x_2, \dots, x_n — признаки функциональных расстройств организма человека:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-е расстройство имеет место у человека;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Существует некоторая логическая взаимосвязь между признаками трудоспособности и признаками функциональных расстройств:

$$R_i = F_i^1(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где F — некоторая логическая функция. Для записи данной функции берется дизъюнкция различных комбинаций функциональных расстройств, приводящих к потере трудоспособности для выполнения данной работы, и составляется общее отрицание. Например, функция $R_1 = x_1 x_3 \vee x_2 x_4$ означает, что человек не может быть допущен к работе R_1 , если у него обнаружены функциональные расстройства x_1, x_3 или расстройства x_2, x_4 .

Пусть y_1, y_2, \dots, y_m — признаки наличия симптомов, определяющих функциональные расстройства:

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{если у человека выявлен } i\text{-й симптом;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Существует некоторая логическая взаимосвязь между признаками функциональных расстройств человеческого организма и признаками выявленных симптомов:

$$x_i = F_i^2(y_1, y_2, \dots, y_m). \quad (2)$$

Для записи данной функции берется дизъюнкция различных комбинаций симптомов, характеризующих данное функциональное расстройство. Например, $x_1 = y_1 y_2 y_3 \vee y_2 y_3 y_4$ означает, что функциональное расстройство x_1 имеет место, если выявлены симптомы y_1, y_2 и y_3 или симптомы y_2, y_3 и y_4 .

Пусть $y_1^0, y_2^0, \dots, y_m^0$ — признаки того, что соответствующие симптомы имели место у человека еще до начала воздействия на него:

$$y_i^0 = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й симптом имел место у человека еще до} \\ & \text{начала воздействия;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Пусть z_1, z_2, \dots, z_k — признаки наличия в данной ситуации вредных воздействий на человека:

$$z_i = \begin{cases} 1, & \text{если имеет место } i\text{-е воздействие;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Пусть L_1, L_2, \dots, L_l — признаки использования лечебных воздействий на человека:

$$L_i = \begin{cases} 1, & \text{если используется } i\text{-е лечебное воздействие;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Существует логическая взаимосвязь между признаками наличия симптомов и признаками исходных симптомов, признаками вредных и лечебных воздействий:

$$y_i = F_i^3(y_i^0, z_1, z_2, \dots, z_k, L_1, L_2, \dots, L_l). \quad (3)$$

Для записи данной функции берется дизъюнкция факторов, определяющих наличие данного симптома, и умножается на

отрицание дизъюнкции факторов, подавляющих данный симптом.

Например, запись $y_1 = (y_1^0 \vee z_1 \vee z_2 z_3) \cdot \overline{(L_4 \vee L_1 L_2 \vee L_2 L_3)}$ означает, что симптом y_1 появляется у человека, если он был у него еще до начала воздействия или имеет место воздействие z_1 или воздействия z_2 и z_3 ; при этом симптом y_1 может быть ликвидирован лечебным воздействием L_4 или одной из комбинаций лечебных воздействий: L_1, L_2 или L_2, L_3 .

Пусть $z_1^0, z_2^0, \dots, z_k^0$ — признаки наличия источников вредных воздействий:

$$z_i^0 = \begin{cases} 1, & \text{если имеется источник } i\text{-го воздействия;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Пусть p_1, p_2, \dots, p_t — признаки использования средств защиты:

$$p_i = \begin{cases} 1, & \text{если используется } i\text{-е средство защиты;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Существует логическая взаимосвязь между признаками наличия вредных взаимодействий и признаками наличия источников воздействий и средств защиты:

$$z_i = F_i^4(z_i^0, p_1, p_2, \dots, p_t). \quad (4)$$

Для записи данной функции берется произведение признака наличия источника соответствующего воздействия и отрицания дизъюнкции наборов средств, подавляющих данное воздействие.

Например, запись $z_1 = z_1^0 \overline{(p_1 p_2 \vee p_3)}$ означает, что воздействие z_1 имеет место, если есть источник этого воздействия, а также, что данное воздействие можно подавить, используя одну из комбинаций средств защиты: p_1, p_2 или p_3 .

Пусть $L_1^0, L_2^0, \dots, L_l^0$ — признаки наличия источников лечебных воздействий (лекарственных препаратов, процедур и т. п.):

$$L_i^0 = \begin{cases} 1, & \text{если имеется источник } i\text{-го лечебного воздействия;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Существует логическая взаимосвязь между признаками использования лечебных воздействий, признаками наличия их источников и признаками наличия симптомов (противопоказаний к использованию данного лечебного воздействия)

$$L_i = F_i^5(L_i^0, y_1, y_2, \dots, y_m). \quad (5)$$

Для записи данной функции берется произведение признаков наличия источника соответствующего лечебного воздействия и отрицания дизъюнкции симптомов, которые являются противопоказаниями к использованию конкретных лечебных воздействий.

Например, запись $L_1 = L_1^0 \overline{y_1 \vee y_2}$ означает, что L_1 окажет лечебное воздействие, если имеется источник данного воздействия и отсутствуют противопоказания (симптомы y_1 и y_2) к использованию этого воздействия.

Пусть $p_1^0, p_2^0, \dots, p_i^0$ — признаки наличия соответствующих средств защиты:

$$p_i^0 = \begin{cases} 1, & \text{если имеется } i\text{-е средство защиты;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Существует логическая взаимосвязь между признаками использования средств защиты, признаками их наличия и симптомами, которые являются противопоказаниями к использованию конкретных средств защиты:

$$p_i = F_i^0(p_i^0, y_1, y_2, \dots, y_m). \quad (6)$$

Данная функция записывается аналогично (5). Например, $p_1 = p_1^0 \bar{y}_3$ означает, что средство защиты p_1 может быть использовано, если оно имеется в наличии и нет противопоказания y_3 к его использованию.

Любой технологический процесс и состояние здоровья работающих на данном производстве людей легко могут быть формально описаны системами уравнений (1)—(6). Интерес представляет проектируемая возможность автоматического перехода от декларативного описания обстановки к формальным записям (1)—(6).

Системы уравнений (1)—(6), составленные для конкретных производств, позволяют диалоговой экспертной системе при выяснении ею некоторых исходных данных решать ряд важных задач охраны труда. В соответствии с определяемыми признаками, задачи, решаемые экспертной системой охраны труда, можно разбить на 7 классов: анализа трудоспособности, медицинской диагностики, выбора средств защиты, назначения лечебных воздействий, анализа технологического процесса, медицинского прогнозирования, комбинированные задачи.

Рассмотрим примеры решения некоторых задач.

Задача 1. Пусть знания экспертной системы представлены уравнениями:

$$R_1 = \overline{x_1 x_3 \vee x_2 x_4}; \quad R_2 = \bar{x}_2;$$

$$x_1 = y_1 y_3 \vee y_1 y_4; \quad x_2 = y_2 y_4;$$

$$x_3 = y_1 y_5 \vee y_1 y_2; \quad x_4 = y_5.$$

Результаты тестирования человека $y_1=1; y_2=1; y_3=1; y_4=0; y_5=0$. Требуется определить, к какой из работ R_1 или R_2 допустить этого человека.

Получаем

$$x_1 = 1 \cdot 1 \vee 1 \cdot 0 = 1; \quad x_2 = 1 \cdot 0 = 0; \quad x_3 = 1 \cdot 0 \vee 1 \cdot 1 = 1; \quad x_4 = 0;$$

$$R_1 = \overline{1 \cdot 1 \vee 0 \cdot 0} = \bar{1} = 0; \quad R_2 = \bar{0} = 1,$$

т. е. данного человека можно допустить к работе R_2 , но нельзя допускать к R_1 .

Задача 2. Известны воздействия, имеющие место на данном производстве. Определить, сможет ли человек с заданным

начальным состоянием здоровья без использования лечебных воздействий и средств защиты сохранить работоспособность в условиях данного производства. К уравнениям из предыдущего примера добавлены следующие уравнения:

$$y_1^1 = y_2^1 = y_3^0 = y_4^1 = y_5^1 = 0; \quad y_1 = y_1^1 \vee z_1 z_5 \vee z_2 z_3;$$

$$y_2 = y_2^0 \vee z_1 z_2; \quad y_3 = y_3^0 \vee z_1 z_4 \vee z_1 z_3;$$

$$y_4 = y_4^1 \vee z_1 z_5 \vee z_2; \quad y_5 = y_5^0 \vee z_2 z_4 \vee z_3 z_5;$$

$$z_1 = z_4 = 0; \quad z_2 = z_3 = z_5 = 1.$$

Получаем

$$y_1 = 0 \vee 0 \cdot 1 \vee 1 = 1; \quad y_2 = 0 \vee 0 \cdot 1 = 0; \quad y_3 = 0 \vee 0 \cdot 0 \vee 0 = 0;$$

$$y_4 = 0 \vee 0 \cdot 1 \vee 1 = 1; \quad y_5 = 0 \vee 1 \cdot 0 \vee 1 \cdot 1 = 1;$$

$$x_1 = 1 \cdot 0 \vee 1 \cdot 1 = 1; \quad x_2 = 0 \cdot 1 = 0; \quad x_3 = 1 \cdot 1 \vee 1 \cdot 0 = 1; \quad x_4 = 1;$$

$$R_1 = 1 \cdot 1 \vee 1 \cdot 1 = 0; \quad R_2 = 0 = 1.$$

Значит, без защиты при идеальном начальном состоянии здоровья в условиях данных воздействий человек может сохранять трудоспособность к работе R_2 и не может — к работе R_1 .

Аналогично решаются многие другие задачи. Несмотря на отсутствие количественных оценок для рассматриваемых параметров, экспертная система, базирующаяся на приведенном выше аппарате, может выдавать ряд ценных рекомендаций по организации процессов охраны труда. Перспективой дальнейшей разработки является придание экспертной системе возможности количественной оценки параметров, характеризующих процессы охраны труда.

Список литературы: 1. Информационное сообщение о совещании в Центральном Комитете КПСС//Правда. 1986. 16 нояб. 2. Поспелов Г. С. Социальные и методологические проблемы информатики, вычислительной техники и средств автоматизации//Вопр. философии. 1986. № 9. С. 23. 3. Дзюндзюк Б. В., Терзиян В. Я. Принципы построения интеллектуального обучаемого естественно-языкового интерфейса для решения задач борьбы с профессиональными заболеваниями//Пробл. бионики. 1988. № 40. С. 46—52.

Поступила в редколлегию 20.10.87

Т. И. АХМЕДОВ, канд. мед. наук, Г. А. КОЛОТЕНКО, канд. техн. наук,
О. В. ЗАЙЦЕВА, канд. биол. наук

МАЖОРИТАРНАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ КОМБИНАТОРНЫХ ПРИЗНАКОВ АСИНХРОННЫХ И СИНХРОННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ГОЛОВНОГО МОЗГА В НОРМЕ И ПРИ АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТОНИИ

Одна из задач биологической и медицинской кибернетики и бионики — расширение, углубление исследований закономерностей и направленностей физиологических явлений, а также создание соответствующих адаптивных бионических систем.

Настоящая статья посвящена изучению кибернетических принципов и конкретных механизмов, обеспечивающих исключительные возможности резерва и надежности функционирования целостного мозга как системы в состоянии нормы и при патологии — артериальной гипертензии.

При моделировании информационных и логических связей в плане системно-кибернетического подхода к анализу электроэнцефалосигналов (ЭЭС) иерархия систем пространственно-временных организаций A комбинаторных признаков асинхронных и синхронных потенциалов (КПАСП) X головного мозга представляется интегральной, так как множества и подмножества $A(X)$ КПАСП головного мозга без кооперативного существования немислимы.

Сложность моделируемой многопороговой и многофункциональной ЭЭС картины заключается в том, что системы $A(X)$ головного мозга характеризуются разной степенью вероятности инвариантно индивидуальным особенностям. Значит, возможен автоматический анализ нечетких, размытых множеств с учетом степени вероятностной выраженности КПАСП. Благодаря этой особенности системы $A(X)$ могут идентифицироваться при помощи мажоритарной многопараметрической функции, когда особо важна вероятностная направленность разнообразия структур, частостей (веса) КПАСП головного мозга, характеризующая различимость функциональных состояний при норме и патологии. Автоматический анализ по нашей методике позволяет аналитически отделить одну систему $A(X)$ головного мозга от другой. Исходя из этого, мажоритарная модель позиционной системы $A(X)_i$ головного мозга, например трехкомпонентных структур, может описываться триадной (трехкоординатной, трехместной) мажоритарной функцией

$$A(X)_i = MG(x_1, x_2, x_3) = x_1 x_2 \cup x_1 x_3 \cup x_2 x_3, \quad x_1 \neq x_2 \neq x_3,$$

где MG — аналог предиката мажоритарности, \cup — символ дизъюнкции в соединительно-разделительном смысле. Пропуск знака между буквами, обозначающими координаты (адрес) потен-

циалов x_1, x_2, x_3 головного мозга, представляет символ дизъюнкции.

Если производить кибернетическую оценку различных функциональных состояний с помощью КПАСП, представляющих $X_i = \{x_{i_1}, \dots, x_{i_n}\}$, где n — выборка, то мажоритарная модель позволяет отобразить любое нечеткое множество дискретных переменных сигналов, селективируемых из многоканальных случайных нестационарных ЭЭС, паронимных (близких по внешней форме), равных по числу, но разных по составу. В этом случае мера — категория, выражающая единство количественных и качественных пространственно-временных характеристик иерархических систем $A(x) = \{A(X_1), \dots, A(X_n)\}$, которые характеризуются переменностью (V), весом (W), структурой (S_i), соответствующих фазовым портретам различных функциональных состояний целостного организма как системы. При этом $A(X)$ бесконечного числа зон регистрации мозга равна

$$A(X) = MG(x_1, \dots, x_n) = x_1 x_2 \cup x_1 x_3 \cup \dots x_1 x_2 x_3 \cup \dots$$

На практике число зон регистрации ЭЭС ограничено топологией, n — выборкой измерительных каналов. Поэтому $A(X) = f(V, W, S_i)$ означает, что мажоритарная функция в данном случае не только мультипараметрическая, но и многомерная, многонаправленная: $A(X) = MG(V, W, S_i)$.

При идентификации множества $A(X)$ головного мозга удобно выражать в виде дискретных признаков вариационных рядов иерархических рангов, обозначаемых в соответствии с количеством компонент структур C_n^1, \dots, C_n^n . Так как $A(X)$ характеризуется мажоритарной функцией $MG(V, W, S_i)$, то $A(X) = MG(V, W, S_i)$. Вследствие индивидуальности ЭЭС выборок вес систем пространственно-временных взаимосвязей головного мозга может оцениваться соответствующими признаками переменных рядов распределения случайных величин весов этих систем. Каждый признак характеризуется весовым интервалом. Границы интервала разворачиваются или остаются постоянными при увеличении выборки.

Расширение интервала $[W_{\min}, W_{\max}]$ происходит за счет появления веса W вне пределов. Вместе с тем различные функциональные состояния имеют вероятностную устойчивость. При анализе распределения W КПАСП, представлены кривой, ограниченной верхним и нижним пределами вероятностного интервала признака, пары весов можно анализировать по способу Неймана, когда пары случайных точек плоскости равномерно распределены вдоль осей абсцисс и ординат, где ось абсцисс — ось веса W , ось ординат $WG(W)$ — ось плотности веса закодированных синхронных и асинхронных потенциалов, т. е. КПАСП головного мозга.

Вероятность того, что случайный вес W закодированных потенциалов головного мозга окажется в элементарном отрезке $[W, W + dW]$ вероятного интервала $[W_1, W_n]$ признака разли-

чимого функционального состояния, очевидно пропорциональна $MG(W)$, а вероятность попадания веса под кривую $WG(W)$ по условию должна равняться единице. Анализ методом кусочной аппроксимации, согласно которому, имея плотность весов $MG(W)$, экспериментально устанавливается область весов W , различных ЭЭС выборок синдрома или различных состояний нормы, полученных под действием адекватных раздражителей, ограничивается $[W_1, W_n]$. Этот интервал разбивается на n элементарных отрезков. Распределение весов в пределах этих отрезков $[W, W+dW]$ позволяет гомоморфно отобразить распределение весов КПАСП исследуемых ЭЭС выборок.

Автоматический анализ множества несовмещенных двухкомпонентных структур $A(X)$ головного мозга, полученных на основании репрезентативных 10-секундных ЭЭС выборок 40 больных с опухолями теменной области и правосторонним расположением опухоли, приводит к следующим выводам.

Согласно гауссову распределению центр тяжести μ веса W несовмещенных $A(X)$ двухкомпонентных структур обнаруживает малозаметную асимметрию с ростом весов от H_{26}^2 к H_7^2 ряда характеристических пороговых мажоритарных функций. Часто центры тяжести левой стороны μ_s и правой стороны μ_d уравниваются ($\mu_s \approx \mu_d$) или разнятся на $1 \div 1,5$ бита. При $\mu_s \approx \mu_d \approx 4,5$ бит почти в два раза возрастает вес среднеквадратического отклонения σ_d системы $F_d - F_s(H_4^2)$ правой стороны. Почти во столько

ко ($K_{cp} = \frac{\sigma_s}{\sigma_d} = \frac{17}{10,3} = 1,16$) отличается вес системы $T_d - P_d (H_5^2)$

левой стороны. Веса σ системы $P_d - P_s(H_{21}^2)$; $K_{cp} = \frac{\sigma_d}{\sigma_s} = 11,3/5,6 = 2,02$. Веса остальных систем синхронных потенциалов стремятся к уравнению σ_s и σ_d , что свидетельствует о равномерном распределении данных локальных КПАСП головного мозга.

Огиба, построенная по μ несовмещенных КПАСП, характеризуется $\sup \mu_d = 4,7$ бит системы $O_s - P_s(H_{28}^2)$, $\inf \mu_d = 0,6$ бит системы $T_d - O_d(H_8^2)$. В соответствии с общей направленностью весов обнаруживается билатеральная асимметрия систем пространственно-временных лабильных связей с акцентом на зонах регистрации левой стороны при опухолевой локализации центральных извилин и теменной области правой D -стороны. Как видно, архитектура пространственно-временных изменений КПАСП сложна, иерархична и существенно отличается как по характеру, так и по природе проявления. Знание этих изменений углубляет понятие механизмов преобразований КПАСП в динамике изменений ЭЭС с выявлением пространственно-временных особенностей фазовых портретов различных функциональных состояний организма как целостной интегративной системы.

Доверительный интервал для математического ожидания $\Delta\epsilon_{\beta}(\mu)$ в основном лимитирован пределами допустимого перемещения μ признаков несовмещенных синхронных потенциалов головного мозга: $0,6 \div 0,9$ бит. Максимальный допуск $\sup \Delta\epsilon_{\beta}(\mu) = 9,3$ бит у системы $P_d - P_s$ -опухолевой локализации D -стороны.

Наибольший доверительный интервал для среднеквадратического отклонения $\Delta\epsilon_{\beta}(\sigma)$ у системы $F_d - T_d(H_1^2)$. Характерно равенство $\Delta\epsilon_{\beta}(\sigma)$ для диапазона систем $(O_d - P_s) \div (F_d - T_d)$.

Коэффициент вариации независимо от расположения опухолевого узла в среднем равен $250 - 300$ бит. Четко различается по весу W система $P_d - F_s(H_{19}^2)$. Коэффициент асимметрии выявляет правостороннюю асимметрию весов W : $\sup A_k = 9,4$ бит $(F_d - T_s)$; $\inf A_k = 0,4$ бит $(T_d - F_s)$.

Преобладают островершинные кривые распределения накопленных за ЭЭС реализацию весов W несовмещенных пространственно-временных синхронных потенциалов головного мозга. Пределы $\sup \epsilon_k = 9,2$ бит $(P_d - O_s)$, $\inf \epsilon_k = 0,8$ бит $(T_d - T_s)$. Плосковершинность кривых распределения W меняется в полосе $\sup(-\epsilon_k) = -0,3$ бит $(T_d - O_d)$, $\inf(-\epsilon_k) = -7,2$ бит $(O_s - P_s)$.

Различение W относительных ошибок m_s и m_d возможно для систем $F_d - F_s$, $T_d - P_d$. Коэффициенты сравнения для них $K_{cp} = m_d / m_s = 3,61 / 2,02 = 1,8 (H_4^2)$; $K_{cp} = \frac{m_d}{m_s} = 2,87 / 4,37 = 0,66 (H_5^2)$. В среднем $m_s \approx m_d \approx 1,1 \div 2,5$ бит.

Расхождение между теоретическими и экспериментальными распределениями весов пространственно-временных организаций синхронных потенциалов головного мозга несовмещенных двухкомпонентных структур опухолевой локализации центральных извилин и теменной области D -стороны не имеется, так как $\inf P(\lambda_0) = 0,07$ бит $(F_d - P_d) > 0,05$.

Критерий Пирсона χ^2 выявляет случайность возможного расхождения между эмпирическими и теоретическими функциями распределения весов W совмещенных синхронных потенциалов головного мозга. Это доказывается расчетом граничных значений. При $N = 8$, $S = 0,08$, $K = N - 1 - S = 8 - 1 - 0,08 \approx 7$. При $K = 7$, $\inf \chi^2 = 0,07 (F_d - O_d)$, $\beta > 0,01$. При $N = 8$, $S = 1,36$, $\sup \chi^2 = 8,8$ бит $(P_s - P_d)$, $K = N - 1 - S = 8 - 1,36 - 1 = 6$, $\beta > 0,01$. При $N = 8$, $S = 6,88$, $\chi^2 = 7,4 (P_d - T_s)$, $K = 8 - 1 - 6,88 = 0,12$, $\beta = 0,014$. Здесь N , S , β — условные обозначения согласно программе обработки.

Кибернетическая оценка медико-биологического материала (ЭЭС испытуемых-операторов АСУ) устанавливает, например, у оператора E при счете в уме простого арифметического примера

$$K_s^{14} = \frac{S^{14}}{S_b^{14}} = \frac{8,8}{5,2} = 1,7; \quad K_s^{28} = \frac{S_y^{28}}{S_b^{28}} = 0,9,$$

где числа 14 и 28 равны пороговому уровню в микровольтах, y — утренние часы, v — вечерние часы работы оператора E .

Индекс пропорциональности данной тенденции J почти такой же, как в период фона, что свидетельствует об отсутствии объективных изменений по данному параметру.

Анализ приведенных результатов показывает, что при опухолях теменной области и центральных извилин имеется четко выраженная трансформация ЭЭС с локализацией, в то время как в норме она «размыта», неопределенна. Элементы двух возбуждений, двух целостных деятельности организма (по П. К. Анохину) при опухолях мозга сведены к гипертрофированию множества интегральных подсистем $A(X)$ иерархических структур. При этом нарушается оптимальный ход физиологических констант и функций, происходят нестационарные случайные и неоднородные процессы в направлении регрессивных необратимых преобразований, смещение зон депрессии и экзальтации, перераспределение областей лабильности и перемещение в пространстве и времени системы импульсного возбуждения целостного мозга. В данных условиях не исключено, что система электротонического возбуждения лобных зон, тормозящих в прямом направлении формирование множества доминантных $A(X)$, выполняет роль «запоминания постоянной и переменной составляющих». В бионико-кибернетическом аспекте это можно условно сравнить с микроминиатюрным аналоговым блоком памяти, функционирующим по принципу вероятностного ввода и вывода комбинаторных сигналов.

Такая памятныйная бионическая система позволяет реализовать мультипараметрическую мажоритарную модель нечеткого множества иерархических КПАСП. Видоизмененная «конфликтность» между зонами генерации и регенерации множества систем КПАСП головного мозга способна удержать оптимальный ход всех процессов организма с сохранением реакций противоположного биологического знака (по П. К. Анохину). С помощью вероятностного удерживания можно бионически смоделировать инерционный момент пространственно-временного распределения доминанты как одной из акцентируемых сторон рекомбинирования систем интегративных взаимосвязей головного мозга.

У больных гипертонической болезнью (ГБ) первой стадии наблюдается в основном астено-невротические расстройства и частые (по данным ЭЭГ) нерегулярные ритмы биопотенциалов мозга с преобладанием бета-ритма в передних отделах мозга, низкоамплитудного десинхронизированного бета-ритма во всех отведениях ЭЭГ и параксизмов тета-волн высокой амплитуды.

В стадии II А увеличивается количество неврологических расстройств ЭЭГ волны, в основном они те же, что и в I стадии.

В стадии II Б гипертонической болезни повышается частота регулярного уреженного альфа-ритма с наличием диффузных тета-колебаний.

Таким образом, в ранних стадиях гипертонической болезни отмечается дезорганизация, нерегулярность частот потенциалов мозга, уменьшение числа регулярных альфа-волн со снижением их амплитуды и увеличение в поздних стадиях диффузной дизритмии или тенденции к ее исчезновению и восстановлению регулярной альфа и бета активности.

У больных ГБ изменяется функциональное состояние головного мозга в сторону повышения его возбудимости и лабильности с частыми нерегулярными ритмами потенциалов мозга, с некоторым снижением его возбудимости и лабильности, с регулярным урежением альфа-ритма и диффузности тета-волн на ЭЭГ. Как видно, функциональное состояние можно описывать рядом признаков. Они могут быть выражены многопараметрической мажоритарной моделью. При различении функциональных состояний и особенностей синдрома по выборкам нечетких множеств КПАСП $X \approx \dots Y \approx \dots Z$, где Y -КПАСП — пространственно-временной параметр реоэнцефалосигналов, Z -КПАСП — пространственно-временная одномоментная характеристика оксигемосигналов и т. д. в аспекте теории информации условно представлены своеобразными паттернами или репрезентативными алгоритмами (РА), состав которых определяется семантическими и синтаксическими правилами, в качестве которых выступают КПАСП инвариантных структур, а в гомоморфной модели — P -мерный вектор, т. е.

$$(X_1, \dots, X_n) = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{p1} & x_{p2} & \dots & x_{pn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}.$$

В общем случае $A(X)$ представляет множество различных функциональных состояний, т. е. $X = \{X_1, \dots, X_n\}$, ..., $Z = \{Z_1, \dots, Z_n\}$. При эквивалентном соответствии величин пространственно-временных характеристик производится различение по интегральным показателям соответствующего функционального состояния

$$(X_1^{(1)}, \dots, X_n^{(1)}) = \begin{pmatrix} x_{11}^{(1)} & \dots & x_{1n}^{(1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{p1}^{(1)} & \dots & x_{pn}^{(1)} \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

$$(X_1^{(n)}, \dots, X_n^{(n)}) = \begin{pmatrix} X_{11}^{(n)} & \dots & X_{1n}^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{p1}^{(n)} & \dots & X_{pn}^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}.$$

Если в общем случае автоматически анализируется ансамбль РА различных функциональных состояний, то в частном —

структурные составляющие РА, имеющие вероятностную выраженность. Состав отдельных КПАСП, входящих в состав РА, неоднороден, нестационарен, неэргодичен, вариабелен. Вместе с тем различение функциональных состояний приводит к возможности вероятностных элементов состава РА. Полученные в этом случае несмещенные состоятельные оценки для разных массивов выборки позволяют идентифицировать интегральные пространственно-временные характеристики различных состояний в системе количественных мер. Поэтому сколько методов, столько особенностей гомоморфных мажоритарных моделей КПАСП. Так, при различении функциональных состояний методом кодовых групп, когда нестационарное случайное многоканальное размещение КПАСП во времени перекодируется, составные элементы структур занимают определенное положение относительно друг друга во времени и в пространстве. При этом необходимо селективировать вероятностную направленность распределения КПАСП в различном РА. В результате выделяются те дискретные составляющие синхронных и асинхронных потенциалов, которые совпадают с кодовой естественной группой. Такой код полезен, так как частота его вариабельных сигналов совместима с различимостью функционального состояния. Вероятностная направленность КПАСП соответствует характеру конструкции мажоритарной модели.

Таким образом, при помощи аналогичных методов можно строить случайные многомерные мажоритарные функции, аргументами которых являются существенные пространственно-временные характеристики. Синтез этих сигналов позволяет получить уплотненные массивы, по которым строятся компактные бионические гомоморфные модели в форме удобной для физиологического осмысления. Точность отображения исходной системы вариабельных сигналов для построения мажоритарной модели КПАСП зависит от погрешности измерений, которые, как известно, классифицируются на методические, инструментальные и субъективные (персональные). Каждый класс погрешностей измерения КПАСП рассчитывается по соответствующей методике. В качестве исходных данных используются характеристические параметры КПАСП, структурные схемы измерительных каналов мультипараметрических устройств анализа ЭЭС и т. д., метрологические и точностные параметры КПАСП, средств измерений, программно-модульного обеспечения, входящего в состав с соответствующей эксплуатационной документацией, линии связи, по которым в измерительных трактах мультипараметрического устройства (МПУ) осуществляется передача селективированных дискретных сигналов из случайных нестационарных процессов. Вносимые ими погрешности должны входить составной частью в сумму погрешностей МПУ.

В данном случае под измерительными каналами понимается набор функционально объединенных технических средств и линий передачи, которые применяются в МПУ для селективирова-

ния из многомерных случайных нестационарных процессов дискретных переменных сигналов, уплотняемых в процессе многостадийного автоматического анализа в КПАСП, их ранжирования по классам и дальнейшем эквивалентном преобразовании. При использовании средств вычислительной техники для выполнения функций измерения и автоматического анализа на базе БИС и СБИС в виртуальный МПУ входят средства программного обеспечения, основанные на принципе КПАСП, которые могут задаваться в форме вероятностных (статических) и детерминированных параметров РА.

Статические КПАСП могут быть выражены математическим ожиданием, среднеквадратическим отклонением, коэффициентом вариации, плотностью распределения вероятности, спектральной плотностью и т. д.

Детерминированные КПАСП могут быть представлены в виде интервалов изменения весов, структур, пределов, допускаемых основной и дополнительной погрешностями.

Расчетное определение результирующих погрешностей измерений строится на основе прогностических параметров КПАСП с учетом суммирования составляющих погрешностей и емкости массивов выборок ЭЭС. Если указанные КПАСП вероятностны, то учет результирующих погрешностей должен производиться в соответствии с ГОСТ 8.009—72. В противном случае — никогда не избавиться от многоликости и многозначности заключений. Необходимо знать, что каждая из погрешностей измерений КПАСП состоит из систематической и случайной составляющих. Систематические составляющие мажоритарных функций КПАСП должны не превышать заданных пределов отклонений и не пересекаться с зонами различий функциональных состояний, несоизмеримых и несовместимых с данным. При аппроксимации систематическая составляющая погрешности измерения КПАСП оценивается гауссовым распределением, но действительное распределение устанавливается по аналогии распределения весов КПАСП.

Значения погрешностей измерения статистических параметров КПАСП являются их оценками, а не точными параметрами. Эти оценки носят вероятностный характер и должны градуироваться по шкалам существенности. Поэтому погрешности мажоритарных моделей КПАСП связаны зависимостями с вероятностями их нахождения и ограничены доверительными вероятностными пределами, представляющими доверительные интервалы, в которых КПАСП расположены инвариантно индивидуальным особенностям в соответствии с ГОСТ 11.004—74. Результирующие характеристики КПАСП мажоритарной функции позволяют определить вероятную топологию распределения активированных зон измерений, оцениваются с помощью абсолютной погрешности и выражаются в единицах измеряемого параметра. Их пересчет в форму относительной и приведенной погрешностей измерений и анализа КПАСП выражается в про-

центах от измеряемого или нормирующего значения мажоритарной функции КПАСП.

Таким образом, точность построения гомоморфной мажоритарной модели зависит от точности измерений, автоматического многостадийного анализа с помощью МПУ. Методические погрешности сведены к минимуму, так как методы преобразования ЭЭС, обработки и уплотнения измеренных массивов информации учтены разработчиком на стадии проектирования МПУ согласно ГОСТ 16263—70. При селектировании КПАСП учитывались скорость изменения ЭЭС, длительность выборки, периода различения функциональных состояний, амплитудно-фазовые и переходные динамические характеристики, вырез артефактов. Частные динамические характеристики сведены к величинам малого порядка. Погрешность измерений КПАСП в динамическом режиме представляет погрешность измерений, возникающих в процессе изменений во времени КПАСП. Величина этой погрешности зависит от характера измеряемых ЭЭС. Нестационарность КПАСП во времени и структурному составу с переменным несингулярным проявлением приводит к нестационарности погрешности, вследствие чего условия принятия достоверного и однозначного решения нарушаются.

Методическая погрешность многопараметрической мажоритарной функции является систематической и задана одним значением или однозначной функциональной зависимостью от величин КПАСП измеряемых параметров различной топологии активирования, согласно которой строятся фазовые портреты состояний высокой степени достоверности.

Поступила в редколлегию 13.04.87

УДК 681.335

Н. В. АЛИПОВ, д-р техн. наук

КОРРЕКТИРУЮЩИЕ АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ТОЧКИ НА ОТРЕЗКЕ $[0,1]$ С РАВНОМЕРНЫМ РАЗБИЕНИЕМ ИНТЕРВАЛОВ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Решение достаточно широкого класса задач искусственного интеллекта связано с выполнением конечного числа экспериментов, на основании которых выделяется объект из конечного множества объектов (узнается буква, отыскивается необходимый элемент множества или точка с характерным признаком на отрезке $[0, 1]$ и т. д. [1]). Причем эксперименты так распределяют по интервалам неопределенности, чтобы наименьшим их числом получить интервал неопределенности относительно искомого элемента требуемой длины. Планирование экспериментов и их анализ составляют предмет исследования теории поиска [2]. Известные алгоритмы поиска (распределения экспериментов

в выбранном интервале неопределенности) не являются помехоустойчивыми и не обладают корректирующими свойствами к динамическим ошибкам, обусловленным случайным блужданием элемента в интервале неопределенности [2].

Нами [3] синтезированы корректирующие динамические ошибки алгоритма поиска, осуществляющие пошаговое уменьшение интервала неопределенности относительно искомого элемента. Однако из-за неравномерного разбиения интервалов неопределенности их программная и техническая реализация порождает сложные схемы. Последние можно значительно упростить, используя алгоритмы поиска, с помощью которых выполняется равномерное разбиение. Рассмотрим такие алгоритмы поиска точки с характерным признаком на отрезке единичной длины.

С учетом равномерности разбиения задача поиска сформулирована в таком виде: область поиска — отрезок $[0, 1]$, блуждание точки характеризуется относительной максимальной скоростью блуждания точки в направлениях $0 \rightarrow 1 \quad \gamma_+$ и $1 \rightarrow 0 \quad \gamma_-$; эксперименты на j -м шаге алгоритма задаются разбиением A_j [4], для которого выполняются условия равномерности

$$l[x_{\rho_1}^j, x_{\rho_2}^j] = l[x_{\rho_1}^j, x_{\rho_1}^j], \quad \rho \neq \rho_1;$$

$$x_{\rho_1}^j, x_{\rho_1}^j \in \{x_{q_{j-1}-1}^{j-1}, x_1^j, x_2^j, \dots, x_k^j, x_{q_{j-1}-1}^{j-1}\},$$

$(x_{q_{j-1}-1}^{j-1}, x_{q_{j-1}-1}^{j-1})$ — полуоткрытый интервал неопределенности, выделенный на $(j-1)$ -м шаге алгоритма:

$$A_j = \{(x_{q_{j-1}-1}^{j-1}, x_1^j), [x_1^j, x_2^j), \dots, [x_k^j, x_{q_{j-1}-1}^{j-1})\},$$

$l[a, b]$ — длина отрезка $[a, b]$.

Множеством значений экспериментов, свободных от ошибок, является множество $Z = \{1, 2, \dots, k+1\}$ (k — количество одновременно проводимых экспериментов), элементы которого формируют согласно правилу

$$\varepsilon_{A_j} = \rho \leftrightarrow x(t_1 + \Delta t(j-1)) \in [x_{\rho-1}^j, x_{\rho}^j),$$

$\rho = \overline{1, k+1}$, $x(t_1)$ — значение координаты точки с характерным признаком в момент времени t_1 , Δt — длительность шага алгоритма, $\varepsilon_{A_j} \in Z$.

На основании решающей функции, формируемой согласно правилу: если $\varepsilon_{A_j} = \rho$, то $x \in [x_{\rho-1}^{j,1}, x_{\rho}^{j,2})$, x — точка с характерным признаком,

$$x_{\rho-1}^{j,1} = \begin{cases} x_{\rho-1}^j - h\gamma_-, & x_{\rho-1}^{j,1} \geq 0; \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$x_{\rho}^{j,2} = \begin{cases} x_{\rho}^j + h\gamma_+, & x_{\rho}^{j,2} \leq 1; \\ 1 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

x_p^j — координата точки x_p^j ; h — длина интервала неопределенности, выделенного на последнем шаге алгоритма; α — величина, зависящая от стратегии поиска; выделяется новый интервал неопределенности $[x_{p-1}^{j,1}, x_p^{j,2})$.

Алгоритм поиска характеризуется длиной поиска i (максимальным числом шагов) и числом одновременно проводимых экспериментов k .

Требуется при данных условиях построить оптимальный корректирующий i -шаговый алгоритм поиска точки $x \in [0, 1]$, удовлетворяющий минимальному критерию оптимальности

$$l_{z_2} = \min_{z_1 \in M_1} \max_{x \in [0,1]} \{l_i(x, z_1)\},$$

где M_1 — множество возможных алгоритмов; $l_i(x, z_1)$ — длина интервала неопределенности относительно x , полученного на i -м шаге z_1 -го алгоритма;

$$\varphi(i, k) = 1/l_i(x, z_1); \quad h = l_{z_2}.$$

Решим эту задачу путем исследования конечного числа исходов, возникающих в процессе поиска.

Первоначально выясним: каким образом связаны γ_+ и γ_- с количеством одновременно проводимых экспериментов k и сколько существует стратегий поиска, отличающихся формированием параметра α ?

Предположим, что $i=2$ и совершен первый шаг оптимального алгоритма, в результате которого выделен полуоткрытый интервал неопределенности $[x_{p-1}^1, x_p^1)$, $p=1, k+1$. Тогда, под действием случайного блуждания точка x за время второго шага может сместиться либо в направлении $1 \rightarrow 0$ от точки x_{p-1}^1 на величину γ_-h , либо в направлении $0 \rightarrow 1$ от точки x_p^1 на величину γ_+h . Из требований равномерности разбиения полуоткрытый интервал $[x_{p-1}^1, x_p^1]$ на втором шаге должен быть разделен хотя бы на два новых полуоткрытых интервала, каждый из которых имеет длину h .

Полуоткрытые интервалы $[x_{p-1}^{1,1}, x_{p-1}^1)$, $[x_p^1, x_p^{1,2})$, имеющие соответственно длины γ_-h и γ_+h , на втором шаге соответственно разбиваются на γ_- и γ_+ равных частей. Поскольку за один шаг полуоткрытый интервал $[x_{p-1}^{1,1}, x_p^{1,2})$, у которого

$$x_{p-1}^{1,1} = \begin{cases} x_{p-1}^1 - h\gamma_-, & x_{p-1}^{1,1} > 0; \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$x_p^{1,2} = \begin{cases} x_p^1 + h\gamma_+, & x_p^{1,2} \leq 1; \\ 1 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

разбивается на $(k+1)$ новый полуоткрытый интервал, каждый из которых имеет длину h , то, с учетом сказанного, параметры случайного блуждания γ_- и γ_+ связаны с параметром алгоритма соотношением $\gamma_- + \gamma_+ = k - 1$ (1).

Существуют два класса стратегий поиска, отличающихся формированием параметра α . Для алгоритмов первого класса поиск строится исходя из текущего значения динамической ошибки, для алгоритмов второго класса — исходя из значения динамической ошибки к концу поиска. Для первого класса $\alpha = j - 1$; для второго — $\alpha = (i - 1)$. Стратегию алгоритмов первого класса назовем стратегией «прошлого», стратегию алгоритмов второго класса — стратегией «будущего».

Условимся в дальнейшем считать, что на $(j+1)$ -м шаге полуоткрытые интервалы $[x_{\rho_{j-1}}^{j,1}, x_{\rho_{j-1}}^j], [x_{\rho_{j-1}}^j, x_{\rho_j}^j], [x_{\rho_j}^j, x_{\rho_j}^{j,2})$ соответственно разбиваются на $n_1^{j+1}, n_2^{j+1}, n_3^{j+1}$ равных частей, причем $n_1^{j+1} + n_2^{j+1} + n_3^{j+1} = k + 1$.

Первоначально рассмотрим стратегию «будущего» для случайного блуждания, у которого $\gamma_- = 0, \gamma_+ \geq 0$. Очевидным является тот факт, что чем меньше экспериментов размещается в интервалах $(x_{\rho_{j-1}}^{j,1}, x_{\rho_{j-1}}^j), (x_{\rho_j}^j, x_{\rho_j}^{j,2})$, тем выше эффективность алгоритма (при одних и тех же параметрах алгоритма i и k функция $\varphi(i, k)$ принимает большее значение). Поэтому необходимо так планировать распределение экспериментов, чтобы они размещались в интервале $(x_{\rho_{j-1}}^{j,1}, x_{\rho_j}^j)$ и только в необходимых случаях в интервалах $(x_{\rho_{j-1}}^{j,1}, x_{\rho_{j-1}}^j), (x_{\rho_j}^j, x_{\rho_j}^{j,2})$. Выясним, при каких условиях $n_3^j = 0$ ($n_j^j = 0$ по условию задачи).

Пусть совершены первый, второй, ..., $(j-1)$ -й шаги алгоритма, в результате которых соответственно были выделены полуоткрытые интервалы неопределенности (рассматривается наилучший случай)

$$[x_{\rho_{j-1}}^1, x_{\rho_1}^1), [x_{\rho_2-1}^2, x_{\rho_1}^2), [x_{\rho_3-1}^3, x_{\rho_1}^3), \dots; \\ [x_{\rho_{j-1}-1}^{j-1}, x_{\rho_1}^{j-1}); \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{j-1} \in \overline{1, k+1},$$

и с учетом случайного блуждания точки сформулирован полуоткрытый интервал неопределенности $[x_{\rho_{j-1}-1}^{j-1,1}, x_{\rho_1}^{j,2})$, у которого

$$x_{\rho_1}^{j,2} = x_{\rho_1}^{j,1} + h\gamma_+(i-1), x_{\rho_{j-1}-1}^{j-1,1} = x_{\rho_{j-1}-1}^{j-1}.$$

А при планировании j -го шага алгоритма возможно, что

$$l[x_{\rho_1}^{j,1}, x_{\rho_1}^{j,2}] = \gamma_+ h(i-1) < h\varphi^*(i-j, k),$$

где $\varphi^*(i-j, k)$ — число равных частей длины h , на которое разбивается выделенный на j -м шаге интервал неопределенности $(i-j)$ -шаговым алгоритмом. И если предположить, что на j -м

шаге выделен полуоткрытый интервал неопределенности $[x_{\rho_{j-1}}^j, x_{\rho_1}^1)$ (рассматривается наихудший случай), на основании которого сформулирован новый интервал неопределенности относительно x :

$$[x_{\rho_{j-1}}^j, x_{\rho_1}^{1,2}), x_{\rho_1}^{1,2} = x_{\rho_1}^0 + h\gamma_+(i-1),$$

и при этом имеет место соотношение

$$l[[x_{\rho_1}^1, x_{\rho_1}^{1,2}]] = \gamma_+ h (i-1) < h\varphi^*(i-j-1, k), \quad (2)$$

где $\varphi^*(i-j-1, k)$ — число равных частей длины h , на которое разбивается $(i-j-1)$ -шаговым алгоритмом выделенный на $(j+1)$ -м шаге интервал неопределенности относительно x , то, как это следует из соотношения (2), динамическую ошибку можно скорректировать и после выполнения $(j+1)$ -го шага.

Это и обосновывает истинность равенства $n_3^j = 0$. Итак, мы пришли к такому заключению.

1. Если при выполнении j -го шага алгоритма имеют место соотношения

$$\gamma_+(i-1) < \varphi^*(i-j, k);$$

$$\gamma_+(i-1) < \varphi^*(i-j-1, k),$$

то $n_3^j = 0$, $n_2^j = k + 1$.

Проводя аналогичные рассуждения, получим и другие условия планирования экспериментов на j -м шаге алгоритма.

2. Если $j=2$ и имеет место соотношение

$$\gamma_+(i-1) = n_3^j \varphi^*(i-j, k)$$

и при этом $n_3^j = k-1$, то справедливо равенство $n_2^j = k + 1 - n_3^j$.

3. Если при выполнении j -го шага имеют место соотношения

$$\gamma_+(i-1) \leq n_3^j \varphi^*(i-j, k); \quad \gamma_+(i-1) \leq n_3^{j+1} \varphi^*(i-j-1, k), \quad (3)$$

где n_3^j, n_3^{j+1} — первые целые числа, при которых справедливы неравенства (3) и имеют место неравенства

$$1 < n_3^j \leq k-1; \quad 1 < n_3^{j+1} \leq k-1; \quad n_2^j n_2^{j-i} < n_2^{j+1} (k+1), \quad (4)$$

где $n_2^j = k + 1 - n_3^j$; $n_2^{j+1} = k + 1 - n_3^{j+1}$; n_2^{j-i} — количество равных частей, формируемых оптимальным $(i-j+1)$ -шаговым алгоритмом на втором его шаге, то будет истинным равенство $n_2^j = k + 1$, при ложности неравенств (4) справедливо выражение $n_2^j = k + 1 - n_3^j$.

4. Если при выполнении j -го шага алгоритма

$$\gamma_+(i-1) \leq n_3^j \varphi^*(i-j, k);$$

$$\gamma_+(i-1) \leq n_3^{j+1} \varphi^*(i-j-1, k)$$

и при этом $1 \leq n_3^j \leq k-1$; $n_3^{j+1} > k-1$, то истинным будет соотношение $n_2^j = k+1 - n_3^j$.

На основании этих условий планирования экспериментов на j -м шаге алгоритма составлена следующая схема построения i -шагового алгоритма.

1. Построить 1, 2, 3, ..., $(i-1)$ -шаговые алгоритмы, положить $z=1$.

2. Считать, что $n_{2,i}^z = k+1$, $z = z+1$ ($n_{2,i}^z$ — параметр i -шагового алгоритма, совпадающий с параметром n_2^z).

3. Если имеют место соотношения первого условия, то положить $n_{2,i}^z = k+1$ и перейти к п. 7, иначе — к п. 4.

4. Если выполняются неравенства второго условия, то положить $n_{2,i}^z = k+1 - n_3^z$ и перейти к п. 8, иначе — к п. 5.

5. Если справедливы соотношения четвертого условия, то положить $n_{2,i}^z = k+1 - n_3^z$ и перейти к п. 8, иначе — к п. 6.

6. Если справедливы соотношения третьего условия, то положить $n_{2,i}^z = k+1$ и перейти к п. 7, иначе положить $n_{2,i}^z = k+1 - n_3^z$ и перейти к п. 8.

7. Положить $z=z+1$ и если $z \leq i$, то перейти к п. 3, иначе — к п. 11.

8. Положить $z_1 = i - z + 1$, $z_2 = 2$, $z = z + 1$.

9. Если $z \leq i$, то перейти к п. 10, иначе — к п. 11.

10. Положить $n_{2,i}^z = n_{2,z_1}^z$, $z = z + 1$, $z_2 = z_2 + 1$ (n_{2,z_1}^z — параметр z_1 -шагового алгоритма n_2^z) и перейти к п. 9.

11. Построение алгоритма окончено.

Для алгоритмов, использующих стратегию «прошлого», распределение экспериментов по интервалам неопределенности осуществляется на основании таких условий.

5. Если при выполнении j -го шага алгоритма имеют место соотношения

$$(j-1)\gamma_+ \leq \varphi^*(i-j, k); \quad j\gamma_+ \leq \varphi^*(i-j-1, k),$$

то справедливо равенство $n_2^j = k+1$.

6. Если при выполнении второго шага алгоритма справедливо равенство $\gamma_+ = (k-1)\varphi^*(i-j, k)$, то n_2^j определяют из соотношения $n_2^j = k+1 - n_3^j$, где $n_3^j = k-1$.

7. Если при выполнении j -го шага алгоритма справедливы неравенства

$$\gamma_+(j-1) \leq n_3^j \varphi^*(i-j, k); \quad \gamma_+ j \leq n_3^j \varphi^*(i-j-1, k)$$

и при этом выполняются следующие соотношения:

$$1 \leq n_3^j \leq k-1; \quad 1 \leq n_3^{j+1} \leq k-1;$$

$$n_2^j n_2^{j-1} < n_2^{j+1} (k+1),$$

то будет истинным и равенство $n_2^j = k + 1$; если же последнее неравенство не выполняется, то истинным будет такое соотношение: $n_2^j = k + 1 - n_3^j$.

8. Если при выполнении j -го шага алгоритма справедливы выражения

$$\gamma_+(j-1) \leq n_3^j \varphi^*(i-j, k); \quad \gamma_+ j \leq n_3^{j+1} \varphi^*(i-j-1, k)$$

и при этом имеют место неравенства $1 \leq n_3^j \leq k-1$; $n_3^{j+1} > k-1$, то истинным будет и равенство $n_2^j = k + 1 - n_3^j$.

Схема построения i -шагового алгоритма, использующего стратегию «прошлого», аналогична схеме построения i -шагового алгоритма для стратегии «будущего».

На основании предложенной схемы построения i -шаговых алгоритмов для конкретных i , γ и k были синтезированы корректирующие алгоритмы с равномерным разбиением интервалов неопределенности (найлены значения $\varphi(i, k)$, $\varphi^*(i-j, k)$, для каждого j определены n_3^j).

Сопоставление полученных результатов показывает, что алгоритмы, использующие стратегию «прошлого», обладают большей эффективностью, а значит, при одном и том же значении параметра h меньшей длиной поиска, а следовательно, большим быстродействием, и на этом основании являются оптимальными в подмножестве алгоритмов поиска с равномерным разбиением интервалов неопределенности.

Список литературы: 1. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. Теория интеллекта. Математические средства. X., 1984. 140 с. 2. Альсведе Р., Вегенер Н. Задачи поиска. М., 1982. 355 с. 3. Алипов Н. В. Алгоритмы функционирования параллельно-последовательных преобразователей формы информации, корректирующих динамические ошибки//АСУ и приборы автоматки. 1985. Вып. 75. С. 57. 4. Алипов Н. В. Синтез помехоустойчивых алгоритмов поиска точки на отрезке $[0, 1]$ //Пробл. бионики. 1986. Вып. 37. С. 72—84.

Поступила в редколлегию 04.12.87

УДК 007:573.6.001.57

Н. И. ДЕНИСЕНКО, канд. техн. наук

СИГНАЛЬНЫЕ ПУТИ КАК НОСИТЕЛИ ИНФОРМАЦИИ В МОЗГОВЫХ СТРУКТУРАХ

Рефлекторная дуга, введенная М. Холлом в середине прошлого столетия, явилась основанием для развития коммутаторной теории замыкания нервных связей в процессе выработки условных рефлексов. Унгар предположил, что основные элементы приобретенной информации кодируются в определенных линиях или путях, появление нервного импульса в которых указывает на истечение кодированного события [1]. Роль замыка-

теля связи отводится синапсам. Несмотря на распространенность теории закрепления нервных связей, до сих пор отсутствуют какие-либо убедительные нейрофизиологические доказательства того, что в синаптических связях действительно имеются постоянные изменения. Не удалось локализовать и сигнальные

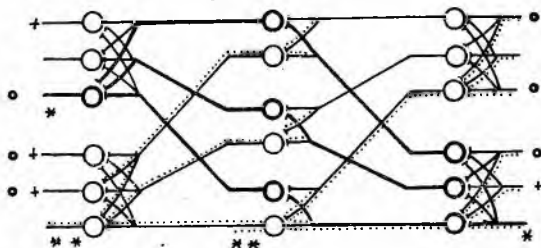


Рис. 1.

пути. Многочисленные эксперименты по экстирпации мозга не выявили точного места протекания путей, ответственных за память в каком-либо конкретном участке мозга. Нарушение функции памяти связывается с объемом удаленной мозговой ткани или разрушением сенсо-моторных связей, что подтверждает распределенность памяти. Нервная клетка как элемент самоорганизующейся системы обладает многофункциональностью и не располагает информацией о конечной цели поведения. Между тем интуитивно ясно, что мозг детерминирован по состояниям и обладает большой информационной емкостью.

Под рефлекторной дугой (нервной связью) понимается обычно психологический акт обработки стимула. В данной работе обосновывается наличие сигнальных путей, формирующихся в результате дискретноволновых процессов в мозговой структуре, как возможный механизм организации процедуры классификации, называемый «памятью». Поскольку работа носит гипотетический характер, выяснение специфики формирования сигнальных путей (СП) проводится на примерах известных информационных систем.

Рассмотрим предельные случаи формирования СП: в многокаскадной (многослойной) коммутирующей среде, обслуживающей абонентскую сеть или вычислительные автоматы, и в системе голографической записи изображений. На рис. 1 представлен граф связей многослойной структуры с выделенными сигнальными путями в коммутирующей среде с разделенными полюсами. Блоки данной среды разложены на ячейки *T*-типа с волновыми свойствами и матрицами смежности [2]:

$$T = \bigoplus_{i=1}^n T_i; T_i = \{R_i \& S_i\}; R_i = |r_{ij}|_{n,m}; S_i = |s_{ij}|_{m,n},$$

где \bigoplus — операция дизъюнктивного суммирования; $\&$ — операция логического умножения; $r_{ij} = s_{ji} = 1, i = \overline{1, n}; r_{ij} = s_{ji} = 0, i \neq j; k, j = \overline{1, m}$.

У ячеек данного типа управляемыми являются одноименные входы в R -части и выходы в S -части. R -часть ячейки представляет собой n -входовый вероятностный автомат ориентации включения, работающий на основе гоночной борьбы по типу латерального торможения. Выход ячейки имеет t ветвей, по которым распространяется в среду поисковая волна. S -часть ячейки с t входами и n выходами формирует обратную волну. Этот сигнал распространяется навстречу поисковой волне и используется на этапе образования связи как фиксирующий состояние памяти ячейки, а на этапе работы — для передачи обратной информации.

Характерной особенностью волновых коммутирующих сред является наличие фоновой активности ячеек в неиспользуемой в данном случае части среды. В силу требования несмещения информации ячейки удовлетворяют условию однозначности вхождения в информационные каналы.

Попытаемся образовать информационный канал между полюсами, отмеченными звездочками. В лавинном процессе распространения поисковой волны со стороны афферентного полюса опрашиваются сигнальные пути, обозначенные жирными линиями. Непосредственно из рис. 1 видно, что существование хотя бы одного незанятого пути связано с удовлетворением условий «перемешивания» до центрального слоя $n_1 n_2 \geq N$; $m_0 m_1 \geq M'$; $M' \geq M$ и после центрального слоя $n_2 n_3 \geq N$; $m_1 m_2 \geq M$, где N — число афферентных полюсов; M — число эфферентных полюсов; M' — число выходов из центрального слоя; n_i , m_i — числа конвергенции и дивергенции ячеек i -го слоя соответственно. Как показали исследования, модели нейронных сетей со стохастической архитектурой по экономичности приближаются к каскадным, но более приспособлены к условиям ненадежных компонент.

Пусть найден такой способ представления информации, что возможно до центрального слоя включительно слияние информационных каналов. Если параметры среды удовлетворяют приведенным условиям, то каждая ячейка центрального слоя может нести информацию о состояниях всех афферентов среды. В качестве примера пунктирно выделена система сходящихся сигнальных путей на ячейке, отмеченной двумя звездочками. Данное обстоятельство истолковывается как проявление голографического эффекта — распределения информации. Действительно, между парой отмеченных полюсов образуется система распределенных (неявно выраженных) сигнальных путей. Поэтому исключение части элементов первых слоев принципиально не исключает работоспособности среды.

Обратимся к голографической системе записи изображений [3]. На рис. 2 представлена общая схема голографической памяти. Пространство до экрана обеспечивает распространение (перемешивание) сферических волн, возбужденных в каждой точке исходного изображения. Эту процедуру можно записать в виде отношения $\Omega \xrightarrow{F} \Omega'$, где Ω — предъявленный образ, F —

линейное преобразование, Ω' — преобразованный образ. Отметим, что эта часть системы обладает памятью относительно преобразования F в данном случае в виде свойства точек пространства распространять пересекающиеся фронты волн. В результате интерференции волн от всех точек изображения и ключевого потока когерентных волн на экране образуется голограмм-

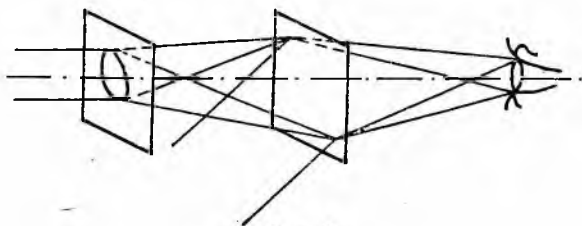


Рис. 2.

ма Ω' , в каждой точке которой записаны амплитуда и фаза результирующего колебания. Считывание изображения осуществляется возбуждением голограммы ключевым потоком. Характерно, что восстановить изображение можно по состояниям любой пары точек экрана (носителя). В пространстве между экраном и глазом наблюдателя волны возбужденные в точках голограммы претерпевают преобразование F так, будто бы и не было экрана. Оптическая система глаза наблюдателя осуществляет обратное преобразование F^{-1} . Полный процесс голографической памяти описывается отношением $\Omega \xrightarrow{F} \Omega' \xrightarrow{F^{-1}} \Omega$.

Применение линейного преобразования к исходному изображению не изменяет энтропии сообщения и потому не может претендовать на роль функции нейробиологической памяти. Действительно, поскольку $F^{-1}\{F(\Omega)\} \equiv \Omega$, то мотивационная сторона исключена. Функцию ключевого признака выполняет здесь опорный когерентный поток, что обеспечивает лишь унитарность кодирования сообщений. Но голографический принцип представления кодируемой информации обеспечивает исключительную живучесть системы в целом и потому весьма вероятно используется в организации мозговых систем.

Обоснуем принципиальную возможность присутствия голографического эффекта. Память — это удержание отношений, которое также может удерживаться отношениями. Будем также иметь в виду, что мозг оперирует не первичными образами, а абстрактными паттернами. Обращение к мозгу в целом (адресация) осуществляется по содержанию информации, в чем проявляется его сходство с системами ассоциативной памяти. Распространим этот принцип и на отдельную мозговую структуру. Попытаемся построить ее модель на примере рис. 1. Пусть первые слои образованы нервными клетками, обладающими малой инерционностью с функциями, обеспечивающими любое линейное преобразование активностей конвергирующих на них ней-

ронов. Если инерционность клеток такова, что улавливается разность хода импульсов из разных направлений, то на выходах клеток центрального слоя образуется новый паттерн, каждый элемент которого коррелирует (функционально связан) со всем первичным паттерном, но с учетом структурных отношений элементов первых слоев относительно данного выхода. Если считать функциональное содержание клеток постоянным и структуру связей неизменяющейся, то можно утверждать, что эта

система обеспечивает преобразование вида $\Omega \rightarrow \Omega'$, где Ω , Ω' — соответственно первичный и промежуточный паттерны; F — преобразование системы из первых слоев. Паттерн Ω' , как и в голографической модели, получен путем «перемешивания» волн от элементов первичного паттерна. В дальнейшем из распределенного паттерна Ω' необходимо сформировать код-ответ $R \neq \Omega'$. Именно формирование нового паттерна позволяет применять необратимые преобразования над первичным паттерном.

Паттерн Ω представляет собой пространственно-временную композицию спайков $u_j(t)$, $j \in I$, где I — множество клеток афферентного слоя. Спайк $u_j(t)$ образуется группой импульсов с временным распределением и потому может быть представлен рядом

$$u_j(t) = \frac{1}{N_j} \sum_{k=0}^{N_j} U_0 y_j(t_0 - t_{kj}),$$

где U_0 — амплитуда импульсов; $y_j(t - t_{kj})$ — нормирующая функция, равная единице при $t = t_{kj}$ и нулю в противном случае; N_j — число импульсов в спайке j -й клетки; t_0 — момент формирования паттерна Ω . В соответствии с гетерохронией роста П. К. Анохина дендритные деревья пирамидных клеток развиваются во время достижения их аксонами концевого органа. К этому времени функциональная система сформирована, и биологический объект осуществляет попытки достижения необходимого приспособительного акта. Феномен обучения обеспечивается за счет образования множественных контактов на дендритных деревьях клеток пирамидного слоя. Условием активации дендритного дерева i -й пирамидной клетки является образование систем контактов с ортогональным распределением

$$s_i(l) = \sum_{k=0}^{N_j} \gamma_k x_i(l_0 - l_{kj}),$$

где $x_i(l_0 - l_{kj})$ — нормирующая функция; $l_0 = vt'_0$ — расстояние по дендриту от сомы до начала распределения; $l_{kj} = vt_{kj}$ — расстояние от начала распределения до k -го контакта; v — скорость распространения активности по дендриту; γ_k — весовой коэффициент k -го контакта; t'_0 — время опроса дендритного дерева. Поскольку тело дендрита обладает большим декрементом

затухания [4], то необходимо присутствие наложения распределений от спайков других клеток, что приводит к образованию следа памяти всего паттерна. По достижению приспособительного акта со стороны концевой органа генерируются обратные токи белковых веществ [5], способствующие дегенерации неактивированных контактов. Формируется пространственная композиция систем контактов — дендрограмма, обеспечивающая пространственную компрессию (свертку) паттерна Ω . Во всем же пирамидном слое формируется пространственная нейрограмма, учитывающая активацию со стороны модулирующей структуры [6]. Поэтому на предъявленный паттерн Ω нейронная структура формирует код-ответ R в той же форме представления информации, что обеспечивает согласуемость систем мозга.

Приведенные отношения структурных параметров являются необходимым условием функциональной связи каждой возбужденной клетки центрального слоя со всем первичным паттерном. Линейным преобразованием в первых слоях может быть одновременно реализована процедура разложения входного паттерна на признаки, что могло бы составить основу для решения задачи инвариантности сообщений.

Принципам многослойности с повторением характерных триад соответствует архитектура коры больших полушарий.

В отличие от голографической памяти, нейрологическая память должна обеспечивать стирание биологически незначимой информации. Покажем, что процедура стирания может быть реализована на основе функции забывания, которая так же, как и функция памяти, должна быть распределена по мозговой структуре. Пусть в процессе обучения построены системы СП

$\Omega_2 \xrightarrow{F} R_2$ и $\Omega_3 \xrightarrow{F} R_3$. На рис. 1 они обозначены соответственно

крестиками и кружками. Попытаемся теперь стереть СП $\Omega_2 \xrightarrow{F} R_2$. При обращении по содержанию необходимо возбудить эту систему СП с последующим переводом всей структуры в режим разрушения памяти. Но при этом сотрется и часть системы СП

$\Omega_3 \xrightarrow{F} R_3$, являющаяся общей со стираемой системой. Произошел сбой памяти. Теперь учтем, что признак биологической значимости информации в естественных условиях кодируется частотой предъявления стимула. Если дендритные деревья клеток способствуют «забыванию» СП, частота активации которых ниже некоторой пороговой, то структура обеспечит стирание СП

$\Omega_2 \xrightarrow{F} R_2$ без сбоя памяти. На основе феномена забывания могут быть реализованы процедура отстройки от мешающих случайных составляющих первичных паттернов и оптимизация загрузки системы памяти. Рассмотрение этих вопросов выходит за рамки настоящей работы.

Таким образом, форма представления СП в мозговых структурах может быть различна по степени локализации. Но поскольку принципиально возможно комбинационное кодирование

реакций и объединение структур в системы, возможна реализация произвольных по функциональному содержанию автоматов, обладающих большой памятью и высокой живучестью. Описанный (триадный) принцип структурной организации является типичным для ассоциативных полей гиппокампа (система зернистых и пирамидных клеток), мозжечка (система корзинчатых клеток и клеток Пуркенье) и спинномозговых структур. Функция латерального торможения, реализуемая пирамидными клетками, по мнению многих исследователей, сводится к обеспечению «контраста» пространственной мозаики выходных паттернов.

Список литературы: 1. *Ungar G.* In: *Molekylar Mechanisms in Memory and Learning*//I. Ungar (Ed.) Plenum Press. 1970. **Р. 149.** 2. *Денисенко Н. И.* Принципы построения волновых коммутрующих сред//Однородные цифровые вычислительные и интегрирующие структуры. Таганрог, 1975. Вып. 4. С. 83—94. 3. *Прогресс* биологической и медицинской кибернетики//Под ред. А. И. Берга. М., 1974. 326 с. 4. *Косицын Н. С.* Микроструктура дендритов и аксондендритических связей в центральной нервной системе. М., 1976. 200 с. 5. *Дунин-Барковский В. П.* Информационные процессы в нейронных структурах. М., 1978. 167 с. 6. *Денисенко Н. И.* О механизме классификации в нейронных структурах//Электронное моделирование. 1986. № 2. С. 14—17.

Поступила в редколлегию 10.11.86

УДК 519.95

*Н. Г. МИРОНОВА, О. Т. НИКОЛОВ, канд. физ.-мат. наук,
М. В. ПАРХОМЕНКО*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ВЫСШИХ ОТДЕЛАХ ЭЛЕКТРОРЕЦЕПТИВНОЙ СИСТЕМЫ СЛАБОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЫБ

Электрорецептивная система слабоэлектрических рыб характеризуется значительной сложностью организации ее высших отделов — акустико-латеральной области продолговатого мозга, мозжечка и среднего мозга. Например, в мозжечке некоторых видов обнаружены специфические нервные клетки, способные избирательно реагировать на направление перемещения, расстояние до рыбы и проводимость окружающих предметов [1]. Такие клетки принято называть детекторами [2]. Предполагается, что нейроны имеют свойства настраиваться за счет самоорганизации на какое-либо изображение или на категорию изображений, имеющих общие свойства. Самоорганизация нейронных выводов вызывается модификацией синаптических связей. Существует много моделей этого явления [3—6]. Модели [3—5] при всей своей сложности пригодны лишь для объяснения действия определенного вида детекторов; в работе [6] правила модификации синаптических весов имеют более общий характер, что дает возможность применить их для анализа процессов распознавания в различных сенсорных системах.

Указанные правила базируются на двух гипотезах: 1) модификация синаптических связей нейрона происходит лишь в случае, если имеется сигнал на его выходе вне зависимости от интенсивности этого сигнала. Если процесс модификации начался, то вес синапса возрастает пропорционально интенсивности входного сигнала на соответствующем синапсе; 2) аналогичный эффект имеет место и для тормозных синапсов, но параметры этого процесса отличны от предыдущих.

В данной работе рассмотрено образование детекторов категорий и отдельных изображений в нейронной сети, моделирующей высшие отделы электроанализа слабоэлектрических рыб, при предъявлении ей изображений следующего вида. Предполагается, что в электрорецептивной системе слабоэлектрических рыб изображения формируются за счет рассеяния электромагнитных волн на различных объектах и представляют собой распределение одной из компонент рассеянного поля на плоскости, в начале координат которой находится элементарный электрический диполь, имитирующий разряд электрического органа слабоэлектрической рыбы. Расчет рассеянного поля для идеально проводящих объектов производился на основании результатов работы [7]. Были рассмотрены изображения эллипсоидов (шаров) с размерами $a=b=c=0,6\delta$, находящихся на расстоянии $\delta, 2\delta, 3\delta$ от плоскости регистрации рассеянного поля (δ — толщина скин-слоя воды). Скалярное произведение их нормированных обобщенных векторов приведены в табл. 1. В ка-

Т а б л и ц а 1

	1	2	3	4	5	6
1	1	0,928	0,851	0,707	0,656	0,602
2	0,928	1	0,941	0,656	0,707	0,665
3	0,851	0,941	1	0,602	0,665	0,707
4	0,707	0,656	0,602	1	0,964	0,925
5	0,656	0,707	0,665	0,964	1	0,970
6	0,602	0,665	0,707	0,925	0,970	1

честве тренировочного класса добавлены изображения 4, 5, 6, отличающиеся от предыдущих дополнительным признаком, принимающим двоячное значение (0 — для идеальнопроводящих объектов, 1 — для тренировочных изображений). В качестве последних могут оказаться изображения диэлектриков. (Объекты с разными размерами на одинаковом расстоянии от плоскости регистрации не рассматривались, поскольку их изображения сходны между собой, т. е. скалярные произведения близки к 1).

Вероятность появления каждого изображения представлена в табл. 2.

Таблица 2

	1	2	3	4	5	6
P	1/12	3/12	2/12	3/12	1/12	2/12

Процесс распознавания указанных 6 изображений моделировался с помощью ансамбля из 100 нейронов, организованных в гексагональную решетку; возбуждающие \vec{W} и тормозящие синаптические веса \vec{W}_0 нейронов вычислялись датчиком случайных чисел в интервале $[0, 1]$.

Количество компонент рассеянного электрического поля — 15, следовательно, каждый нейрон имел 15 возбуждающих синапсов. Фиксированные тормозные входы связывали нейрон с 12 соседями, ($X_0=0,4$).

Предполагалось, что нейрон получает тормозные входы лишь внутри гексагональных ячеек, к которым он примыкает. Значит, количество тормозных входов граничных нейронов меньше, чем внутри решетки (4 — по углам, 7 — на внешнем ряду и 10 — во втором от границы). Нейронная сеть без тормозных входов не рассматривалась, поскольку в электролокационном сигнале нет нулевых компонент, без которых указанная сеть не может избирательно реагировать на изображения.

Данный l -й нейрон являлся детектором категории S в случае, если [6]

$$\vec{W}_l \vec{X}_l - \vec{W}_{0l} \vec{X}_0 > 0 \quad \vec{X}_l \in S; \quad \vec{W}_l \vec{X}_l - \vec{W}_{0l} \vec{X}_0 \leq 0 \quad \vec{X}_l \in \bar{S}, \quad (1)$$

где \vec{X}_l — входные изображения, \vec{x}_0 — тормозные входы.

После модифицирования синаптических весов нейронов (в предположении эргодичности сигналов \vec{X}_l) получаем следующие значения \vec{W}_l и \vec{W}_{0l} :

$$\begin{aligned} \vec{W}_l &= c \sum_{i=1}^n p_i \vec{X}_i \delta_{il} \left(\sum_{m=1}^M (\vec{W}_m \vec{X}_i - \vec{W}_{0m} \vec{X}_0) \right); \\ \vec{W}_{l0} &= c' \sum_{i=1}^n p_i \vec{X}_0 \delta_{il} \left(\sum_{m=1}^M (\vec{W}_m \vec{X}_i - \vec{W}_{0m} \vec{X}_0) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где n — число изображений ($n=6$), M — число тормозных входов l -го нейрона (меняется от 4 до 12),

$$\delta_{il} \left(\sum_{m=1}^M (\vec{W}_m \vec{X}_i - \vec{W}_{0m} \vec{X}_0) \right) = \delta_{il}(U) = \begin{cases} 1 & U > 0 \\ 0 & U < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Предполагается, что модификация синаптических связей начинается, если суммарный сигнал данного нейрона и совокупности нейронов, связанных с ним тормозными связями, превышает 0. c и c' — параметры процессов модификации синаптических связей, на которые накладываются следующие ограничения (если определяются нейроны детекторы отдельных изображений),

$$1 > \frac{c' X_0^2 M}{c} > \frac{1+b}{2}, \quad (4)$$

где b — максимальное скалярное произведение данного изображения с другими изображениями.

Для определения нейронов-детекторов категорий соотношение между c и c' следующее:

$$r_1 > \frac{c' X_0^2 M}{c} > r_2, \quad (5)$$

r_1 — минимальное скалярное произведение изображений внутри данного класса, r_2 — максимальное произведение изображений из разных классов.

Был составлен алгоритм по определению номеров нейронов-детекторов категорий и отдельных изображений указанного вида. Численный эксперимент выполнялся на ЭВМ ЭС-1033. Результаты представлены в табл. 3, 4.

Таблица 3

Количество детекторов	Категория 1	Категория 2	Нейроны без отклика
До обучения	24	3	73
После обучения	36	18	36

Таблица 4

Количество детекторов							I класс	II класс	Нейроны без отклик.
	1	2	3	4	5	6			
До обучения	1	1	4	—	—	—	38	23	32
После обучения	12	14	36	10	8	5	7	8	10

Как видно из табл. 4, вследствие сходства изображений внутри классов (особенно это касается 2-го класса), нейронная сеть не может отличить некоторые изображения друг от друга. После модификации синаптических весов в соответствии с выражением (2) разрешающая способность нейронной сети увеличивается. Возрастает число детекторов категорий и также

нейронов, реагирующих на отдельные изображения. Кроме того, в нейронной сети без обучения значительная часть детекторов сосредоточена на границе сети (вследствие меньшего количества тормозных связей нейронов). После модификации синаптических весов детекторы распределяются по всей нейронной сети более равномерно.

Описанная нейронная сеть с успехом использована для распознавания новых изображений. При предъявлении таких изображений сети их принадлежность определяется по количеству M совпадающих детекторов с известными изображениями. В качестве решающего правила можно выбрать следующее: если $M \geq 90\%$, то изображение совпадает с известным, а при $90\% > M > 50\%$ неизвестное изображение является «смесью» нескольких известных. В этом случае вероятность появления его оценивается так [8]:

$$p_{n+1} = \frac{p_i m_i + p_k m_k}{m_i + m_k}, \quad (6)$$

где m_i , m_k — относительное число совпадающих детекторов по изображениям с номерами i и k , n — число известных изображений.

Затем можно пересчитать вероятности появления изображений в виде $p_i = p_i/S$ (7), где $S = 1 + p_{n+1}$.

После этого нейронная сеть может быть переучена на новое число изображений. Если $50\% > M > 10\%$, то вероятней предполагать принадлежность неизвестного не к отдельному изображению, но ко всей категории.

Таким образом, на основании математической теории формирования детекторов Амари [6] нами разработаны алгоритмы распознавания электролокационных изображений в электросенсорной системе слабозлектрических рыб. Показано, что вследствие сходства таких изображений нейронная сеть не может различать их друг от друга внутри категории. После обучения разрешающая способность сети значительно улучшается, исчезают краевые эффекты, связанные с отсутствием некоторого числа тормозных связей у нейронов, близких к границе нейронной сети.

Разработаны эффективные алгоритмы распознавания новых изображений и включения их в систему известных, причем при совпадении относительного числа детекторов от 50% до 90% неизвестное изображение опознается по двум известным, а при меньшем количестве — по всей категории.

Указанный алгоритм распознавания удобен при практической реализации, так как требует хранения в памяти ЭВМ координат всех изображений, но лишь 2-х матриц модифицированных синаптических весов нейронов, а также матрицы, определяющей принадлежность нейрона известным изображениям либо категориям.

Список литературы: 1. *Heiligenberg W.* Principles of electroreception and jamming avoidance in electric fish. Berlin, 1977. 124 p. 2. *Элементы теории биологических анализаторов/И. В. Позин, И. А. Любинский, О. А. Левашов.* М., 1978. 360 с. 3. *Grossberg S.* On the development of detectors in the visual cortex with application to learning and reaction-diffusion systems//*Biol. Cybernetics.* 1976. 21. P. 145—159. 4. *Malsburg T. von der.* Self-organisation of orientation sensitive cells in the striate cortex//*Kybernetik.* 1973. 14. S. 85—100. 5. *Nass M. M., Cooper L. W.* A theory for the development of feature detecting cells in the visual cortex//*Biol. Cybernetics.* 1975. 19. P. 1—18. 6. *Amari Shun-ichi, Akikazu Takeuchi.* Mathematical theory on formation of category detecting nerve cells//*Biol. Cybernetics.* 1978. 29. P. 127—138. 7. *Bolle D. M., Bowden R. A.* The low frequency electromagnetics signatures of conducting objects in the ocean//*Ocean-73: IEEE Int. Conf. Eng. Ocean Environ.* Seattle. 1973. P. 203—205. 8. *Marr D.* A theory of cerebral neocortex//*Proc. roy. Soc. Lond. Ser. B.* 1970. 176. P. 161—234.

Поступила в редколлегию 15.01.86

УДК 519.762:003

Ю. Ю. РОМАНОВСКАЯ, канд. филол. наук,
А. А. РОМАНОВСКИЙ, канд. техн. наук

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ПАРАДИГМЫ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ЯЗЫКА С УЧЕТОМ ПРАГМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Одной из проблем создания искусственного интеллекта является проектирование и разработка автоматизированной системы анализа парадигматических отношений в синтаксисе. Т. П. Ломтев [1] определяет синтаксическую парадигму как «набор предложений», а основные принципы построения парадигматических рядов в синтаксисе — грамматические категории предложения.

Парадигмы предложения анализируются с учетом таких грамматических категорий предложения, как категории целевой направленности высказывания, утверждения/отрицания, модальности, времени, лица (числа, рода).

В связи с тем, что значения повествования, вопроса и побуждения не исчерпывают объем категории целевой направленности высказывания, целесообразно исследовать предложения на первом ярусе парадигмы в рамках теории прагматического синтаксиса [2], так как именно коммуникативно-интенциональное содержание (прагматический тип) предложения влияет на характер его парадигматических изменений. При подобном рассмотрении предложение на первом ярусе парадигмы имеет не три, а семь парадигматических форм, соответствующих следующим прагматическим типам: констативу, промиссиву, менасиву, инъюнктиву, реквестиву, перформативу, квеситиву.

На втором ярусе парадигмы по категории утверждения/отрицания формоизменение предложений имеет такое ограничение: предложения, представляющие собой перформатив, не могут иметь отрицательную форму, которую блокирует компонент

ПЕРФ, содержащийся в семантической структуре перформативного предложения. Остальные шесть форм предложения, выделенные на первом ярусе парадигмы, могут иметь отрицательную и положительную формы.

На формоизменение предложений на третьем ярусе парадигмы по категории модальности — реальности/нереальности — накладываются существенные ограничения. Релевантными в данном случае оказываются прагматические особенности форм предложения. Так, формы промисива, менасива и перформатива не могут характеризоваться нереальной модальностью, в то время, как, являясь инъюнктивом или реквестивом, они, напротив, характеризуются только модальностью нереальности. Формы как реальной, так и нереальной модальности имеют только предложения, представляющие собой константы и квеситивы.

На четвертом ярусе парадигмы по категории времени ограничение на формоизменение предложения опять-таки накладываются его прагматическим содержанием. Глагольное время в формах предложений, являющихся промисивами и менасивами, может быть представлено лишь формами будущего времени, так как промисивные и менасивные предложения характеризуются неизменной отнесенностью в своем содержании к будущему. Глаголы перформативных предложений не могут иметь формы прошедшего и будущего времени. Что касается предложений, являющихся инъюнктивными и реквестивами, обычная форма которых — побудительное предложение, то глаголы повелительного наклонения, употребляемые в этих прагматических типах, выражают побуждение, приказ или просьбу и, не имея собственно временных форм, соотносятся при этом с планом настоящего или будущего, что не закреплено, однако, в различии грамматических форм и может быть понято лишь из контекста. Предложения, являющиеся инъюнктивами и реквестивами, отнести к сфере настоящего времени при исследовании формоизменения предложения по данной категории.

Предложение, принадлежащее к сфере будущего времени, потенциально может быть как констативом, так и промисивом, в зависимости от того, какой из коммуникативно-интенциональных компонентов содержится в семантической структуре данного предложения.

На формоизменение предложений на пятом ярусе по категории лица, числа (рода) ограничение накладывается прагматическим содержанием форм предложений, являющихся инъюнктивами и реквестивами. Как уже отмечалось выше, форма инъюнктива и реквестива — побудительное предложение. Поскольку последнее выражает побуждение к действию, оно не имеет выраженной категории лица и числа (хотя обычно адресовано ко второму лицу), а, следовательно, и не может изменяться по данной категории. Количество парадигматических форм членов парадигмы, представляющих собой инъюнктивы и реквестивы, на пятом ярусе парадигмы не возрастает, так же как на третьем и четвертом ярусах, и равна количеству пара-

дигматических форм второго яруса парадигмы по категории утверждения/отрицания. Остальные прагматические типы предложений нерелевантны для их формоизменения по данной категории. Для формоизменения предложений, отличных от инъюнктива и реквизитива, существенна категориальная значимость субъекта, а именно, выражение субъекта именем существительным/местоимением, и в последнем случае — одушевленность/неодушевленность обозначаемого им предмета. В зависимости от этого возрастает количество парадигматических форм на пятом ярусе.

Что касается динамики формоизменения членов парадигмы, выделенных на первом ярусе, то количество форм констатива и квеситива максимально, так как данные прагматические типы не накладывают никаких ограничений на формоизменение членов парадигмы. Предложение в этом случае может иметь следующие парадигматические формы: утвердительную, отрицательную, формы реальной и нереальной модальности, формы настоящего, прошедшего и будущего времени. На

объем парадигмы в данном случае влияет категориальная значимость субъекта. Так, если субъект выражен именем существительным или местоимением, обозначающим неодушевленный предмет, количество парадигматических форм возрастает в два раза за счет варьирования единственного множественного числа субъекта. Если же субъект выражен местоимением, обозначающим одушевленный предмет, число парадигматических форм возрастает за счет варьирования лица, числа (рода) субъекта в шесть раз.

Предложения, являющиеся промисивами и менасивами, способны образовывать положительные и отрицательные формы, однако, употребляются только в форме реальной модальности и будущего времени. По категории числа, лица (рода) количество форм увеличивается в зависимости от категориальной значимости субъекта соответственно в два или шесть раз.

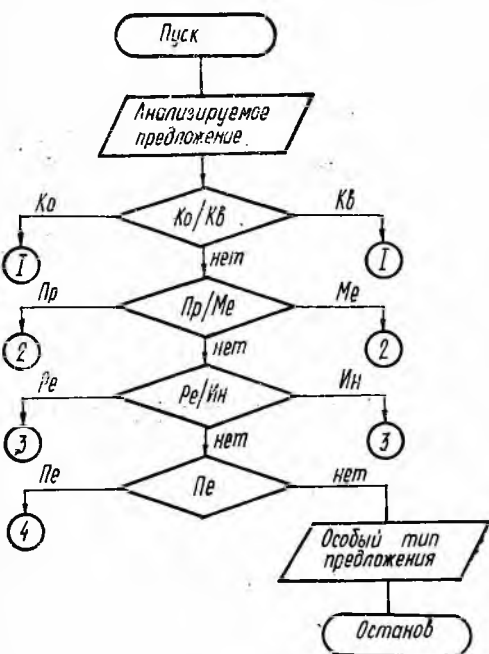


Рис. 1. Алгоритм анализа предложения на I ярусе.

Инъюнктивные и реквезитивные предложения обнаруживают следующие закономерности изменений по парадигме. Им свойственны положительные и отрицательные формы. По всем остальным категориям формоизменение таких предложений блокировано: они характеризуются нереальной модальностью, выраженной формы времени и лица у них нет.

Перформативные предложения имеют только положительную форму, характеризуются реальной модальностью, соотно-

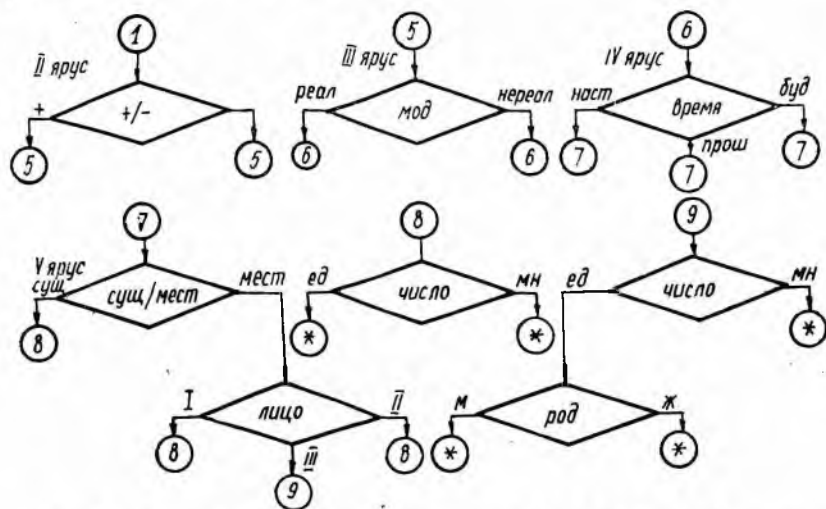


Рис. 2. Алгоритм анализа формоизменения Ко и Кв на II—V ярусах

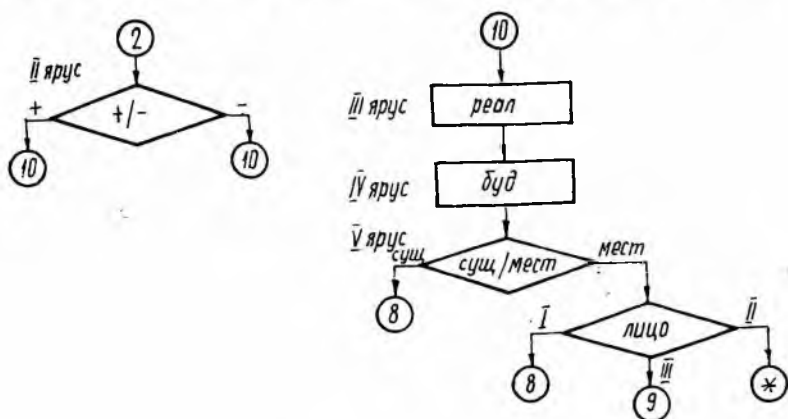


Рис. 3. Алгоритм анализа формоизменения Пр и Ме на II—V ярусах

сятся с настоящим временем, могут быть представлены формами единственного и множественного числа.

Для создания систем автоматизированного анализа парадигмы предложения с целью определения количества форм пред-

ложения и их характеристик могут быть предложены приведенные ниже алгоритмы (рис. 1—5). Рассматриваемые алгоритмы предназначены для анализа предложений английского языка, анализ проводится в объеме пяти ярусов (I—V), соответствующих следующим грамматическим категориям предложений: I ярус соответствует категории целевой направленности высказывания; II — категории утверждения/отрицания (+/-); III — категории модальности; IV — категории времени; V — категория лица, числа (рода). Приняты следующие сокращения и обозначения: Ко — констатив, Кв — квеситив, Пр — промисив, Ме — менасив, Ре — реквестив, Ин — инъюнктив, Пе — перформатив; мод. — модальность (реал. — реальная, нереал. — нереальная); наст. — настоящее, прош. — прошедшее, буд. — будущее (время);

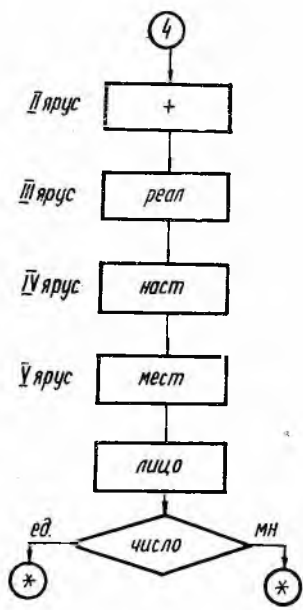
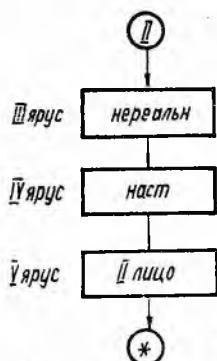
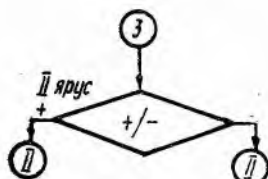


Рис. 4. Алгоритм анализа формоизменения Ре и Ин на II—V ярусах

Рис. 5. Алгоритм анализа формоизменения Пе на II—V ярусах

ед. — единственное, мн. — множественное (число); м. — мужской, ж. — женский (род); сущ. — существительное (любое) или местоимение, обозначающее неодушевленный предмет; мест. — местоимение, обозначающее одушевленный предмет; * — возможная форма предложения (вариант).

Количество парадигматических форм предложений на разных ярусах в различных языках может варьироваться в соответствии со структурой грамматического строя конкретного языка. Так, в английском языке в отличие от русского местоимение второго лица имеет одну форму для единственного и множественного числа. У глаголов повелительного наклонения английского языка также одна форма, в то время как в русском языке они могут употребляться в единственном и множественном числе.

Анализ парадигматических форм различных предложений свидетельствует о том, что на характер парадигматических изменений того или иного предложения существенно влияет его прагматическая характеристика, т. е. не только лексическое наполнение и семантика высказывания, но и его прагматическое содержание препятствуют (причем в значительной мере) образованию ряда парадигматических форм предложения.

Представляется, что прагматические характеристики релевантны для парадигматического формоизменения предложений не только в английском языке.

Итак, при рассмотрении прагматических типов предложения использовались понятия и термины Г. Г. Почепцова [2]. Приведенные алгоритмы анализа предложений и их формоизменений на всех ярусах легко реализуем на ЭВМ.

Список литературы: 1. Ломтев Т. П. Предложение и его грамматические категории. М., 1972. 180 с. 2. Почепцов Г. Г. Прагматический аспект изучения предложения (К построению теории прагматического синтаксиса)//Иностр. языки в школе. 1975. № 6. С. 15—25.

Поступила в редколлегию 14.03.88

СОДЕРЖАНИЕ

Бондаренко М. Ф., Шабанов-Кушнарченко С. Ю., Шульгин И. В. Об условиях существования субъективной метрики	3
Луизов А. В., Федорова Н. С. Информационная емкость зрения	9
Закревский А. Д. Минимизация частичных конечных предикатов	16
Ситников Э. Д., Шабанов-Кушнарченко Ю. П. Некоторые свойства предикатов порядка	22
Воронцов Н. Б., Мельникова Л. И. Распараллеливание решения систем предикатных уравнений методами полного перебора и исключения переменных	29
Бондарев В. М., Рублинецкий В. И., Сигалов В. Л. Программа автоматической классификации текстов	35
Рябова Н. В. Математическое описание суффиксального словообразования отадъективных имен существительных	40
Антомонов А. Ю. Построение иерархической модели лексико-семантической системы языка	45
Шабанов-Кушнарченко С. Ю., Шаронова Н. В., Шубин И. Ю. О некоторых алгоритмах канонической конъюнктивной минимизации формул алгебры конечных предикатов	50
Юдо А. Н., Чеголин П. М. Автоматическая диагностика обучаемости в АОС с биологической обратной связью	55
Кувенева А. П., Кононенко Н. В., Богданова Л. Г. Математическая модель в обучении грамматике английского языка специалистов точных наук	58
Курбаков К. И. Актуальные проблемы информатики	62
Ильин В. А., Барабышкина Л. В. Планирование действий интеллектуальных роботов в неизвестной среде	69
Ляшенко В. В., Путятин Е. П., Рыстенко А. Г., Ходарев В. Т. Инструментальная автоматизированная система обработки изображений	77
Гороховатский В. А., Машталир В. П., Кобылин И. А. Применение функций Уолша при формировании признаков изображений	81
Князева В. Ф., Михайлик Г. В. О разложении максимальной абелевой подгруппы группы 1-треугольных матриц в произведение циклических подгрупп	85
Яковлев С. В., Гребенник И. В. Свойства евклидовых комбинаторных множеств k -расстановок с повторениями и без повторений	90
Майстренко К. Л. Частотная нормализация информации в задачах оперативного взаимодействия операторов с техническими средствами АСУ	95
Левыкин В. М. Определение уровня обеспечения интегрированной сложной гибкой системы	100
Дзюндзюк Б. В., Терзиян В. Я., Северина Л. В. Принципы построения диалоговых экспертных систем охраны труда на основе дискретной математики	104
Ахмедов Т. И., Колотенко Г. А., Зайцева О. В. Мажоритарная модель пространственно-временных организаций комбинаторных признаков асинхронных и синхронных потенциалов головного мозга в норме и при артериальной гипертензии	110
Алипов Н. В. Корректирующие алгоритмы поиска точки на отрезке $[0, 1]$ с равномерным разбиением интервалов неопределенности	118
Денисенко Н. И. Сигнальные пути как носители информации в мозговых структурах	124
Миронова Н. Г., Николов О. Т., Пархоменко М. В. Моделирование процессов распознавания изображений в высших отделах электрорецептивной системы слабозлектрических рыб	130
Романовская Ю. Ю., Романовский А. А. Автоматизированный анализ парадигмы предложения естественного языка с учетом прагматических характеристик предложения	135