

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

ПРОБЛЕМЫ

БИОНИКИ

Всеукраинский межведомственный
научно-технический сборник

Основан в 1968 г.

ВЫПУСК 48

2001



Харків
Харківський державний технічний
університет радіоелектроніки

1998

004(06)
П 72
УДК 519.7

В сборнике публикуются статьи по *БИОНИКЕ ИНТЕЛЛЕКТА*: теория интеллекта, аппарат формального описания интеллекта, математические модели интеллекта; применение бионики интеллекта в системах искусственного интеллекта; философские и методологические аспекты бионики интеллекта.

Для научных работников и специалистов.

У збірнику публікуються статті з *БІОНИКИ ІНТЕЛЕКТУ*: теорія інтелекту, апарат формального опису інтелекту, математичні моделі інтелекту; застосування біоники інтелекту у системах штучного інтелекту; філософські та методологічні аспекти біоники інтелекту.

Для науковців та фахівців.

The journal publishes articles on the *BIONICS OF INTELLIGENCE*: intelligence theory, the formal apparatus to describe intelligence, mathematical models of intelligence, the bionics of intelligence in artificial intelligence systems; philosophical and methodological aspects of the bionics of intelligence.

For research workers and specialist.

Редакционная коллегия: д-р техн. наук, проф. *М.Ф.Бондаренко* (гл. ред.), д-р техн. наук, проф. *Ю.П.Шабанов-Кушнарченко* (отв. ред.), канд. техн. наук, *В.А.Чикина* (зам. отв. ред.), д-р техн. наук, проф. *Н.Н.Буслик*, д-р техн. наук, проф. *Г.К.Винцюк*, канд. техн. наук, доц. *З.В.Дударь*, д-р техн. наук, проф. *А.В.Королев*, д-р техн. наук, проф. *А.А.Павлов*, д-р техн. наук, проф. *Е.П.Путятин*, д-р техн. наук, проф. *А.А.Рось*, д-р техн. наук, проф. *И.Б.Сироджа*, д-р техн. наук, проф. *А.Д.Тевяшев*, д-р техн. наук, проф. *И.Г.Филиппенко*, д-р техн. наук, проф. *О.Н.Фоменко*, д-р техн. наук *С.Ю.Шабанов-Кушнарченко*, д-р физ-мат. наук, проф. *М.М.Шлезингер*, д-р физ-мат. наук, проф. *С.В.Яковлев*.

Ответственный за выпуск *В.А. Чикина*

Сборник включен в список специальных изданий ВАК Украины по физико-математическим и техническим наукам.

Адрес редакционной коллегии: Украина, 310726, Харьков-726, просп. Ленина, 14, Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники (ХТУРЭ), тел. 40-94-46.

© Харківський державний
технічний університет
радіоелектроніки, 1998

УДК 519.7

М.Ф. БОНДАРЕНКО, В.А. ЧИКИНА

О МЕТОДЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ОТНОШЕНИЙ И ИХ СХЕМНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Морфологическим отношением называется грамматическая связь между всеми формами слов какого-либо класса одного из естественных языков [1;с.51]. Формальное описание морфологических отношений для различных частей речи и их реализация на ЭВМ необходимы для автоматизации обработки текстов естественных языков. В статье на примере полных непряжательных имен прилагательных русского языка [2;3] изложен новый метод решения указанной задачи.

Выделим в словоформах полных непряжательных имен прилагательных первую x_1 , вторую x_2 , третью x_3 буквы окончания, признак ударности окончания x_4 , последнюю букву основы x_5 , признак смягчения основы x_6 . Эти элементы словоформ назовем словоизменительными, поскольку именно они влияют на характер склонения полных непряжательных имен прилагательных. Когда третья буква окончания отсутствует, пишем $x_3 = _$, где $_$ — знак пробела. Если первый звук окончания ударный, полагаем $x_4 = y$, безударный — $x_4 = б$. Если основа оканчивается мягким звуком, пишем $x_6 = м$, твердым — $x_6 = т$. Например, для словоформы «синего» имеем $x_1 = e$, $x_2 = z$, $x_3 = o$, $x_4 = б$, $x_5 = н$, $x_6 = м$. Для словоформы «чужим» — $x_1 = и$, $x_2 = м$, $x_3 = _$, $x_4 = y$, $x_5 = ж$, $x_6 = т$.

Запишем области определения для введенных переменных:

$$x_1^a \vee x_1^e \vee x_1^u \vee x_1^o \vee x_1^y \vee x_1^m \vee x_1^{no} \vee x_1^r; \quad (1)$$

$$x_2^c \vee x_2^e \vee x_2^i \vee x_2^m \vee x_2^x \vee x_2^{no} \vee x_2^r; \quad (2)$$

$$x_3^u \vee x_3^o \vee x_3^y \vee x_3^-; \quad (3)$$

$$x_4^b \vee x_4^y; \quad (4)$$

$$x_5^b \vee x_5^e \vee x_5^c \vee x_5^d \vee x_5^{жс} \vee x_5^z \vee x_5^k \vee x_5^l \vee x_5^m \vee x_5^n \vee x_5^p \vee x_5^c \vee x_5^m \vee x_5^x \vee x_5^y \vee x_5^4 \vee x_5^{uu} \vee x_5^{uu} \vee x_5^-; \quad (5)$$

$$x_6^m \vee x_6^m. \quad (6)$$

Опишем связь между переменными x_1 и x_2 , которая характеризуется предикатом $P_1(x_1, x_2)$ (табл. 1).

Таблица 1

x_1/x_2	ю	з	м	й	е	х	я
у	1						
ю	1						
о	1	1	1	1	1		
е	1	1	1	1	1		
ы			1	1	1	1	
и			1	1	1	1	
а							1
я							1

Предикат P_1 представляем в виде

$$P_1(x_1, x_2) = Q(f_1(x_1), g_1(x_2)), \quad (7)$$

где $u_i = f_1(x_1), v_i = g_1(x_2)$ — некоторые классифицирующие функции, $Q_1(u_i, v_i)$ — предикат, связывающий классы букв. Способ классификации букв задан склеиванием ячеек табл. 1. Классы берем максимальными, при этом функции f_i, g_i определяются единственным образом.

$$P_1(x_1, x_2)$$

Переменная u_1 имеет четыре значения:

$$u_1^a \vee u_1^o \vee u_1^y \vee u_1^{bi}; \quad (8)$$

переменная v_1 имеет пять значений:

$$v_1^e \vee v_1^o \vee v_1^x \vee v_1^{jo} \vee v_1^a. \quad (9)$$

Функцию f_1 записываем в форме следующих условий:

$$u_1^a \sim x_1^a \vee x_1^s; \quad (10)$$

$$u_1^o \sim x_1^o \vee x_1^e; \quad (11)$$

$$u_1^y \sim x_1^y \vee x_1^{jo}; \quad (12)$$

$$u_1^{bi} \sim x_1^{bi} \vee x_1^u. \quad (13)$$

Функцию g_1 представляем в виде

$$v_1^e \sim x_2^e; \quad (14)$$

$$v_1^o \sim x_2^o \vee x_2^u \vee x_2^e; \quad (15)$$

$$v_1^x \sim x_2^x; \quad (16)$$

$$v_1^{ю} \sim x_2^{ю}; \quad (17)$$

$$v_1^я \sim x_2^я. \quad (18)$$

Таблица 2

Связь переменных u_1, v_1 характеризует табл.2. Производя импликативное разложение предиката Q_1 по переменной u_1 , записываем его в виде следующей системы условий:

u_1/v_1	ю	з	м	х	я
у	1				
о	1	1	1		
bi			1	1	
a					1

$Q_1(u_1, v_1)$

$$u_1^a \supset v_1^я; \quad (19)$$

$$u_1^o \supset v_1^{ю} \vee v_1^z \vee v_1^m; \quad (20)$$

$$u_1^y \supset v_1^{ю}; \quad (21)$$

$$u_1^{bi} \supset v_1^m \vee v_1^x. \quad (22)$$

Импликативное разложение предиката Q_1 по переменной дает другой вариант его описания:

$$v_1^z \supset u_1^o; \quad (23)$$

$$v_1^m \supset u_1^o \vee u_1^{bi}; \quad (24)$$

$$v_1^x \supset u_1^{bi}; \quad (25)$$

$$v_1^{ю} \supset u_1^y \vee u_1^o; \quad (26)$$

$$v_1^я \supset u_1^a; \quad (27)$$

Рассмотрим многополюсник, называемый элементом первого рода (рис. 1), который действует в соответствии с отношением

$$y^e \sim x^{a_1} \vee x^{a_2} \vee \dots \vee x^{a_n}. \quad (28)$$

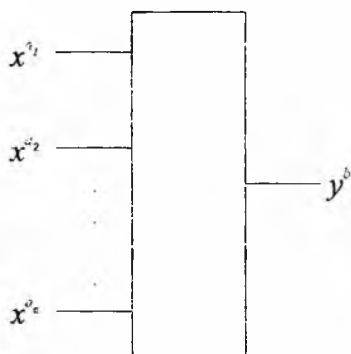


Рис. 1

Если поступил сигнал $x^{a_i} = 1 (i \in \{1, 2, \dots, n\})$, то элемент формирует ответный сигнал $y^b = 1$; если $y^b = 0$, то $x^{a_1} = x^{a_2} = \dots = x^{a_n} = 0$; если $x^{a_1} = x^{a_2} = \dots = x^{a_n} = 0$, то $y^b = 0$, при $n=1$ если $y^b = 1$, то $x^{a_1} = 1$. Элемент второго рода (рис.2) действует в соответствии с отношением

$$y^b \supset x^{a_1} \vee x^{a_2} \vee \dots \vee x^{a_n}. \quad (29)$$

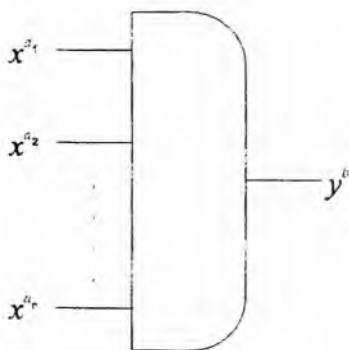


Рис. 2

В ответ на входное воздействие $x^{a_1} = x^{a_2} = \dots = x^{a_n} = 0$ он реагирует сигналом $y^b = 0$, при $n=1$ если $y^b = 1$, то $x^{a_x} = 1$. Описание реакции элементов могут быть получены решением уравнений (28) и (29). Если сигналы, поданные на полюсы элемента, противоречат друг другу, то они обращают в нуль форму (28) или (29). В этом случае элемент вырабатывает по дополнительному выходу, не указанному на схеме, сигнал противоречия. Схему, состоящую из двух параллельно и встречно включенных элементов второго рода (рис. 3,а), можно заменить одним элементом первого рода (рис. 3,б).

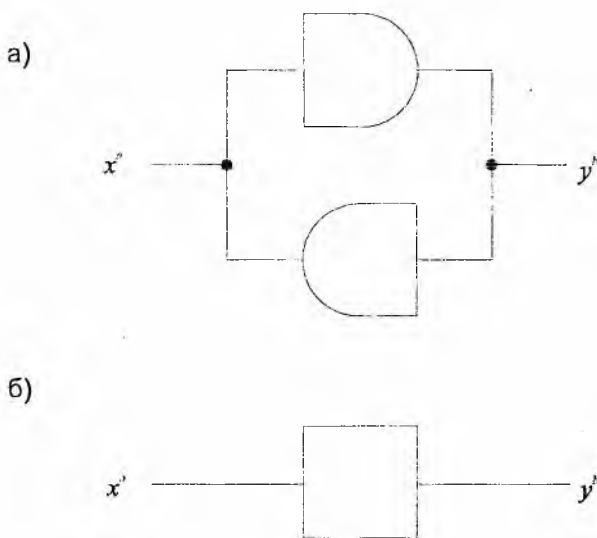


Рис. 3

С помощью описанных выше элементов по формулам (10)—(27) составлена схема многополюсника, реализующего отношение $x_1 P_1 x_2$ (рис. 4). Номера элементов совпадают с номерами соответствующих им уравнений. Согласно условиям (14), (16)—(19) и (27),

$$v_1^z = x_2^z, v_1^x = x_2^x, v_1^{j_0} = x_2^{j_0}, v_1^y = x_2^y, v_1^a = u_1^a.$$

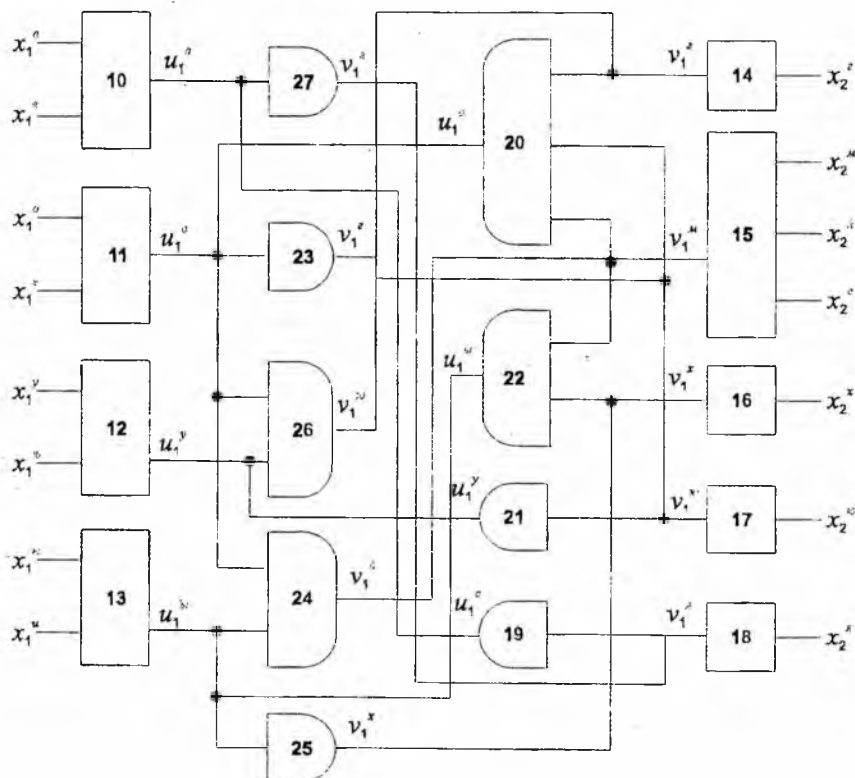


Рис. 4

Производя замены с помощью этих равенств, переписываем условия (10), (20)—(23), (25) и (26) в виде:

$$x_2^a \sim x_1^a \vee x_1^a, \quad (30)$$

$$u_1^o \supset x_2^{io} \vee x_2^e \vee v_1^m, \quad (31)$$

$$u_1^y \supset x_2^{io}, \quad (32)$$

$$u_1^{bl} \supset x_2^x \vee v_1^M; \quad (33)$$

$$x_2^o \supset u_1^o; \quad (34)$$

$$x_2^x \supset u_1^{bl}; \quad (35)$$

$$x_2^{jo} \supset u_1^y \vee u_1^o. \quad (36)$$

Уравнения (30)—(36) вместе с уравнениями (11)—(13) и (24) равносильны исходной системе уравнений (10)—(27). По ним построена более простая схема, соответствующая тому же самому отношению $x_1 P_1 x_2$ (рис. 5).

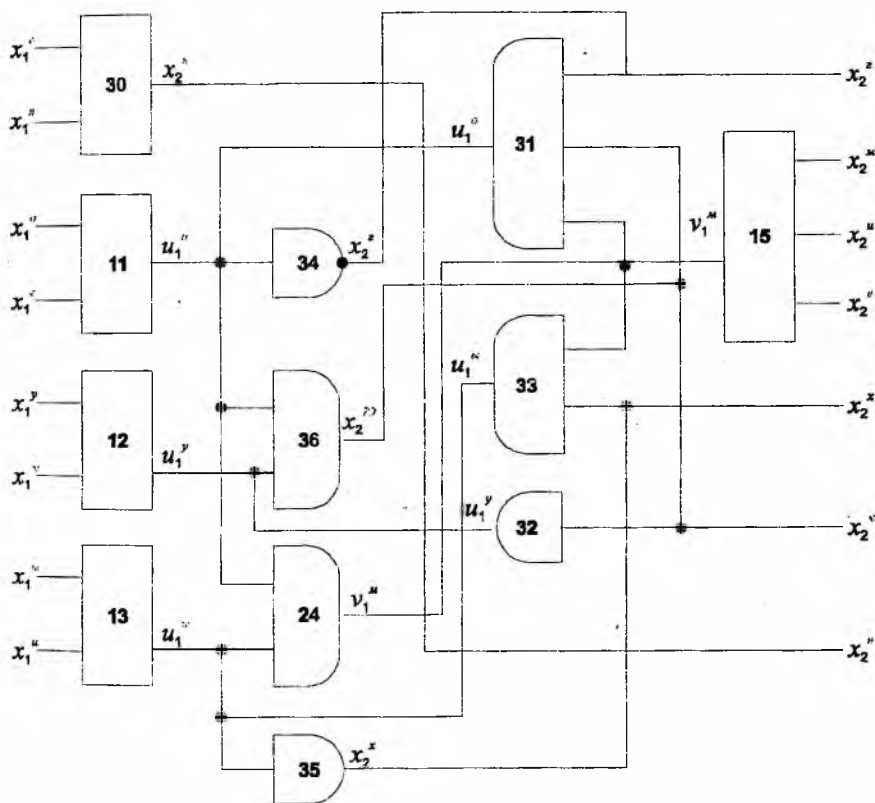


Рис. 5

Схему можно было бы еще более упростить, исключив из породившей ее системы избыточные уравнения (19)—(22) или (23)—(27), но тогда она будет действовать менее эффективно. Полученная схема реализует одну из закономерностей, лежащих в основе процесса словоизменения. Если найти все такие закономерности и построить реализующий их микропроцессор, то он сможет выполнять функции тех структур мозга, которые хранят навыки человека к склонению и спряжению слов. Такой прибор будет полезен для применения в системах автоматической обработки русских текстов. Тот же результат может быть достигнут и с помощью ЭВМ, решающей с помощью специальной программы приведенную выше систему уравнений.

Связь между переменными x_2 и x_3 характеризуется предикатом $P_2(x_2, x_3)$, представленным в табл. 3.

Таблица 3

x_2/x_3	—	у	и	о
й	1			
я	1			
ю	1			
е	1			
х	1			
м	1	1	1	
з				1

$P_2(x_2, x_3)$

Производим декомпозицию предиката P_2 на функции $u_2=f_2(x_2)$, $v_2=g_2(x_3)$ и предикат $Q_2(u_2, v_2)$ описанным выше способом. В результате получаем следующую систему уравнений:

$$u_2^{\bar{u}} \sim x_2^{\bar{u}} \vee x_2^a \vee x_2^{ю} \vee x_2^e \vee x_2^x; \quad (37)$$

$$v_2^y \sim x_3^y \vee x_3^i; \quad (38)$$

$$u_2^{\bar{u}} \supset x_3^-; \quad (39)$$

$$x_2^m \supset x_3^- \vee v_2^y; \quad (40)$$

$$x_3^- \supset u_2^{\bar{u}} \vee x_2^m; \quad (41)$$

$$v_2^y \supset x_2^m; \quad (42)$$

$$x_2^e \sim x_3^o \quad (43)$$

Соответствующая этим уравнениям схема, реализующая отношение $x_2 P_2 x_3$, представлена на рис. 6.

Условие (43) и соответствующий ему элемент по схеме придется сохранить, иначе схема не сможет обнаружить противоречия между сигналами x_2^e и x_3^o , если оно возникнет. Нельзя допускать короткого замыкания между полюсами схемы.

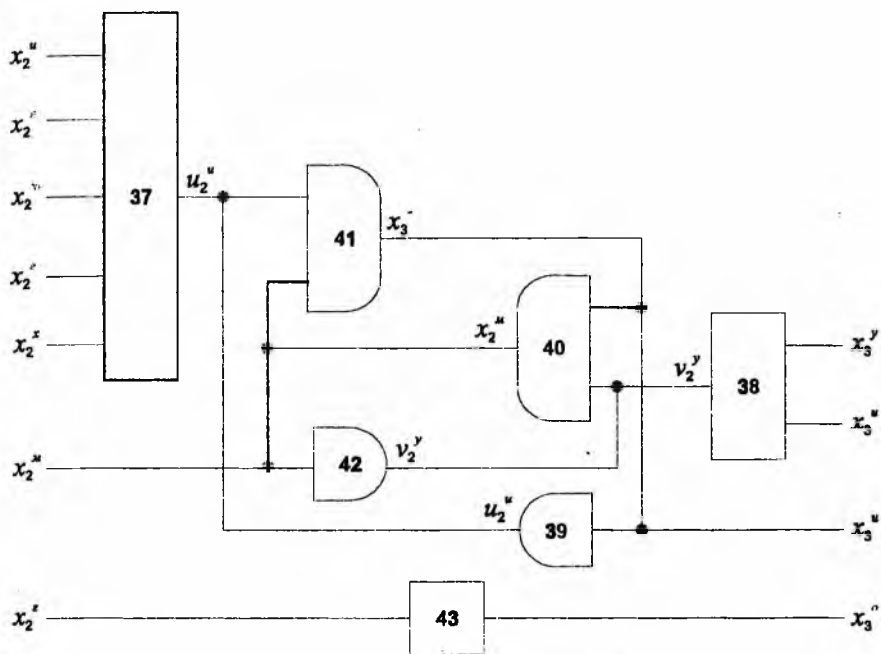


Рис. 6

Список литературы: 1. Шабанов-Кушнарченко Ю.П. Теория интеллекта. Проблемы и перспективы. Харьков: Выща шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1987. 159 с. 2. Чикина В.А. Математические модели парадигматических отношений и их применение для автоматической обработки русских текстов: Дисс., канд. техн. наук: Харьков, 1986. 220 с. 3. Шабанов-Кушнарченко Ю.П., Бондаренко М.Ф. Математическая модель склонения полных непритяжательных имен прилагательных // Науч. и техн. информация. Сер.2. 1979. №6. С.10—13.

Поступила в редколлегию 30.10.97

УДК 510.62

Н.А. ГВОЗДИНСКАЯ, З.В. ДУДАРЬ, С.А. ПОСЛАВСКИЙ,
Ю.П. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО

О ЛОГИЧЕСКИХ МАТРИЦАХ

Данная статья является продолжением работы [1]. Обозначим символом K множество логических скаляров $K = \{0, 1\}$ [2]. Произвольная система элементов совокупности K , расположенная в виде прямоугольной таблицы, содержащей m строк и n столбцов, называется логической (m, n) — матрицей над K или просто логической матрицей. Чтобы записать матрицу, выпишем обозначения ее элементов и получившуюся таблицу заключим в скобки или ограничим двойными чертами [3].

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}, \quad A = \left\| \begin{array}{cccc} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{array} \right\|.$$

Логическая матрица, число строк которой совпадает с числом столбцов, называется *квадратной*. Для квадратной логической матрицы число ее строк (или столбцов) называется *порядком квадратной логической матрицы*. Квадратная логическая матрица, все диагональные элементы которой равны единице, а остальные — нулю, называется *единичной логической матрицей* и обозначается символом E . Матрица, все элементы которой равны нулю, называется *нулевой логической матрицей* и обозначается символом 0 . Две логические матрицы называются *равными*, если число строк и столбцов у них соответственно равны и если логические скаляры, стоящие на соответственных местах этих матриц, тоже равны. Таким образом, одно равенство между (m, n) — матрицами равносильно системе mn равенств между их элементами. Логическая матрица, имеющая только одну строку, называется просто *логической строкой*, а число ее элементов — *длиной строки*. Логическая матрица, имеющая только один столбец, называется *логическим столбцом*, а число его элементов — *высотой столбца*.

В качестве основных операций над логическими матрицами принимаем: логическое умножение скаляра на матрицу или матрицы на скаляр, логическое сложение (дизъюнкцию) двух матриц, отрицание матриц, логическое умножение (конъюнкция) матриц. Чтобы умножить логический скаляр α на логическую матрицу A , нужно умножить на α все элементы матрицы A :

$$\alpha A = \alpha \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha a_{11} & \alpha a_{12} & \dots & \alpha a_{1n} \\ \alpha a_{21} & \alpha a_{22} & \dots & \alpha a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha a_{m1} & \alpha a_{m2} & \dots & \alpha a_{mn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$A\alpha = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \alpha = \begin{pmatrix} a_{11}\alpha & a_{12}\alpha & \dots & a_{1n}\alpha \\ a_{21}\alpha & a_{22}\alpha & \dots & a_{2n}\alpha \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1}\alpha & a_{m2}\alpha & \dots & a_{mn}\alpha \end{pmatrix}$$

Например:

$$1 \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \wedge 1 & 1 \wedge 0 & 1 \wedge 1 \\ 1 \wedge 0 & 1 \wedge 0 & 1 \wedge 1 \\ 1 \wedge 1 & 1 \wedge 1 & 1 \wedge 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix};$$

$$0 \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \wedge 1 & 0 \wedge 0 & 0 \wedge 1 \\ 0 \wedge 0 & 0 \wedge 0 & 0 \wedge 1 \\ 0 \wedge 1 & 0 \wedge 1 & 0 \wedge 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

В силу того, что для логического поля имеет место аксиома коммутативности [1], справедливо равенство:

$$\alpha A = A\alpha. \quad (2)$$

Для любой логической матрицы над K и для любых логических скаляров $\alpha, \beta \in K$ имеют место следующие соотношения:

$$1 \cdot A = A; \quad (3)$$

$$0 \cdot A = 0; \quad (4)$$

$$\alpha \cdot 0 = 0; \quad (5)$$

$$\alpha(\beta A) = (\alpha\beta)A. \quad (6)$$

Логической суммой (дизъюнкцией) двух логических матриц над K , имеющих соответственно равное число строк и столбцов, называется матрица, имеющая то же число строк и столбцов, и элементы которой равны логическим суммам (дизъюнкциям) соответствующих элементов складываемых матриц:

$$C = A \vee B = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ b_{m1} & \dots & b_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} \vee b_{11} & \dots & a_{1n} \vee b_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} \vee b_{m1} & \dots & a_{mn} \vee b_{mn} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Например:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \vee 0 & 1 \vee 1 & 1 \vee 1 \\ 1 \vee 0 & 1 \vee 0 & 0 \vee 1 \\ 0 \vee 1 & 0 \vee 1 & 1 \vee 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Из определения дизъюнкции логических матриц вытекают следующие соотношения: дизъюнкция матриц коммутативна $A \vee B = B \vee A$; дизъюнкция матриц ассоциативна $A \vee (B \vee C) = (A \vee B) \vee C$; дизъюнкция матриц дистрибутивна относительно умножения на скаляр $\alpha(A \vee B) = \alpha A \vee \alpha B$; умножение матрицы на скаляр дистрибутивно относительно дизъюнкции скаляров $(\alpha \vee \beta)A = \alpha A \vee \beta A$; закон нуля $A \vee 0 = 0 \vee A = A$; закон идемпотентности $A \vee A = A$.

Докажем первое из перечисленных свойств, т.е. свойство коммутативности. Для этого установим равенство соответствующих элементов для матриц, стоящих в левой и правой частях этого соотношения. Пусть $C = A \vee B = \|c_{ij}\|$. По определению дизъюнкции матриц, $c_{ij} = a_{ij} \vee b_{ij}$. Пусть теперь $D = B \vee A = \|d_{ij}\|$. В силу того же определения, $d_{ij} = b_{ij} \vee a_{ij}$. Так как для логического поля выполняется аксиома коммутативности, то $a_{ij} \vee b_{ij} = b_{ij} \vee a_{ij}$. Следовательно, $c_{ij} = d_{ij}$, т.е. элементы, стоящие на соответственных местах матриц в левой и правой частях соотношения коммутативности, равны. Из этого вытекает равенство самих матриц. Таким образом, свойство коммутативности доказано. Доказательство остальных соотношений проводится аналогичным образом.

Конъюнкцией двух матриц над K , имеющих соответственно равное число столбцов и строк, называется такая логическая матрица над K , которая имеет такое же число строк и столбцов, и элементы которой равны конъюнкциям соответствующих элементов перемножаемых матриц:

$$C = A \wedge B = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ b_{m1} & \dots & b_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} \wedge b_{11} & \dots & a_{1n} \wedge b_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} \wedge b_{m1} & \dots & a_{mn} \wedge b_{mn} \end{pmatrix}.$$

Например:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \wedge 0 & 1 \wedge 1 & 1 \wedge 1 \\ 1 \wedge 0 & 1 \wedge 1 & 0 \wedge 1 \\ 1 \wedge 1 & 0 \wedge 1 & 1 \wedge 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Для конъюнкции матриц выполняются следующие соотношения: коммутативности $A \wedge B = B \wedge A$; ассоциативности $(A \wedge B) \wedge C = A \wedge (B \wedge C)$; ассоциативности относительно умножения на скаляр $\alpha(A \wedge B) = (\alpha A) \wedge B$; дистрибутивности $(A \vee B) \wedge C = A \wedge C \vee B \wedge C$, $A \wedge B \vee C = (A \vee C) \wedge (B \vee C)$; элиминации $A \vee A \wedge B = A$; $A \wedge (A \vee B) = A$; идемпотентности $A \wedge A = A$; закон нуля $A \wedge \mathbf{0} = \mathbf{0}$. Доказательство этих соотношений проводится аналогично доказательству коммутативности дизъюнкции матриц.

Отрицанием матрицы \bar{A} называется матрица, элементы которой равны \bar{a}_{ij} . Для отрицания матриц выполняются следующие равенства:

закон противоречия $A \wedge \bar{A} = \mathbf{0}$; закон двойного отрицания $\bar{\bar{A}} = A$; закон исключения третьего $A \vee \bar{A} = \mathbf{1}$; законы свертывания $A \vee B \wedge \bar{B} = A$, $A \wedge (B \vee \bar{B}) = A$; законы де Моргана $\overline{A \vee B} = \bar{A} \wedge \bar{B}$, $\overline{A \wedge B} = \bar{A} \vee \bar{B}$. Доказательство этих утверждений также проводится аналогично приведенному выше.

В отличие от перечисленных выше операций с матрицами, операция логического умножения одной логической матрицы на другую определяется несколько сложнее. Пусть есть две логические матрицы A и B , причем число столбцов первой из них совпадает с числом строк второй. Только при соблюдении этого условия операция умножения одной логической матрицы на другую имеет смысл. В противном случае ее выполнить невозможно. *Правило умножения матриц:* чтобы получить элемент, стоящий в i -й строке и j -м столбце матрицы, полученной в результате умножения, нужно элементы i -й строки первой матрицы умножить на соответственные элементы j -го столбца второй и полученные результаты сложить. Т.е. если матрица $A = \|a_{ij}\|_{m \times n}$, а $B = \|b_{ij}\|_{n \times k}$, то элементы матрицы $C = AB$ будут определяться по формуле

$$c_{ip} = a_{i1}b_{1p} \vee a_{i2}b_{2p} \vee \dots \vee a_{in}b_{np} \quad (i=1 \dots m, p=1 \dots k, j=1 \dots n). \quad (8)$$

Например:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \wedge 1 \vee 0 \wedge 1 & 1 \wedge 0 \vee 0 \wedge 1 & 1 \wedge 0 \vee 0 \wedge 1 \\ 1 \wedge 1 \vee 1 \wedge 1 & 1 \wedge 0 \vee 1 \wedge 1 & 1 \wedge 0 \vee 1 \wedge 1 \\ 0 \wedge 1 \vee 1 \wedge 1 & 0 \wedge 0 \vee 1 \wedge 1 & 0 \wedge 0 \vee 1 \wedge 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Умножение двух матриц, вообще говоря, некоммукативно. Оно зависит от порядка сомножителей. Если в приведенном примере мы поменяем порядок умножаемых матриц, то результат будет другим:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \wedge 1 \vee 0 \wedge 1 \vee 0 \wedge 0 & 1 \wedge 0 \vee 0 \wedge 1 \vee 0 \wedge 1 \\ 1 \wedge 1 \vee 1 \wedge 1 \vee 1 \wedge 0 & 1 \wedge 0 \vee 1 \wedge 1 \vee 1 \wedge 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Если рассматривать матрицы не квадратные, то может получиться так, что в одном порядке операция их умножения имеет смысл, а в обратном — нет. Для иллюстрации этого утверждения рассмотрим две логические матрицы $A = \|a_{ij}\|_{2 \times 3}$ и $B = \|b_{jp}\|_{3 \times 4}$.

$$AB = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Если же мы поменяем порядок сомножителей, то выполняемая операция не будет иметь смысла, так как число столбцов матрицы B не равно числу строк матрицы A .

Рассмотрим теперь основные свойства умножения матриц:

$$\alpha(AB) = (\alpha A)B; \tag{9}$$

$$A(\alpha B) = (A\alpha)B; \tag{10}$$

$$(AB)\alpha = A(B\alpha). \tag{11}$$

Докажем свойство (9). Пусть $A = \|a_{ij}\|_{m \times n}$, $B = \|b_{jp}\|_{n \times p}$. Пользуясь правилом умножения матриц, получаем для элемента, стоящего в i -й строке и k -м столбце матрицы $\alpha(AB)$ ($i=1 \dots m$, $k=1 \dots p$) следующее выражение: $c_{ik} = \alpha(a_{i1}b_{1k} \vee \dots \vee a_{in}b_{nk})$. Аналогично для элемента, стоящего в той же i -й строке и k -м столбце матрицы $(\alpha A)B$, получаем выражение: $d_{ik} = (\alpha a_{i1})b_{1k} \vee \dots \vee (\alpha a_{in})b_{nk}$. Выражения для c_{ik} и d_{ik} равны. Следовательно, равны и сами элементы, из чего вытекает равенство матриц, стоящих в левой и правой частях равенства (9). Аналогичным образом доказываются свойства (10)—(11), а также свойства (12)—(13):

$$(A \vee B)C = AC \vee BC; \quad (12)$$

$$C(A \vee B) = CA \vee CB. \quad (13)$$

Из свойств (12)—(13) непосредственно вытекает следующее правило: чтобы умножить дизъюнкцию логических матриц на дизъюнкцию, необходимо каждую матрицу первой дизъюнкции умножить на каждую матрицу второй и полученные результаты сложить. Для умножения логических матриц выполняется свойство *ассоциативности*:

$$A(BC) = (AB)C \quad (14)$$

В силу того, что операции дизъюнкции, конъюнкции и умножения можно применять не к любым матрицам, а только к тем, количество строк и столбцов которых удовлетворяет указанным выше условиям, соотношения (12)—(14) следует понимать таким образом, что если действия, указанные по одну сторону от знака равенства, возможны, то также имеют смысл и действия, указанные по другую его сторону, а результаты в обоих случаях совпадают. Докажем равенство (14). Для этого положим $AB=M$, а $BC=N$ и обозначим элементы матриц M и N через μ_{ik} и η_{jl} . Согласно правилу умножения матриц имеем:

$$\mu_{ik} = a_{i1}b_{1k} \vee \dots \vee a_{in}b_{nk}, \quad \eta_{jl} = b_{j1}c_{1l} \vee \dots \vee b_{jp}c_{pl}.$$

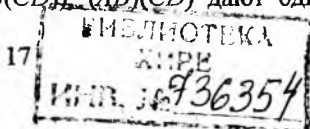
где a_{ij} , b_{jk} , c_{kl} — элементы матриц A , B , C . Выполняя операцию логического умножения матрицы M на C , в i -й строке и в l -м столбце матрицы $(AB)C$, получим

$$\mu_{i1}c_{1l} \vee \dots \vee \mu_{ip}c_{pl} = \vee \vee a_{ij}b_{jk}c_{kl}.$$

Аналогично, выполняя умножение A на N , в i -й строке и l -м столбце матрицы $A(BC)$, получим дизъюнкцию:

$$a_{i1}\eta_{1l} \vee \dots \vee a_{ip}\eta_{pl} = \vee \vee a_{ij}b_{jk}c_{kl}.$$

Так как обе эти дизъюнкции отличаются только порядком слагаемых, то равенство (14) доказано. Из соотношения (14) следует, что результат умножения нескольких матриц A , B , C , ..., Z , записанных в определенном порядке, от способа расстановки скобок не зависит. Поэтому можно говорить не только об умножении двух, но и об умножении большего числа матриц. Например, можно говорить просто об умножении четырех матриц $ABCD$, так как все пять возможных способов вычисления результата этой операции $((AB)C)D$, $(A(BC))D$, $A((BC)D)$, $A(B(CD))$, $(AB)(CD)$ дают один и тот же



результат в силу того, что каждый следующий результат умножения получается из предшествующего непосредственным применением закона ассоциативности (14).

Рассмотрим произвольную логическую матрицу $A=||a_{ij}||_{mn}$. Оказывается, что

$$AE=EA=A. \quad (15)$$

Чтобы имели смысл все выражения из равенства (15), единичная матрица E в первом произведении должна иметь порядок n , а во втором — порядок m . Обозначим AE через B , а EA — через C . Элементы матриц B и C обозначим соответственно через b_{ij} и c_{ij} . Пользуясь правилом умножения матриц, запишем выражения для b_{ij} и c_{ij} :

$$b_{ij} = a_{i1} \cdot 0 \vee \dots \vee a_{ij} \cdot 1 \vee \dots \vee a_{in} \cdot 0 = a_{ij}$$

$$c_{ij} = 0 \cdot a_{i1} \vee \dots \vee 1 \cdot a_{ij} \vee \dots \vee 0 \cdot a_{in} = a_{ij}.$$

Очевидно, что $a_{ij} = b_{ij} = c_{ij}$. Следовательно, равны и соответствующие матрицы, что и доказывает утверждение (15).

Рассмотрим произвольную логическую матрицу A . Если в ней произвести замену строк столбцами, то полученная матрица будет называться транспонированной по отношению к A и обозначаться символом A^T :

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}, \quad A^T = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{m1} \\ a_{12} & a_{22} & \dots & a_{m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{1n} & a_{2n} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}.$$

Например:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}; \quad A^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для произвольных логических матриц A и B и логических скаляров α и β имеют место следующие правила транспонирования:

$$(\alpha A \vee \beta B)^T = \alpha A^T \vee \beta B^T, \quad (16)$$

$$\overline{A^T} = \overline{A}^T, \quad (17)$$

$$(AB)^T = B^T A^T, \quad (18)$$

$$(\alpha A \wedge \beta B)^T = \alpha A^T \wedge \beta B^T. \quad (19)$$

Докажем равенство (18). Элемент, стоящий в i -й строке и j -м столбце матрицы $C = (AB)^T$, равен элементу, стоящему в j -й строке и i -м столбце матрицы AB , т.е. он равен $c_{ij} = a_{j1} \vee \dots \vee a_{jn} b_{ni}$, где a_{jp} , b_{pi} — элементы матриц A и B соответственно. Но это выражение есть дизъюнкция результатов логического умножения элементов i -й строки матрицы B^T на соответственные элементы j -го столбца матрицы A^T , так что $(AB)^T = B^T A^T$, что и доказывает равенство (18). Пусть A — произвольная квадратная матрица над K . Тогда если выполняется соотношение $A^T = A$, то такая матрица называется *симметрической*. Например, логическая матрица

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

является симметрической. Из правил транспонирования дизъюнкции, конъюнкции и отрицания матриц непосредственно вытекает, что дизъюнкция, конъюнкция и отрицание симметрических матриц есть матрицы симметрические. Например, пусть

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ и } B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Тогда

$$A \vee B = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}, A \wedge B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \bar{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Результат умножения симметрических матриц может и не быть симметрической матрицей. Это видно из приведенного ниже примера:

$$AB = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Произвольная квадратная логическая матрица над K называется *обратимой*, если существует квадратная матрица B над K , удовлетворяющая следующему соотношению:

$$AB=BA=E. \quad (20)$$

Если некоторая матрица B удовлетворяет этому соотношению, то она называется *матрицей, обратной к A* , или *обращением матрицы A* . Если матрица A обратима, то существует лишь одно ее обращение. Действительно, если кроме матрицы B условиям (20) удовлетворяет и матрица C , то умножив обе части равенства $AC=E$ слева на B , мы получим $BAC=BE$, или $C=B$. Если обращение матрицы A существует, оно обозначается символом A^{-1} . Таким образом,

$$AA^{-1}=A^{-1}A=E. \quad (21)$$

В условие (20) матрицы A и B входят симметрично. В силу этого, если для A обращением является матрица B , то для B обращением является матрица A . Другими словами,

$$(A^{-1})^{-1}=A. \quad (22)$$

Если для квадратных матриц D, F, G одного порядка существует обращение, то результат их логического умножения также обратим, причем

$$(DFG)^{-1}=G^{-1}F^{-1}D^{-1}, \quad (23)$$

т.е. обращение результата умножения матриц равно результату умножения обращений сомножителей, расположенных в противоположном порядке. Чтобы доказать это утверждение, достаточно проверить равенство $D^{-1}F^{-1}G^{-1}GFD=GFDD^{-1}F^{-1}G^{-1}$, являющееся очевидными следствиями соотношения вида (21) для матриц D, F, G . Для каждой матрицы A , у которой существует обращение, кроме ее нулевой и натуральных степеней $A^0=E, A^1=A, A^2=AA$ и т.д., рассмотрим также ее целые отрицательные степени:

$$A^{-2}=A^{-1}A^{-1}, A^{-3}=A^{-1}A^{-1}A^{-1}. \quad (24)$$

Дробные степени для матриц не вводим. Из соотношений (21) и (24) следует, что к любой обратимой матрице A и к любым целым (не обязательно

положительным) числам p, q можно применять обычные правила действия со степенями:

$$A^p A^q = A^{p+q}; \quad (25)$$

$$(A^p)^q = A^{pq}. \quad (26)$$

Логические матрицы над K , для которых выполняется условие $AB=BA$, называются *перестановочными*. Если матрицы A и B обратимы и перестановочны, то

$$(AB)^p = A^p B^p \quad (27)$$

Рассмотрим связь операций транспонирования и обращения. Применяя правило транспонирования результата умножения матриц (18) к соотношениям (21), получаем:

$$(A^{-1})^T A^T = A^T (A^{-1})^T = E, \quad (28)$$

т.е. в результате транспонирования обратимой матрицы A получаем снова обратимую матрицу

$$(A^T)^{-1} = (A^{-1})^T. \quad (29)$$

Квадратная матрица A называется *ортогональной*, если каждый ее столбец и каждая ее строка содержат ровно по одной единице. Для ортогональных матриц выполняется соотношение

$$AA^T = A^T A = E, \quad (30)$$

т.е. транспонированная матрица обратна к исходной. Отсюда, в частности, следует, что каждая ортогональная матрица обратима. Обращение ортогональной матрицы является ортогональной матрицей. Далее, если матрицы A и B ортогональны, то $A^T = A^{-1}$, $B^T = B^{-1}$, а значит, $(AB)^T = B^T A^T = B^{-1} A^{-1} = (AB)^{-1}$. Другими словами, результат умножения ортогональных матриц является ортогональной матрицей.

Теорема 1. Пусть A и B — квадратные логические матрицы над K и $AB=E$. Тогда A и B — ортогональные матрицы и $B=A^T$.

Доказательство. Пусть размерность матриц A и B — $n \times n$. Выберем произвольно целое $k, 1 \leq k \leq n$. Если k -я строка матрицы A нулевая, то и k -я строка матрицы AB будет нулевой. Поэтому в каждой строке матрицы A есть хотя бы одна единица и этой единице соответствует некоторая единица в матрице B (пусть это будет элемент $a_{sj}=1$, которому соответствует b_{jk}). При $s \neq k$ ($1 \leq s \leq n$) имеем $a_{sj}=0$, так как иначе $(AB)_{sk} = a_{sj} b_{jk} = 1$, т.е. $AB \neq E$. Аналогично, в матрице B все элементы строки j , за исключением b_{jk} равны

нулю. Таким образом, в каждой строке матрицы A есть хотя бы одна единица, причем все эти единицы расположены в разных столбцах. Поэтому матрица A — ортогональна. Аналогично, ортогональна и матрица B . Равенство $B=A^T$ теперь очевидно (каждому элементу $a_{ij}=1$ соответствует $b_{jk}=1$). Теорема доказана.

Из доказанной теоремы следует, что логическая матрица A обратима в том и только в том случае, когда в каждой ее строке и в каждом ее столбце только один элемент будет равным единице, а все остальные — нулю, и обращение A будет являться ее транспонированной матрицей. Проиллюстрируем это утверждение на примере. Имеем

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, A^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, AA^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Отметим, что обратимые логические матрицы размерности $n \times n$ образуют группу, изоморфную группе перестановок из n элементов. Теперь возьмем логическую матрицу A , у которой есть столбцы и строки, содержащие больше одной единицы. Тогда

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, A^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, AA^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Теорема 2. *Результат умножения произвольной логической матрицы на ее транспонированную матрицу является матрицей симметрической.*

Доказательство. Пусть имеется логическая матрица A и ее транспонированная матрица A^T . Тогда $(AA^T)^T = (A^T)^T A^T = AA^T$, так как $(A^T)^T = A$. Теорема доказана.

Список литературы: 1. Гвоздинская Н.А., Дударь З.В., Пославский С.А., Шабанов-Кушнарченко Ю.П. О логических пространствах // АСУ и приборы автоматизации. Вып.106, 1997. С. 21—30. 2. Шабанов-Кушнарченко Ю.П. Логическая алгебра // Проблемы бионики. 1991. Вып.46. С. 3—10. 3. Мальцев А.И. Основы линейной алгебры М.:Наука, 1975. 400 с.

Поступила в редколлегию 15.10.97

УДК 681.51.015

Н.Г. АКСАК, О.Г. РУДЕНКО, А. ШТЕФАН

РЕКУРРЕНТНЫЙ ПРОЕКЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРИ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ПОМЕХАХ

Существует множество задач распознавания образов к построению разделяющей гиперплоскости, выбираемой из заданного класса аппроксимирующих функций. Довольно широкий круг задач можно охватить, приняв в качестве такой аппроксимирующей функции линейную. В этом случае алгоритм обучения представляет собой некоторое правило настройки коэффициентов, основанное обычно на методе наименьших квадратов (МНК). При этом, как правило, предполагается, что присутствующие в измерениях помехи некоррелированы.

Рассмотрим более общую задачу оценивания параметров линейной регрессионной модели (построение линейной разделяющей гиперплоскости):

$$y_n = c^{*T} x_n + \xi_n, \quad (1)$$

где y_n — наблюдаемый выходной сигнал;

$x_n = (x_{1,n}, x_{2,n}, \dots, x_{N,n})^T$ — вектор входных сигналов $N \times 1$;

$c^* = (c_1^*, c_2^*, \dots, c_N^*)^T$ — вектор оцениваемых параметров $N \times 1$; ξ_n — помеха; $n=0, 1, 2, \dots$ — дискретное время при наличии коррелированных помех.

Как уже отмечалось, для оценки параметров c^* по измерениям y_n и x_n успешно используются алгоритмы, основанные на методе наименьших квадратов [1;2]. Если же $c^* = \text{var}$, хорошие результаты дает применение проекционных алгоритмов [3,4], имеющих следующий вид:

$$c_n = c_{n-1} + X_{n|s} (X_{n|s}^T X_{n|s})^{-1} E_{n|s}, \quad (2)$$

где $X_{n|s} = (x_n, x_{n-1}, \dots, x_{n-s+1})$ — матрица $N \times S$;

$E_{n|s} = (y_n - c_{n-1}^T x_n, y_{n-1} - c_{n-1}^T x_{n-1}, \dots, y_{n-s+1} - c_{n-1}^T x_{n-s+1})^T$ — вектор $s \times 1$; s — память (число учитываемых шагов) алгоритма ($s = \text{const} < N$).

Данный алгоритм был получен и изучен в работах [3,4] для случая некоррелированных помех. Наличие же коррелированных помех ξ_n приво-

дит к тому, что как алгоритмы МНК, так и проекционные не будут обеспечивать минимальную ошибку идентификации. Для уменьшения дисперсии ошибок идентификации необходимо в алгоритмы вводить дополнительную информацию о помехах. В частности, если известна ковариационная матрица помех, она используется в МНК в качестве весовой матрицы. В проекционных же алгоритмах она используется по аналогии с [5] следующим образом:

$$c_n = c_{n-1} + X_{n|s} (X_{n|s}^T X_{n|s} + D_{n|s})^{-1} E_{n|s}. \quad (3)$$

Здесь $D_{n|s}$ — ковариационная матрица помех.

Так как реализация алгоритмов МНК и (2), (3) связана с необходимостью обращения матрицы наблюдений (размерности $n \times n$ в МНК и $s \times s$ в проекционных алгоритмах), более удобным в вычислительном отношении являются рекуррентные формы данных алгоритмов. Рекуррентные формы алгоритма МНК известны давно [1], проекционные алгоритмы (2) приведены в [4].

Цель данной работы — получение рекуррентной формы алгоритма (3). Предположим, что ковариационная матрица помех невырождена и известна

$$D_{n|s} = M \left\{ \Xi_{n|s} \Xi_{n|s}^T \right\} = \begin{pmatrix} d_{n,n} & d_{n,n-1} & \dots & d_{n,n-s+1} \\ d_{n-1,n} & d_{n-1,n-1} & \dots & d_{n-1,n-s+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n-s+1,n} & d_{n-s+1,n-1} & \dots & d_{n-s+1,n-s+1} \end{pmatrix}.$$

Здесь $\Xi_{n|s} = (\xi_n, \xi_{n-1}, \dots, \xi_{n-s+1})^T$ — вектор $s \times 1$; $M\{\}$ — символ математического ожидания; $d_{ij} = M\{\xi_i \xi_j\}$.

Пусть на $(n-1)$ -м шаге получена оценка

$$c_{n-1} = c_{n-2} + X_{n-1|s} (X_{n-1|s}^T X_{n-1|s} + D_{n-1|s})^{-1} E_{n-1|s}.$$

Так как в рассматриваемых алгоритмах память s фиксирована, их особенностью является то, что на каждом шаге матрица наблюдений $X_{n|s}$ формируется следующим образом: отбрасывается устаревшее $(n-s)$ -е наблюдение (последний столбец матрицы наблюдений) и в матрицу включается вновь поступившее n -е наблюдение, т.е. можно записать

$$X_{n-1|s} = (x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_{n-s}) = (X_{n-1|s-1}; x_{n-s}), \quad (4)$$

$$X_{n|s} = (x_n, x_{n-1}, \dots, x_{n-s+1}) = (x_n; X_{n-1|s-1}). \quad (5)$$

Таким образом, наличие у $X_{n-1|s}$ и $X_{n|s}$ общей матрицы $X_{n-1|s-1}$ позволяет производить вычисление $X_{n|s}$ по $X_{n-1|s}$, а значит и вычисление обратной матрицы на каждом шаге по обратной матрице, полученной на $(n-1)$ -м шаге.

Блочная структура матриц $D_{n-1|s}$ и $D_{n|s}$ (размерности $s \times s$)

$$D_{n-1|s} = \left(\begin{array}{c|c} D_{n-1|s-1} & d \\ \hline d^T & d_{n-s, n-s} \end{array} \right);$$

$$D_{n|s} = \left(\begin{array}{c|c} d_{n,n} & \hat{d}^T \\ \hline \hat{d} & D_{n-1|s-1} \end{array} \right)$$

показывает, что они также имеют общую матрицу $D_{n-1|s-1}$ размерности $(s-1) \times (s-1)$. Здесь

$$d = (d_{n-1, n-2}, \dots, d_{n-1, n-s})^T; \quad (6)$$

$$\hat{d} = (d_{n, n-1}, \dots, d_{n, n-s+1})^T. \quad (7)$$

Введем следующие обозначения:

$$A_{n-1|s} = (X_{n-1|s}^T X_{n-1|s} + D_{n-1|s});$$

$$B_{n-1|s} = A_{n-1|s}^{-1};$$

$$A_{n|s} = (X_{n|s}^T X_{n|s} + D_{n|s});$$

$$B_{n|s} = A_{n|s}^{-1}.$$

С учетом (4) и (5) матрицы $A_{n-1|s}$ и $A_{n|s}$ примут вид:

$$A_{n-1|s} = \left(\begin{array}{c|c} (B_{n-1|s-1})^{-1} & X_{n-1|s-1}^T x_{n-s} + d \\ \hline x_{n-s}^T X_{n-1|s-1} + d^T & \|x_{n-s}\|^2 + d_{n-s} \end{array} \right),$$

$$A_{n|s} = \left(\begin{array}{c|c} \|x_n\|^2 + d_n & x_n^T X_{n-1|s-1} + \hat{d}^T \\ \hline X_{n-1|s-1}^T x_n + \hat{d} & (B_{n-1|s-1})^{-1} \end{array} \right).$$

Матрицы $B_{n|s}$ и $B_{n-1|s}$ будем искать в виде

$$B_{n-1|s} = \left(\begin{array}{c|c} F_{n-1|s-1} & a_{n-1} \\ \hline a_{n-1}^T & b_{n-1} \end{array} \right), \quad (8)$$

$$B_{n|s} = \left(\begin{array}{c|c} \hat{b}_n & \hat{a}_n^T \\ \hline \hat{a}_n & F_{n-1|s-1} \end{array} \right). \quad (9)$$

Для определения элементов матрицы $B_{n-1|s-1}$ воспользуемся тем, что $A_{n-1|s} B_{n-1|s} = I_s$ (I — единичная матрица $s \times s$). Это позволяет записать следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} (B_{n-1|s-1})^{-1} F_{n-1|s-1} + (X_{n-1|s-1}^T x_{n-s} + d) a_{n-1}^T &= I_{s-1}; \\ (B_{n-1|s-1})^{-1} a_{n-1} + (X_{n-1|s-1}^T x_{n-s} + d) b_{n-1} &= 0; \\ (x_{n-s}^T X_{n-1|s-1} + d^T) F_{n-1|s-1} + (\|x_{n-s}\|^2 + d_{n-s}) a_{n-1}^T &= 0; \\ (x_{n-s}^T X_{n-1|s-1} + d^T) a_{n-1} + (\|x_{n-s}\|^2 + d_{n-s}) b_{n-1} &= 1. \end{aligned}$$

Решая данную систему, получаем следующие соотношения для элементов матрицы $B_{n-1|s}$ (8):

$$b_{n-1} = (\|\tilde{x}_{n-s}\|^2 - z_{n-s}^T B_{n-1|s-1} z_{n-s})^{-1};$$

$$a_{n-1} = -b_{n-1} B_{n-1|s-1} z_{n-s};$$

$$F_{n-1|s-1} = B_{n-1|s-1} + b_{n-1} B_{n-1|s-1} z_{n-s} z_{n-s}^T B_{n-1|s-1}.$$

Здесь $\|\tilde{x}_{n-s}\|^2 = \|x_{n-s}\|^2 + d_{n-s, n-s}$;

$z_{n-s} = X_{n-1|s-1}^T x_{n-s} + \hat{d}$; \hat{d} — вектор, определяемый в соответствии с (6).

Аналогично, учитывая, что $A_{n|s} B_{n|s} = I_s$, получим систему уравнений для определения элементов матрицы $B_{n|s}$. Опуская несложные вычисления, запишем в окончательном виде рекуррентную процедуру идентификации так:

$$c_n = c_{n-1} + X_{n|s} B_{n|s} E_{n|s}, \quad (10)$$

где матрица $B_{n|s}$ имеет вид (9) с элементами, вычисляемыми следующим образом:

$$\hat{F}_{n-1|s-1} = B_{n-1|s-1} + \hat{b}_n B_{n-1|s-1} z_n z_n^T B_{n-1|s-1};$$

$$B_{n-1|s-1} = \hat{F}_{n-1|s-1} + \hat{B}_n F_{n-1|s-1} z_{n-s} z_{n-s}^T F_{n-1|s-1};$$

$$\hat{B}_n = (\|\tilde{x}_n\|^2 - z_n^T B_{n-1|s-1} z_n)^{-1};$$

$$\hat{a}_n = -\hat{b}_n B_{n-1|s-1} z_n,$$

где $\|\tilde{x}_n\|^2 = \|x_n\|^2 + d_{n,n}$;

$z_n = X_{n-1|s-1}^T x_n + \hat{d}$; \hat{d} — вектор, имеющий вид (7).

Список литературы: 1. Алберт А. Регрессия, псевдонверсия и рекуррентное оценивание. М.: Наука, 1977. 224 с. 2. Эйскофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. 683 с. 3. Ищенко Л.А., Либероль Б.Д., Руденко О.Г. Проекционные алгоритмы идентификации линейных объектов // Докл. АН УССР. Сер. А. 1985. № 7. С.62-64. 4. Ищенко Л.А., Либероль Б.Д., Руденко О.Г. О свойствах одного класса многоступенчатых адаптивных алгоритмов идентификации // Кибернетика. 1986. №1. С. 92-96. 5. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси. М.: Наука, 1982. 260 с.

Поступила в редакцию 17.08.97

УДК 519.7

С. Н. КАПЛУН

ИЗУЧЕНИЕ ЦВЕТОВОЙ ИНДУКЦИИ НА БАЗЕ КОМПЬЮТЕРА

Одно из наиболее важных свойств зрения человека — цветовая индукция. Явление цветовой индукции заключается в том, что одно и то же световое излучение, исходящее от наблюдаемого предмета, порождает в нашем сознании различные цветовые ощущения в зависимости от цвета фона, окружающего этот предмет. Глаз, внося поправку на освещение, получает возможность анализировать не только световое излучение, исходящее от предметов, но и отражательные свойства поверхностей этих предметов. Например, лист бумаги выглядит белым и при прямом освещении его солнцем, и в тени леса при освещении его зеленым светом, отраженным от листьев, хотя световые излучения, отраженные листом в двух случаях, разные. Обладая такой способностью, узнающие автоматы смогут распознать предметы вне зависимости от спектра освещения, который все время меняется в реальных условиях.

В колориметрии до недавнего времени использовались различные виды колориметров.

Визуальные колориметры, подразделяемые на субтрактивные, аддитивные, имеют малый охват цветности (кроме колориметра Дональдсона) и малую чувствительность (неточность 0.005 по координатам цветности x, y , в то время как разница обнаруживается при 0.001). Они применяются в основном в полиграфии и телевидении.

Фотоэлектрические колориметры просты в работе и обладают достаточной воспроизводимостью результатов измерений, но имеют недостаточную точность и высокую стоимость. Погрешность наиболее простых из них по координатам цветности x, y — 0.02, а сложных, например, таких как фильтровый колориметр Декслера, — 0.004.

Спектрофотометры и спектроколориметры являются на сегодняшний день самыми точными колориметрами. Они измеряют спектр в видимом диапазоне. По спектру вычисляются координаты цвета. Точность результатов зависит от точности шкалы длин волн и фотометрической шкалы спектрофотометра. Наиболее распространенные спектрофотометры имеют погрешность в координатах цветности — 0.01.

Описанные колориметры предназначены в основном для измерения цветов или их сравнения. Для экспериментального исследования явления цветовой индукции этого недостаточно: необходимо соблюдение некоторых условий, которые зачастую не могут быть реализованы на существующих

колориметрах. Среди них наиболее важные: дозирование цвета с высокой точностью, изменение цвета тестового поля и окружающего его фона, смена одной пары поле — фон на другую с заданной скоростью.

Из сказанного выше следует, что для проведения экспериментов необходимо либо создавать дорогостоящие колориметры, либо комбинировать имеющиеся, что само по себе может обойтись недешево. Чтобы этого избежать, можно использовать принципиально новую технику — компьютеры с достаточно совершенными цветными дисплеями. Основная идея создания колориметра на базе ЭВМ заключается в следующем. Оптические колориметры всегда создавались для изучения зависимости цвета от светового излучения. Попыты по изучению явления цветовой индукции можно проводить без оптической техники, так как анализируется лишь связь между колориметрическими цветами объекта и фона, а не между световыми излучениями, их породившими. Следовательно, формирование цветов на дисплее ЭВМ является достаточным средством для осуществления экспериментов по цветовой индукции. Изучение состояния вопроса показывает, что компьютеры использовались лишь как вычислительные устройства к спектроколориметрам, а возможности многоцветных дисплеев, способных заменить оптику, не рассматривались вообще.

При создании компьютерного колориметра необходимо преодолеть ряд сложностей. Во-первых, цвета, формируемые на дисплее персональной ЭВМ, маркируются не в той системе, которая общепринята в колориметрии (RGB, XYZ и т. д.). И чтобы полученные результаты можно было применить для построения адекватной модели цветовой индукции, необходимо осуществить привязку цветов, формируемых машиной, к колориметрической системе. Во-вторых, количество цветов, которые можно воспроизвести на дисплее современной персональной ЭВМ, недостаточно для достижения требуемой точности изменения цветов. Так, для изучения порогов необходимо порядка 500 млрд. цветов, а для изучения цветовой индукции — порядка 1 млрд. Но в доступном на сегодня 256-цветном режиме на экране можно одновременно отобразить 256 цветов из $64^3=262144$ возможных (64 градации красного, синего и зеленого цветов).

Обозначим символами R' , G' , B' машинные координаты цвета, а символами R'' , G'' , B'' — колориметрическую интенсивность красного, зеленого и синего цветов соответственно. Известно, что в электронно-лучевых трубках координата любой компоненты цветности изменяется в пределах от 0 до 63 и связана с колориметрической интенсивностью квадратичной зависимостью [2]. Поэтому от машинных координат цвета к соответствующим им колориметрическим интенсивностям можно перейти, используя следующие соотношения:

$$R''=R'^2/63^2; \quad G''=G'^2/63^2; \quad B''=B'^2/63^2, \quad (1)$$

где R' , G' , B' изменяется от 0 до 63, а R'' , G'' , B'' — от 0 до 1.

Красный, зеленый и синий цвета, маркированные машинной координатой 63, согласно американскому стандарту (система NTSC), образуют белый цвет с координатами цветности $x_{\text{н}}=0.31$; $y_{\text{н}}=0.316$ [1]. Соотношения яркости этих цветов, согласно стандарту, имеют следующие значения: 0.299; 0.587; 0.114 [1]. Яркость синего цвета, маркированного числом 63, принимаем за 1. Тогда яркость красного и зеленого цветов, обозначенных числом 63, составит соответственно $0.299 / 0.114=2.62$ и $0.587 / 0.114=5.16$. Обозначив символами R , G , B координаты цвета в системе NTSC получим зависимости:

$$R=2.62R''; \quad G=5.16G''; \quad B=B'' \quad (2)$$

Из равенств (1) и (2) мы получаем формулы перехода от машинных цветов к цветам в системе NTSC и наоборот:

$$R=2.62R''/63^2; \quad G=5.16G''/63^2; \quad B=B''/63^2 \quad (3)$$

В компьютерном колориметре цветности и яркости объектов удобно изменять по отдельности, поэтому необходимо связать координаты RGB системы NTSC с координатами XYZ международной системы МКО.

Координаты цветности основных цветов в системе NTSC определяются, согласно стандарту, следующими значениями: $x_R = 0,67$; $y_R = 0,33$; $x_G = 0,21$; $y_G = 0,71$; $x_B = 0,14$; $y_B = 0,08$. Вычисляем координаты ортов R , G , B в системе XYZ. Согласно сказанному ранее, яркости основных цветов принимаем равными единице: $Y_R = Y_G = Y_B = 1$. Координаты цвета X , Y , Z связаны с координатами цветности x , y , z зависимостями [1]: $X=Y*(x/y)$; $Z=Y*(1-x-y)/y$, тогда

$$X_R = 1*(0.67 / 0.33)=2,030303; \quad Z_R = 1*(1-0.67-0.33) / 0.33 = 0;$$

$$X_G = 1*(0.21 / 0.71) = 0,295774; \quad Z_G = 1*(1-0.21-0.71) / 0.71= 0,112676;$$

$$X_B = 1*(0.14 / 0.08) = 1,75; \quad Z_B = 1*(1-0.14-0.08) / 0.08= 9,75.$$

Согласно найденным значениям пересчет координат R , G , B цвета из колориметрической системы NTSC в координаты цвета X , Y , Z системы МКО описывается системой:

$$\begin{cases} X = 2,0303R + 0,2958G + 1,75B; \\ Y = R + G + B; \\ Z = 0,1127G + 9,75B. \end{cases}$$

Обратный переход определяется системой равенств:

$$\begin{cases} R = 0,5709372X - 0,1591740Y - 0,0861504Z; \\ G = -0,5776139X + 1,1727296Y - 0,0166056Z; \\ B = 0,0066766X - 0,0135555Y + 0,1027560Z. \end{cases} \quad (4)$$

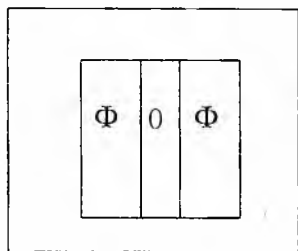
Используя соотношения (3) и (4), можно переходить от колориметрических цветов в системе XYZ к машинным.

Еще одна из проблем, возникающая при создании колориметра, заключается в том, что число градаций цвета, которое можно сформировать на экране дисплея персонального компьютера, меньше того, которое необходимо для достаточно точного формирования цветов при проведении экспериментов по изучению цветовой индукции. Увеличение числа градаций цвета, формируемого на дисплее компьютера достигается, методом цветовой мозаики. Из блоков размером $n \times n$ точек, представляющих собой цветовую мозаику, формируется цвет объекта. Число n зависит от требуемой точности изменения цветов и размера точки на экране дисплея. Цвета отдельных точек блока выбираем следующим способом (одинаково для всех блоков мозаики). Если в колориметре цвета изменяются в системе XYZ, то для перекодировки в машинные координаты цвета используем выражения (3), (4). Если цвета изменяются в системе RGB, то перекодировка производится по формуле (3). Получая значения машинных координат цвета R' , G' , B' , округляем их в меньшую и большую стороны до ближайших целых чисел, получаем шесть машинных уровней красного, зеленого и синего основных цветов R_{\min} , R_{\max} , G_{\min} , G_{\max} , B_{\min} , B_{\max} . Выбор цветов для точек блока начинаем с его левого верхнего угла, а затем движемся до конца блока слева направо, после этого переходим вниз на следующий ряд точек и движемся справа налево и т.д. Такой способ заполнения объектов и небольшие размеры мозаики предотвращают образование муара и обеспечивают равномерное распределение цвета, видимого наблюдателем, по всей площади тест-поля и фона с расстояния 0,7 м. Первую координату цвета текущей точки берем R_{\min} , если среднее значение этой же координаты, подсчитанной для всех предшествующих точек, больше R' . В противном случае берем R_{\max} . Аналогично выбираем вторую и третью координаты

цвета текущей точки. Для первой точки берем цвет с машинными координатами $R_{\max}, G_{\max}, B_{\max}$.

Колориметр представляет собой прибор, реализующий условия, описанные в начале статьи. Моделируется 2 поля: первое — небольшое, второе — обширное, окружающее первое. Первое поле выполняет роль тест-поля (0), а второе — фона (Ф). Цвета тест-поля и фона формируются по методу цветовой мозаики из блоков, образующих растр $4 \times 4 = 16$ цветных точек. По заданным колориметрическим координатам цвета, который требуется точно воспроизвести, необходимо найти ближайшие к нему 8 грубо дозируемых машинных цветов. В колориметрическом пространстве эти 8 цветов образуют вершины шестигранника, охватывающего точку заданного цвета. Кроме того, необходимо найти нужное число точек раstra 4×4 для каждого из 8 грубо дозируемых цветов и распределить эти точки равномерно по площади блока. Таким способом можно получить до $64 \times 16 = 1024$ градаций интенсивности по каждому из основных цветов.

Тест-поле располагается в центре экрана дисплея и имеет форму прямоугольника с шириной 0.5 см. Фон формируется внутри квадрата со стороной 16 см. Высота фона равна высоте тест-поля. За пределами этого квадрата — темнота (опыты выполняются в затемненном помещении при отсутствии внешнего освещения, и на дисплей надевается защитный колпак трапецевидной формы, окрашенный изнутри в черный матовый цвет).



Испытуемый ведет наблюдение двумя глазами, фиксируя взгляд на малом тест-поле и рассматривая его с расстояния 70 см. Экран дисплея перпендикулярен оси зрения наблюдателя, который смотрит горизонтально вперед. Угловой размер внутреннего тест-поля — около 0.5° , внешнего — около 16° . Опытты производятся при среднем фиксированном положении регулятора яркости и при максимальном контрасте.

Известно, что глаз различает объект, если его яркость отличается от яркости фона всего на 0.5 %. Поэтому если в колориметре изменение цветов производится в системе МКО XYZ, то дозирование их должно составлять 0.001 по осям цветности и яркости, что обеспечивает заданную точность изменения цветов. Такое дозирование обеспечивается использованием цветовой мозаики, составленной из блоков размером 4×4 . При таком размере блока возможно получение на экране дисплея всего $1024^3 = 1073741824$ цветов. Опытты подтверждают что заданное дозирование цвета обеспечивает результаты с ошибкой не более 7 %.

Можно предусмотреть быстрый выбор цвета тест-поля и фона с заданной дискретностью с помощью систем меню и «горячих» клавиш.

Описанный компьютерный колориметр позволяет с высокой точностью воспроизводить на экране компьютера цветовые поля, управлять ими и эффективно проводить с их помощью колориметрические эксперименты. Изменения цветов в колориметре производятся с дискретностью, достаточной для проведения высокоточных экспериментов, с ошибкой не более 7 % от пороговой величины.

С помощью колориметра могут быть проверены следующие свойства модели цветовой индукции: аддитивность, однородность, дистрибутивность, симметричность и транзитивность. Также он может быть использован для получения параметров модели преобразования колориметрического цвета в индукционный.

Список литературы: 1. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники. Ч.2. М.: Энергоатомиздат, 1989. 429 с. 2. Цуккерман И.И., Кац, Б.М., Лебедев Д.С и др. Цифровое кодирование телевизионных изображений. М.: Радио и связь, 1981. 239 с.

Поступила в редколлегию 08.10.97

УДК 519.7

Д. О. КОЛЕСНИКОВ, С. В. КОСТЮК,
С. Ю. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО

МЕТРИЗУЮЩИЙ ПРЕДИКАТ В КОНЕЧНОМЕРНОМ АРИФМЕТИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ И ФОРМУЛИРОВКА ЕГО ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ

В статье разрабатываются основы математической теории различения цветов человеком. Такая теория необходима для совершенствования робототехнических систем, систем распознавания объектов и систем машинной графики и во всех тех областях техники, где используется понятие цвета (телевидение, полиграфия, светотехника и т. д.).

Пусть N и N' — n -мерные арифметические пространства, связанные гомеоморфизмом $\varphi: N \rightarrow N'$, который взаимно однозначно и взаимно непрерывно отображает пространство N на пространство N' . Точка $x' \in N'$ называется образом точки $x \in N$, если $x' = \varphi(x)$, а пространство N' — образом пространства N . Пусть, кроме того, $\rho(x', y')$ — евклидово расстояние между точками x', y' пространства N' , определяемое равенством:

$$\rho(x', y') = \sqrt{(\xi'_1 - \eta'_1)^2 + (\xi'_2 - \eta'_2)^2 + \dots + (\xi'_n - \eta'_n)^2}, \quad (1)$$

где $\xi'_1, \xi'_2, \dots, \xi'_n$ и $\eta'_1, \eta'_2, \dots, \eta'_n$ — координаты точек x' и y' в пространстве N' . Рассмотрим предикат Φ на N^4 , определяемый выражением

$$\Phi(x_1, y_1, x_2, y_2) = D(\rho(\varphi(x_1), \varphi(y_1)), \rho(\varphi(x_2), \varphi(y_2))). \quad (2)$$

Здесь символ D обозначает предикат равенства, заданный на декартовом квадрате вещественной полуоси $[0, \infty)$, рассматриваемой как множество всех расстояний между точками пространства N' . Предикат вида (1) устанавливает, равны или нет расстояния между образами точек x_1, y_1 и x_2, y_2 . Будем говорить, что предикат Φ метризует пространство N' .

Проинтерпретируем сказанное на примере задачи о введении поля зрения человека. Рассмотрим испытуемого, голова которого неподвижна в пространстве и находится в вертикальном положении. Один глаз испытуемого смотрит прямо перед собой, его взгляд направлен на неподвижную точку фиксации, второй глаз закрыт. Выделим в физическом пространстве перед испытуемым какую-нибудь плоскость, перпендикулярную зрительной оси того глаза испытуемого, поле зрения которого исследуется, и проведем

на ней через точку фиксации горизонтальную и вертикальную прямые, приняв их за координатные оси двумерного пространства N . Такая плоскость называется кампиметрической [1]. На кампиметрической плоскости исследователь произвольно выбирает две пары точек x_1, y_1 и x_2, y_2 (для этой цели следует брать точечные источники света в темноте) и предлагает испытуемому определить, одинаковы или нет расстояния $\rho(x'_1, y'_1)$ и $\rho(x'_2, y'_2)$ между субъективными образами $x'_1 = \varphi(x_1)$, $y'_1 = \varphi(y_1)$, $x'_2 = \varphi(x_2)$, $y'_2 = \varphi(y_2)$ точек x_1, y_1 и x_2, y_2 . Символом φ обозначено преобразование кампиметрической плоскости N в ее субъективный образ N' (называемый полем зрения глаза), осуществляемое зрительной системой человека. Если предъявить точки при наличии освещения, то испытуемый невольно будет оценивать расстояние между точками кампиметрической плоскости, а не между их субъективными образами.

Опыты показывают, что испытуемый способен решать предложенную задачу при предъявлении ему любых точек x_1, y_1 и x_2, y_2 кампиметрической плоскости с довольно высокой точностью. Это следует из того факта, что изменение расстояний между точками кампиметрической плоскости всего лишь на несколько процентов способно нарушить равенство расстояний между образами этих точек. Таким образом, в данном эксперименте испытуемый своим поведением реализует с весьма высокой точностью предикат Φ . Отображение φ не является тождественным, поэтому образы точек нельзя отождествлять с самими точками кампиметрической плоскости. Это доказывается тем, что образы точек x_1, y_1 и x_2, y_2 , лежащих на кампиметрической плоскости и расположенных на равных расстояниях друг от друга, часто субъективно воспринимаются как не равноудаленные. Вместе с тем наблюдаются случаи, когда образы точек в поле зрения находятся на равных расстояниях друг от друга, а соответствующие им точки на кампиметрической плоскости лежат на разных расстояниях. Субъективные наблюдения испытуемого свидетельствуют также и о том, что непрерывному перемещению точки на кампиметрической плоскости соответствует непрерывное перемещение ее образа в поле зрения и что каждой точке кампиметрической плоскости соответствует свой образ — точка в поле зрения. Следовательно, судя по ощущениям испытуемого, отображение φ в данной интерпретации можно считать гомеоморфизмом.

Сделанные выводы хотелось бы освободить от элемента субъективизма и обосновать чисто физическими экспериментами, используя метод компараторной идентификации. Представляется, что для решения этой задачи достаточно располагать лишь предикатом Φ и его свойствами, не опираясь ни на какие данные субъективного характера. Основываясь на предиде-

кате Φ и его свойствах, требуется доказать, что поле зрения представляет собой двумерное арифметическое пространство N' , получаемое деформацией φ (т.е. взаимно однозначным и взаимно непрерывным преобразованием) кампиметрической плоскости N . Кроме того, требуется найти конкретный вид гомеоморфизма φ . Первая задача является задачей структурной метризации поля зрения, вторая — задачей параметрической метризации поля зрения.

В формальной постановке, независимой от какой бы то ни было интерпретации, задача структурной метризации пространства N' формулируется следующим образом. Дано n -мерное арифметическое пространство N с определенными на нем операциями сложения векторов и умножения вещественного числа на вектор. На N^4 определен предикат $\Phi(x_1, y_1, x_2, y_2)$. Требуется сформулировать такую систему A свойств предиката Φ , при выполнении которой предикат Φ можно было бы представить в виде (2). Вместе с тем, если хотя бы одно из свойств системы A для предиката Φ не выполняется, то его нельзя будет представить в виде (2). Задача параметрической метризации пространства N' сводится к отысканию конкретного вида функции φ , извлекаемого из значений предиката Φ , получаемых в опытах на испытуемом. Если бы задачу удалось решить, тогда можно было бы математически описать механизм формирования поля зрения человека. Имея такое описание, можно было бы применить его для целей совершенствования "зрения" роботов, узнающих автоматов и других технических систем.

Задачей идентификации поля зрения человека далеко не исчерпывается область возможного применения теории метризации конечномерного арифметического пространства. Другой важной содержательной интерпретацией этой теории является проблема введения естественной метрики в пространстве цветов. Назовем ее цветовой интерпретацией задачи метризации. Содержательную интерпретацию задачи метризации, рассмотренную первой, назовем пространственной. В случае цветовой интерпретации множество N понимается как объективное цветовое пространство, в котором каждый цвет представлен набором колориметрических координат. Сумма цветов в цветовом пространстве N определяется суммой световых излучений, породивших данный цвет. Произведение числа на цвет в пространстве N определяется произведением этого числа на световое излучение, соответствующее данному цвету. Гомеоморфизм φ понимается как такое искривление цветового пространства N , в результате которого получается субъективное цветовое пространство N' , называемое еще иначе равноконтрастным цветовым пространством. Равноконтрастность цветового пространства означает, что любые пары цветов, находящиеся в пространстве N'

на одном и том же расстоянии друг от друга, выглядят равноудаленными также и в психофизическом смысле. Если б удалось построить равноконтрастное цветовое пространство, то это было бы равносильно отысканию наиболее экономного способа кодирования информации о цвете воспринимаемых объектов, что дало бы существенную экономию объема машинной памяти, требуемой для запоминания цветных изображений.

Еще одна интерпретация задачи метризации пространства естественно возникает при автоматическом управлении объектами. Назовем ее технической. Пусть некоторый объект преобразует входные сигналы из m -мерного векторного пространства M в выходные сигналы арифметического пространства N меньшей или той же размерности n . Выходной сигнал представлен набором числовых параметров, по которым осуществляется управление объектом. Управление ведется по расстоянию ρ между текущим выходным сигналом и некоторым эталонным набором чисел, которые могут меняться во времени. Цель управления объектом состоит в том, чтобы, меняя его параметры, постоянно держать выходной сигнал объекта достаточно близким к эталонному. При этом важно, чтобы фактическая точность такого приближения находилась в заранее заданных пределах. Как показывает практика управления объектами, заданная точность сравнения текущего сигнала с эталонным обычно не остается постоянной и меняется вместе с изменением эталонного сигнала. Например, текущий сигнал требуется сравнивать с малым эталонным сигналом обычно с меньшей ошибкой, чем при высоком уровне эталонного сигнала.

Трудно рассчитывать на то, чтобы естественным образом формируемое объектом управления пространство выходных сигналов всегда само собой удовлетворяло указанному выше требованию. Поэтому пространство выходных сигналов обычно нуждается в некотором "исправлении". Стандартный прием такого исправления состоит в том, что пространство выходных сигналов деформируют, причем с таким расчетом, чтобы равным геометрическим расстояниям между точками пространства после его деформации всегда соответствовала одинаковая их удаленность друг от друга в некотором содержательном смысле, диктуемом соображениями, направленными на достижение максимальной эффективности процесса управления объектом. Для этого придется растянуть те области пространства, внутри которых точность сравнения фактического выходного сигнала объекта с эталонным недостаточна, и сжать те области, где эта точность избыточна.

Теперь вернемся к формальному описанию метризирующего предиката Φ и сформулируем некоторые его свойства. Очевидно, что любой предикат Φ вида (2) рефлексивен, симметричен и транзитивен относительно пар точек, для которых определяется расстояние ρ между их образами по формуле

(1). Таким образом, приходим к следующим трем законам, которым подчиняется предикат Φ :

парной рефлексивности

$$\forall x, y \in N \quad \Phi(x, y, x, y); \quad (3)$$

парной симметричности

$$\forall x_1, y_1, x_2, y_2 \in N;$$

$$\Phi(x_1, y_1, x_2, y_2) \supset \Phi(x_2, y_2, x_1, y_1); \quad (4)$$

парной транзитивности

$$\forall x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3 \in N;$$

$$\begin{aligned} & \Phi(x_1, y_1, x_2, y_2) \wedge \Phi(x_2, y_2, x_3, y_3) \supset \\ & \supset \Phi(x_1, y_1, x_3, y_3). \end{aligned} \quad (5)$$

Евклидово расстояние ρ обладает симметрией [3], это означает, что $\rho(x', y') = \rho(y', x')$ для любых $x', y' \in N'$. Поэтому для метризирующего предиката справедлив закон одиночной симметричности

$$\forall x_1, y_1, x_2, y_2 \in N;$$

$$\Phi(x_1, y_1, x_2, y_2) \supset \Phi(y_2, x_2, x_1, y_1). \quad (6)$$

Евклидово расстояние ρ удовлетворяет также аксиоме тождества [4]. Это означает, что расстояние $\rho(x', y')$ между любыми совпадающими точками $x' = y'$ пространства N' должно равняться нулю. Кроме того, если x' и y' таковы, что $\rho(x', y') = 0$, то всегда $x' = y'$. Отсюда непосредственно вытекают следующие свойства метризирующего предиката:

первый закон тождества

$$\forall x, y \in N \quad \Phi(x, x, y, y) \quad (7)$$

и второй закон тождества

$$\forall x, x_1, y_1 \in N \quad \Phi(x, x, x_1, y_1) \supset (x_1 = y_1). \quad (8)$$

Рассмотрим предикат R на N^3 , значения которого определяются через значения предиката Φ при любых $x, y, z \in N$ следующим образом:

$$R(x,y,z)=\Phi(x,z,z,y)\wedge$$

$$\wedge \forall t \in N(\Phi(x,t,t,y)\wedge \Phi(z,x,x,t)\supset z=t). \quad (9)$$

Равенство $R(x,y,z)=1$ означает, что точка $\varphi(z)$ лежит посередине отрезка прямой, соединяющего точки $\varphi(x)$ и $\varphi(y)$ в пространстве N' . В самом деле, из условия $R(x,y,z)=1$ согласно (8) следует, что а) $\Phi(x,z,z,y)=1$, б) $\forall t \in N(\Phi(x,t,t,y)\wedge \Phi(z,x,x,t)\supset z=t)=1$. Утверждение а) означает, что точка $\varphi(z)$ равноудалена от точек $\varphi(x)$ и $\varphi(y)$. Утверждение б), взятое вместе с утверждением а), означает, что, если какая-то точка $\varphi(t)$ равноудалена от точек $\varphi(x)$ и $\varphi(y)$ на такое расстояние, что и точка $\varphi(z)$ от точек $\varphi(x)$ и $\varphi(y)$, то точка $\varphi(t)$ всегда совпадает с точкой $\varphi(z)$. Таким образом, точка $\varphi(z)$ делит пополам отрезок прямой, соединяющий точки $\varphi(x)$ и $\varphi(y)$. Сказанное иллюстрируется для случая двумерного пространства диаграммой, изображенной на рис 1.

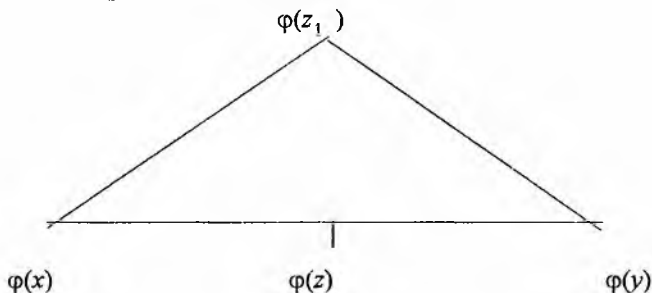


Рис. 1

Пусть $\varphi(t)$ — точка, лежащая на расстоянии ρ от точек $\varphi(x)$ и $\varphi(y)$. Такая точка единственна, если она лежит на середине отрезка прямой, соединяющего точки $\varphi(x)$ и $\varphi(y)$. На диаграмме эта единственная точка обозначена символом z . Если же точка $\varphi(t)$ не совпадает с точкой $\varphi(z)$, то всегда найдется еще одна точка $\varphi(t_1) \neq \varphi(t)$, которая так же, как и точка $\varphi(t)$, лежит на расстоянии ρ от точек $\varphi(x)$ и $\varphi(y)$.

Равенство же $R(x,y,z)=0$ означает, что точка $\varphi(z)$ не лежит на середине отрезка прямой, соединяющего точки $\varphi(x)$ и $\varphi(y)$. В самом деле, если $R(x,y,z)=0$, то условие а) или условие б) не выполняется. В первом случае точка $\varphi(z)$ не лежит посередине отрезка прямой, соединяющего точки $\varphi(x)$ и $\varphi(y)$, во втором случае точка $\varphi(z)$ не лежит на этом отрезке. Таким образом, отношение, соответствующее предикату $R(x,y,z)$, задает операцию отыскания средней точки $\varphi(z)$ между точками $\varphi(x)$ и $\varphi(y)$ пространства N' . Эту

операцию назовем внутренним равноделением точек x и y . Для нее, очевидно, выполняются свойства всюду определенности

$$\forall x, y \in N \exists z \in N R(x, y, z) \quad (10)$$

и однозначности

$$\forall x, y, z, z_1 \in N (R(x, y, z) \wedge R(x, y, z_1) \supset z = z_1). \quad (11)$$

Операцию внутреннего равноделения точек x и y , которая ставит им в соответствие точку z , обозначим кружком: $z = x \circ y$. Она определена на N^2 со значениями в множестве N . Из определения предиката Φ с очевидностью следует, что в арифметическом пространстве N для любых двух точек x и y всегда найдется единственная точка z , такая что точка y будет результатом внутреннего равноделения интервала между точками x и z . Эту операцию назовем внешним равноделением точек x и y , обозначая ее звездочкой: $z = x * y$. Последнее равенство равносильно равенству $x \circ z = y$. Внешнее равноделение обладает свойством всюду определенности

$$\forall x, y \in N \exists z \in N R(x, z, y) \quad (12)$$

и свойством однозначности

$$\forall x, y, z, z_1 \in N (R(x, z, y) \wedge R(x, z_1, y) \supset z = z_1). \quad (13)$$

Очевидно, что операция внутреннего равноделения обладает свойствами коммутативности

$$\forall x, y \in N (x \circ y = y \circ x) \quad (14)$$

и идемпотентности

$$\forall x, y \in N (x \circ x = x). \quad (15)$$

Заметим, что свойство (14) логически следует из свойств (3), (6) и (8). Действительно, согласно определению (9) предиката R имеем:

$$R(x, x, x) = \Phi(x, x, x, x) \wedge \forall t \in N;$$

$$\Phi(x, t, t, x) \wedge \Phi(x, x, x, t) \supset x = t.$$

По закону парной рефлексивности (3) находим: $\Phi(x, x, x, x) = 1$. По законам парной симметричности (6) имеем: $\Phi(x, t, t, x) = 1$. По второму закону тождества (8) из $\Phi(x, x, x, t)$ следует $x = t$. Поэтому $R(x, x, x) = 1 \forall t \in N (1 \wedge \Phi(x, x, x, t) \supset x = t) = 1$, а значит, $x \circ x = x$.

Из зависимостей (1) и (2), определяющих метризуемый предикат Φ , следует, что непрерывное изменение положения точек x, y в пространстве N влечет непрерывное изменение положения точек xoy и $x*у$, являющихся результатом их внутреннего и внешнего равноделения. Соответственно этому имеет место свойство непрерывности операций xoy и $x*у$:

$$\begin{aligned} & \text{функции } xoy \text{ и } x*у \text{ непрерывны по} \\ & \text{совокупности переменных } x \text{ и } y. \end{aligned} \quad (16)$$

Имеется в виду непрерывность, индуцируемая евклидовой метрикой в пространстве N .

В любом четырехугольнике n -мерного арифметического пространства N' отрезки прямых, соединяющие середины противоположных сторон, пересекаются в точке θ , которая делит их пополам [2]. Это свойство иллюстрируется в двумерном случае диаграммой, изображенной на рис. 2.

Его истинность вытекает из тождества

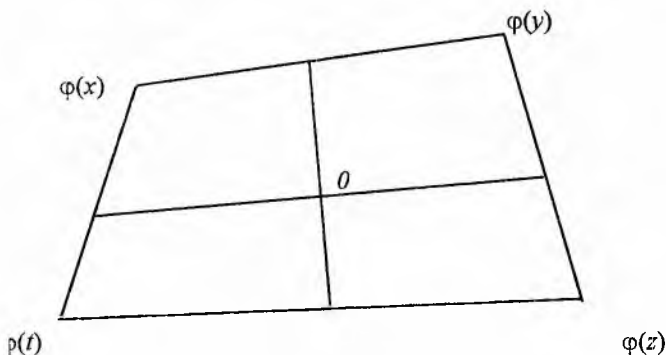


Рис. 2

$$\left(\frac{\varphi(x) + \varphi(y)}{2} + \frac{\varphi(z) + \varphi(t)}{2} \right) / 2 = \left(\frac{\varphi(t) + \varphi(x)}{2} + \frac{\varphi(y) + \varphi(z)}{2} \right) / 2.$$

Отсюда следует свойство четырехугольника:

$$\forall x, y, z, t \in N ((xoy) o (zot) = (tox) o (yoz)). \quad (17)$$

Обратим внимание на то обстоятельство, что выражения (9)—(17) задают свойства предиката Φ , несмотря на то, что имя этого предиката в них не фигурирует. Это вытекает из того, что предикат R выражается зависимо-

стью (1) через предикат Φ , а операция \circ определяется предикатом R . Таким образом, выражения (9)—(17) представляют собой сокращенную запись свойств предиката Φ . Все эти выражения можно при желании записать в виде высказываний, зависящих только от предиката Φ , если заменить в них предикат R и операцию \circ через предикат Φ .

Список литературы: 1. *Гебер Р.* Курс физиологии человека. М.: Биомедгиз, 1936. 678 с. 2. *Ефимов Н.В.* Высшая геометрия. М.: Физматгиз, 1961. 580 с. 3. *Люстерник Л.А., Соболев В.И.* Элементы функционального анализа. М.: Наука, 1965. 520 с. 4. *Эдвардс Р.* Функциональный анализ. Теория и приложения. М.: ИЛ, 1969. 1072 с.

Поступила в редколлегию 15.10.97

УДК 519.7

М.Ф. БОНДАРЕНКО, Е.В. ЖУРАВОК, В.А. ЧИКИНА

АППАРАТНЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ ЛОГИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

Системы логических уравнений, которые используются для описания процессов языкового поведения человека, могут быть решены на ПЭВМ программным путем, для чего уже существует довольно хорошо разработанное программное обеспечение. Однако, в ряде случаев является весьма полезной аппаратная реализация данных булевых систем уравнений, так как при этом достигается значительно большая скорость решения.

С целью расширения функциональных возможностей обратимых переключаемых цепей путем синтеза смешанных переключаемых цепей первого и второго рода с обнаружением ошибок осуществлена разработка модуля для цифровой обработки текстовой информации. Данное устройство может быть использовано при создании аппаратных средств цифровой обработки текстовой информации.

Представленная на рисунке структура модуля обеспечивает аппаратное решение следующей системы обратимых булевых уравнений:

$$y^{bl} = x_2^M x_8^M w^1 \vee x_2^M w^4; \quad (1)$$

$$y^u = x_2^M x_8^M w^1 \vee x_2^M w^2 \vee x_2^M w^3 \vee x_2^M w^5 \vee x_2^M w^6, \quad (2)$$

где все переменные являются предикатами узнавания соответствующих букв.

Уравнение (2) может быть представлено в виде

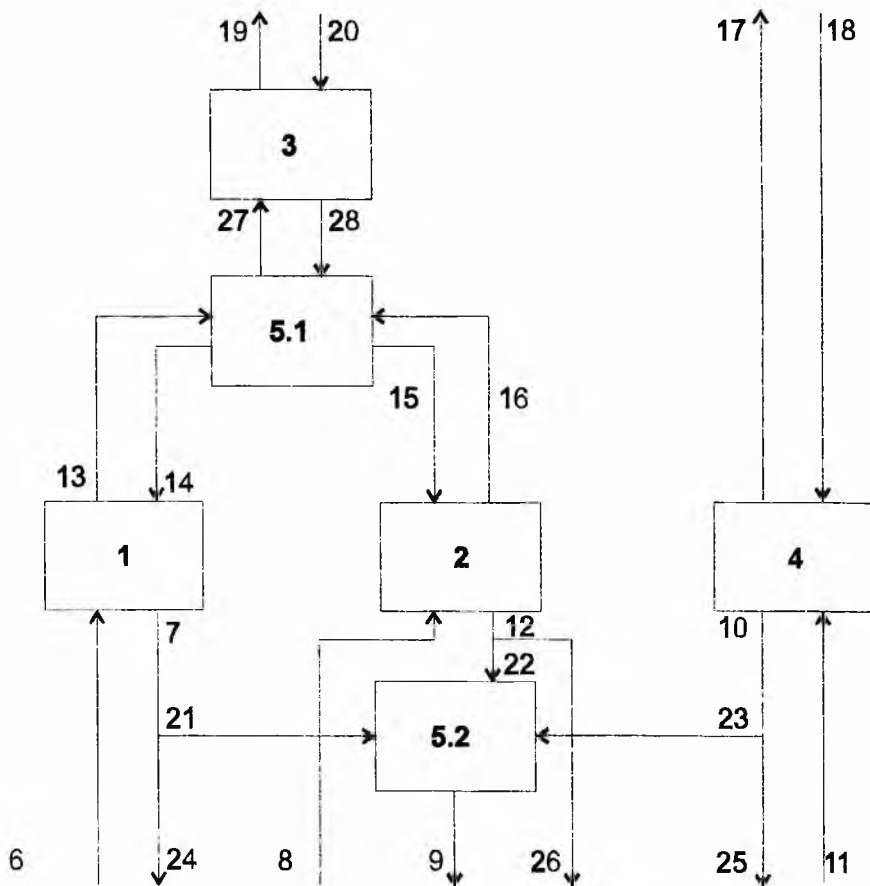
$$y^u = z_1^1 \vee z_2^1; \quad (3)$$

где
(4)

$$z_1^1 = x_2^M x_8^M w^1 \vee x_2^M w^2;$$

$$z_2^1 = x_2^M w^3 \vee x_2^M w^5 \vee x_2^M w^6. \quad (5)$$

Для решения уравнений (4) и (5) целесообразно использовать обратимые переключаемые цепи первого рода. На структурной схеме (рис.) им соответствуют блоки 1 и 2 соответственно.



Если число булевых переменных, входящих в уравнения, невелико и не превышает пять или шесть, то соответствующие цепи могут быть синтезированы как обратимые переключательные цепи первого рода. Однако на практике число булевых переменных зачастую бывает значительно больше, и тогда предложенный способ синтеза оказывается весьма трудоемким и громоздким. В этом случае наиболее целесообразно производить синтез в виде обратимых переключательных цепей второго рода. При этом способе предлагается реализовать не сразу все многоместное отношение в виде обратимой цепи, а ввести обратимость по частям.

Идея состоит в том, что из более простых элементов, представляющих собой цепи первого рода, строится комбинационная схема, реализующая

булеву функцию, соответствующую заданному отношению, а затем при сохранении схемы соединения элементов производится замена всех необратимых элементов обратимыми. В результате получаем обратимую переключательную цепь, реализующую заданное отношение.

Модуль для аппаратного решения системы обратимых булевых уравнений содержит 6 логических блоков. Каждый обратимый блок 1—4 содержит по две группы входов и выходов, соответствующих прямому и обратному преобразованиям. При решении более сложных систем обратимых булевых уравнений путем синтеза смешанных переключательных цепей первого и второго рода: функциональные блоки 1, 2, 4 являются цепями первого рода, функциональный блок 3 — цепью второго рода, функциональные блоки 5.1 и 5.2 — согласователями сигналов, поступающих от блоков 1, 2, 3, 4. Группа входов 6, 8, 11, 18, 20 блоков 1, 2, 4 и 3 является входными шинами устройства соответственно. Группа выходов 9, 17, 19, 21, 22, 23, блоков 1, 2, 3, 4, 5 — выходные шины устройства. Блоки 1, 2, 3 своими группами входов и выходов 13 и 14, 15 и 16, 24 и 25 соединяются через блок 5.1 соответственно, общие выходные линии групп выходов 7, 10, 12 блоков 1, 2, 4 соединяются с выходной шиной устройства 9 через блок 5.2.

При конструировании обратимых переключательных цепей второго рода необходимо решить вопрос о способе соединения между собой элементов в цепях. Провода линий, идущие от разных элементов, но соответствующие одним и тем же узнаваниям букв, нельзя непосредственно соединять между собой во избежание нарушений в работе цепи. Дело в том, что один из элементов на своих выходах x^0 и x^1 может сформировать единичные сигналы, указывая на неопределенность значения x . Другой элемент для тех же узнаваний букв может сформировать выходные сигналы 1 и 0, что соответствует нулевому значению x . При непосредственном соединении проводов, соответствующих одним и тем же узнаваниям, может случиться так, что в некоторых из проводов цепи столкнутся различные сигналы, вызвав тем самым нарушение нормального режима работы переключательной цепи.

Во избежание такого положения в описываемом устройстве провода цепи, обозначенные одинаковыми узнаваниями, соединяются через специальный промежуточный блок, который называется согласователем сигналов для узнаваний букв. Благодаря применению согласователей сигналов удастся, во-первых, избежать недопустимого непосредственного соединения выходов одних элементов со входами других, и, во-вторых, распространить за один такт времени по всей цепи значения узнаваний букв, найденные отдельными элементами.

Устройство работает следующим образом. Если значение какой-либо из переменных не задано или неизвестно, то на все входы, соответствующие этой переменной, следует подать 1. Тем самым допускается возможность любого значения для переменной. Теоретически возможен случай, когда известно, что значение какой-либо из переменных не существует. Тогда на все входы устройства, соответствующие этой переменной, должны быть поданы значения 0.

Прямое преобразование. Пусть заданы следующие значения переменных: $x_2^M = 1; x_8^M = 1; x_8^m = 1; w^1 = 1; w^2 = 0; w^3 = 0; w^4 = 0; w^5 = 0; w^6 = 0$. В этом случае на входную шину устройства должны быть поданы следующие сигналы:

$$x_2^M = 1; x_2^m = 0; x_8^M = 1; x_8^m = 0; x_8^m = 1; x_8^m = 0; w_1^1 = 1; w_1^0 = 0; w_1^2 = 0; w_0^2 = 1; w_1^3 = 0; w_0^3 = 1; w_1^4 = 0; w_0^4 = 1; w_1^5 = 0; w_0^5 = 1; w_1^6 = 0; w_0^6 = 1.$$

На выходах блока 4 сформируются сигналы $y^{b1} = 1, y^{b1} = 0$; на выходах блока 1 — сигналы $z_1^1 = 1, z_1^0 = 0$; на выходах блока 2 — сигналы $z_2^1 = 1, z_2^0 = 0$. После прохождения через блоки 5.1, 5.2, учитывая, что на входы y^u должна подаваться 1, на входах блока 3 сформируются значения $y^u = 1, y^u = 0$.

Таким образом, на входной шине устройства сформируются следующие сигналы: $y^{b1} = 1, y^{b1} = 0$ $y^u = 1, y^u = 0$ что соответствует, $y^{b1} = 1, y^u = 1$. Сигналы на остальных входах выходной шины в данном случае принципиального значения не имеют.

Обратное преобразование. Пусть значения переменных $y^{b1} = 1, y^u = 1$. В этом случае на выходных линиях группы выходов 25 блока 3 сформируются следующие сигналы: $z_1^1 = z_1^0 = z_2^1 = z_2^0 = 1$. На линиях группы выходов 10 блока 4 сформируются сигналы $x_2^M = 1; x_2^M = 0$, остальные сигналы этой группы будут равны 1. На выходных линиях группы выходов 7 и 12 блоков 1 и 2 сформируются все единичные сигналы. После прохождения через блоки 5.1 и 5.2 на выходную шину устройства поступят

следующие сигналы: $x_2^M = 1$; $x_2^M = 0$, остальные сигналы выходной шины будут равны 1. Полученный результат говорит о том, что для выполнения заданного условия необходимо, чтобы переменная $x_2^M = 1$. Остальные переменные допускают многозначность, т. е. в данном случае система имеет несколько решений.

Обратимая переключательная цепь, построенная на основе явного описания алгебры логики, требует удвоенного числа входов и выходов элементов конъюнкции и дизъюнкции, зато не требует инверторов, что ведет к экономии, причем, чем больше количество переменных, тем больше экономия.

Переключательные цепи однородны с точки зрения элементной базы (т.е. содержат элементы конъюнкции и дизъюнкции и не имеют инвертора) и содержат больше блоков.

Обратимая переключательная цепь характеризуется повышенной надежностью, а также эффективностью работы, так как способна отыскивать однозначные значения переменных или же обнаруживать противоречия в исходных данных. Однако, если в результате решения получается некоторая система уравнений, связывающая искомые переменные, то в цепи образуется пробка и она не может довести задачу до окончательного решения. В таких случаях эффективно использовать программную реализацию описанной выше математической модели.

Полученная схема реализует одну из закономерностей, лежащих в основе процесса словоизменения. Если найти все такие закономерности и построить реализующий их микропроцессор, то он сможет выполнять функции тех структур мозга человека, которые хранят навыки человека к склонению и спряжению слов. Такой прибор будет полезен для применения в системах автоматической обработки русских текстов.

Список литературы: 1. Шабанов-Кушнаренко Ю.П. Теория интеллекта. Математические средства. Х.: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1984. 144 с. 2. Шабанов-Кушнаренко Ю.П. О переключательных цепях теории интеллекта. Пробл. бионики. 1980. Вып.25. С. 11-18.

Поступила в редколлегию 30.10.97

УДК 681. 5. 01: 658. 5

И. Ю. ПАНФЕРОВА

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПА ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ К ОПТИМИЗАЦИОННЫМ ЗАДАЧАМ С ЯВНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ

Важной проблемой теории формального описания интеллектуальных систем является разработка процедур принятия оптимальных решений. Рассмотрим класс оптимизационных задач, в которых ограничения заданы системами равенств или/и неравенств в явном виде

$$\begin{aligned} J(u^*) \leq J(u), u^* \in U; \\ \forall u \in U; \end{aligned} \quad (1)$$

при условии

$$g(u) = 0 \text{ или } g(u) \in K, \quad (2)$$

где $J(u)$ — выпуклый, дифференцируемый и ограниченный снизу функционал, определенный на Гильбертовом пространстве H ;

U — выпуклое и замкнутое подпространство в H ;

$g(\cdot)$ — отображение из U в H выпуклое в смысле

$$\begin{aligned} \forall u, v \in U, \forall \alpha \in [0, 1] \\ \alpha g(u) + (1 - \alpha)g(v) - g(\alpha u + (1 - \alpha)v) \in K; \end{aligned} \quad (3)$$

K — выпуклый замкнутый конус в H с непустым содержимым $\overset{\circ}{K}$ (в случае, когда $K = \{0\}$, задача (1) имеет ограничения только в виде равенств, а $g(u)$ является аффинным).

Для решения задачи (1) при условии (2) сформируем Лагранжиан

$$L(u, \lambda) = J(u) + \langle \lambda, g(u) \rangle, \quad (4)$$

где $\lambda \in K^*$ (K^* — сопряженный конус).

Решением (4) является седловая точка (u^*, λ^*) на $U \times K^*$, удовлетворяющая неравенствам

$$u^* \in U, \forall u \in U, \langle L'_u(u^*, \lambda^*), u - u^* \rangle \geq 0; \quad (5)$$

$$\lambda^* \in K^*, \forall \lambda \in K^*, \langle L'_\lambda(u^*, \lambda^*), \lambda - \lambda^* \rangle \leq 0. \quad (6)$$

Учитывая (4), запишем (5) в виде:

$$\langle J'_u(u^*), u - u^* \rangle + \langle \lambda^*, g(u) - g(u^*) \rangle \geq 0. \quad (7)$$

В соответствии с принципом вспомогательных задач сформируем вспомогательный функционал в форме Лагранжиана

$$L: (u, \lambda) \rightarrow \hat{J}(u) + \langle \lambda, Q(u) \rangle, \quad (8)$$

где $\hat{J}(u)$ и $Q(u)$ имеют те же свойства, что и $J(u)$, $g(u)$ соответственно.

Сформируем вспомогательный функционал

$$\begin{aligned} & \hat{J}(u) + \langle \rho_1 J'(u^k) - \hat{J}'(u^k), u \rangle + \langle \lambda^k, (\rho_1 g'(u^k) - Q'(u^k)) \cdot u + \\ & + \langle \lambda, Q(u) + \rho_2 g(u^k) - Q(u^k) \rangle \end{aligned} \quad (9)$$

и определим оптимизационную задачу с явными ограничениями:

$$\min_{u \in U} [\hat{J}(u) + \langle \rho_1 J'(u^k) - \hat{J}'(u^k), u \rangle + \langle \lambda^k, (\rho_1 g'(u^k) - Q'(u^k)) \cdot u \rangle] \quad (10)$$

$$Q(u) + \rho_2 g(u^k) - Q(u^k) \in K. \quad (11)$$

Определенную таким образом вспомогательную задачу можно решить, используя алгоритм А1 в одноуровневом варианте.

Алгоритм А1.

Шаг 1. Сформировать функционал

$$I^v: u \rightarrow \hat{J}(u) + \langle \rho J'(v) - \hat{J}'(v), u \rangle + \rho \tilde{J}(u).$$

Шаг 2. Задать начальные значения $u_0 \in U$ и $m=0$, выбрать направление поиска минимума функционала w_m , $\|w_m\| = 1$, такое что

$$\left. \begin{aligned} (I^v)'(u_m, w_m) &> 0, \\ \lim_{m \rightarrow +\infty} (I^v)'(u_m, w_m) = 0 &\Rightarrow \lim_{m \rightarrow +\infty} (I^v)'(u_m, v_m) = 0, \\ \forall v_m \in U, \|v_m\| &= 1 \end{aligned} \right\}$$

Если это условие удовлетворяется, то выбор w_m является сходящимся.

Шаг 3. Выбрать число ρ_m (шаг) (выбор точки u_{m+1} на прямой $u_m - \rho w_m$) такое, что

$$\left. \begin{aligned} \rho_m > 0, I^v(u_m) - I^v(u_{m+1}) &> 0, \\ \lim_{m \rightarrow +\infty} [I^v(u_m) - I^v(u_{m+1})] = 0 &\Rightarrow \lim_{m \rightarrow +\infty} (I^v)'(u_m, w_m) = 0 \end{aligned} \right\}$$

Если это условие удовлетворяется, то выбор ρ_m является сходящимся.

Шаг 4. Исследуется, является ли I^v достаточно регулярным для перехода от $\lim_{m \rightarrow +\infty} (I^v)'(u_m, v_m) = 0, \forall v_m; \|v_m\| \leq c < +\infty$ к

$$(I^v)'(u^*, \varphi) = 0, \forall \varphi \in H.$$

Шаг 5. Исследуется возможность перехода к исходному функционалу.

Для решения задачи (10, 11) в двухуровневом варианте необходимо в качестве вспомогательного взять функционал вида

$$\bar{J}: (u, \lambda) \rightarrow \hat{J}(u) - \frac{1}{2} \|\lambda\|^2 \quad (12)$$

и воспользоваться алгоритмом A2 на двух уровнях.

Алгоритм A2.

Шаг1. Задать начальное значение $u^0 = (u_1^0, u_2^0, \dots, u_N^0)$ такое, чтобы $u^0 \in U$; $k=0$ — индекс итерации; $i=1, (i=1, 2, \dots, N)$.

Шаг 2. Решить задачу

$$\min_{u_i \in U_i} J(u_1^{k+1}, u_2^{k+1}, \dots, u_{i-1}^{k+1}, u_i, u_{i+1}^k, \dots, u_N^k);$$

пусть u_i^{k+1} — является решением задачи .

Шаг 3. Проверить, если $i = N$, то выполнить шаг 4: иначе индексу номера переменной присвоить значение $i = i + 1$ и выполнить шаг 2.

Шаг 4. Проверить условие останова алгоритма (получена ли заданная точность результата решения задачи): если нет — $i = 1$, $k = k + 1$ и выполнить шаг 2; иначе — останов.

Алгоритм АЗ.

Шаг 1. Выбрать начальные значения (u^0, λ^0) . Индексу итераций присвоить значение $k = 0$.

Шаг 2. Решить вспомогательную задачу на нижнем уровне

$$\min_{u \in U} [\hat{J}(u) + \langle \rho \cdot J'(u^k) - \hat{J}(u^k), u \rangle + \rho \langle \lambda^k, g(u) \rangle]. \quad (13)$$

Пусть u^{k+1} — решение.

Шаг 3. На верхнем уровне решить задачу подстройки множителей Лагранжа

$$\lambda^{k+1} = P(\lambda^k + \varepsilon \cdot g(u^{k+1})), \quad (14)$$

где P — оператор проектирования на K^* ($P = I$, если $K = \{0\}$).

Шаг 4. Если условия останова достигнуты — останов; иначе — $k = k + 1$ и перейти к шагу 2.

Для получения параллельного разложения задачи (10, 11) необходимо позаботиться о соответствующих структурных свойствах вспомогательного функционала, т.е. определить его в аддитивной форме, например

$$\bar{J}(u, \lambda) = \sum_{i=1}^N [\hat{J}_i^k(u_i) + \langle \lambda_i, Q_i^k(u_i) \rangle], \quad (15)$$

положив при этом

$$Q_i^k: u_i \rightarrow g_i(u_1^k, u_2^k, \dots, u_i, u_{i+1}^k, \dots, u_N^k). \quad (16)$$

Принципы вспомогательных задач и релаксации применены для упрощения алгоритмических процедур решения оптимизационных задач. Показано, каким образом, комбинируя указанные принципы и разработанные на их основе обобщенные рекуррентные алгоритмы, можно построить многоуровневые процедуры решения оптимизационных задач, не прибегая к построению дополнительных процедур координации.

Список литературы: 1. Аоки М. Введение в методы оптимизации: Пер. с англ. М.: Наука, 1977. 344 с. 2. Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В. Оптимальное управление. М.: Наука, 1979. 432 с.

Поступила в редколлегию 20.10.97

УДК 371.385:681.3

Н. В. БЕЛОУС, А. П. ВЫРОДОВ, И. Ю. ШУБИН

О НЕКОТОРЫХ АЛГОРИТМАХ ПОСТРОЕНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ПРОСТРАНСТВ

Одной из актуальных задач при построении математических моделей формального описания интеллекта в системах с элементами искусственного интеллекта является проблема компьютерного моделирования и, в частности, моделирования способов построения виртуальных пространств в темпе реального времени, а также методов создания систем проектирования таких пространств.

Интерактивные средства разработки трехмерного пространства.

При разработке трехмерных презентаций, или “трехмерных” Web-страниц возможно применение коммерческих программных продуктов, таких как пакет Virtual Home Space Builder (VHSB) от фирмы Paragraph International. Этот пакет выгодно отличается от аналогичных интуитивно понятным интерфейсом и простотой в обращении. Развитая система контекстно-зависимой помощи полностью охватывает все возможности данного пакета. Возможность применения текстур, выполненных в режиме высокого разрешения с использованием палитры, содержащей более миллиона различных цветов, позволяет придать генерируемому пространству профессиональный реалистичный вид [1+2].

Однако у такого подхода, кроме очевидных преимуществ, есть свои недостатки. Во-первых, предъявляются довольно существенные требования к ресурсам компьютера: для ознакомительной версии пакета необходим, по крайней мере, компьютер с процессором i486DX4-100 и 16 Мегабайт оперативной памяти. Кроме того, отсутствие графического акселератора не позволяет развить необходимую для нормальной работы частоту смены кадров (30 кадров в секунду) при приемлемом размере окна просмотра. Во-вторых, к настоящему времени лишь анонсируются программные средства, позволяющие создавать объекты, перемещающиеся в пространстве независимо от пользователя (наблюдателя).

Метод заранее подготовленной анимации.

Существует также следующий, довольно распространенный метод построения трехмерного пространства: заранее в пакете трехмерной графики создаются анимационные фильмы для каждого перемещения пользователя в определенном направлении. После чего разрабатывается

программа, основной функцией которой является “прокрутка” соответствующей анимации при выборе пользователем одного из возможных направлений перемещения. Одним из главных достоинств данного метода является то, что сложность создаваемого пространства практически не ограничивается. Самый существенный недостаток — ограничение свободы перемещения пользователя.

Разработка системы проектирования виртуальных пространств.

Под термином “система проектирования виртуальных пространств” подразумевается комплекс программных средств, позволяющий пользователю создавать трехмерное пространство и затем путешествовать по нему. Основной сложностью создания данных систем является достижение необходимой частоты смены кадров. Для создания реалистичной иллюзии движения необходимо обеспечить частоту, равную 30 кадрам в секунду. Описываемая система математических моделей и инструментальных средств генерации трехмерного пространства имеет следующие характеристики:

1. Возможность исполнения на компьютере с i286 микропроцессором.
2. Использование всего лишь 450К оперативной памяти.
3. Размер исполняемого файла — 57 Кбайт;
4. Время трансляции компилятором Borland C++ 4.2 на компьютере с процессором i486DX4-100 составляет 39 с.
5. Возможность работы с анимированными текстурами и перемещающимися независимо от пользователя объектами.

Обобщенная схема алгоритма.

Основой алгоритма генерации трехмерного пространства в реальном времени является метод трассировки луча. (Ray Casting) — термин, которым описывается процесс превращения двухмерного представления пространства в трехмерное. При первом приближении этот процесс выглядит следующим образом. Пусть угол обзора пользователя составляет 60° и пусть имеется двухмерная карта нашего пространства с нанесенной на ней стенами и позицией пользователя. О самом пользователе необходимо знать три характеристики: X и Y координаты, а также направление взгляда. Последнее зададим величиной угла, заданной в системе отсчета углов, принятой в языке программирования C++ (рис. 1).

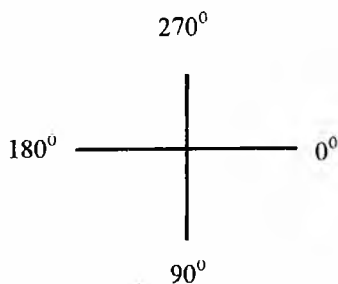


Рис. 1

Пусть пользователь расположен так, как показано на рис. 2.

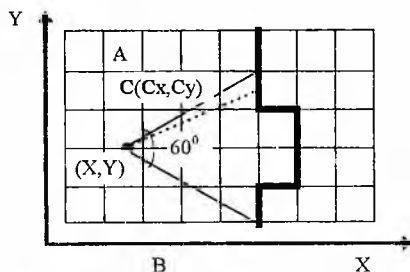


Рис. 2

Сегмент стен, заключенный между точками A и B , должен быть прорисован на экране, так как он находится внутри угла обзора. Чтобы создать иллюзию трехмерности, необходимо вычислять высоту стен как функцию расстояния до них. Определение расстояния до стены и является функциональным назначением метода трассировки луча. Алгоритм этого метода следующий:

Из текущих координат пользователя проводится луч до пересечения со стеной или выхода за пределы карты (см. рис. 2). В точке C луч пересекается со стеной. Обозначим через C_x и C_y координаты пересечения. Тогда по формуле

$$\text{расстояние} = \sqrt{(C_x - X)^2 + (C_y - Y)^2}$$

будет определено искомое расстояние до стены для точки C . На этом метод трассировки луча завершается.

В зависимости от этого расстояния происходит регулировка высоты одной колонки стены, которую на карте (как на виде сверху) обозначили точкой C . Данная манипуляция производится с целью достижения эффекта перспективы.

После этого включается процедура поиска текстуры, которую необходимо наложить на данную стену, и в ней выделяется колонка, которая будет отображаться в точке C . Следующим этапом является установление соответствия между высотой колонки текстуры и высотой колонки стены. Достигается это с помощью метода масштабирования растровой графики. После этого отмасштабированная колонка текстуры выводится на дисплей. Таким образом, была прорисована всего лишь одна колонка дисплея. Чтобы прорисовать остальные, необходимо протрассировать для каждой из них по лучу, как это описано выше. Поэтому при использовании дисплея с графическим режимом 320×200 , необходимо протрассировать 320 лучей.

Оптимизированный алгоритм трассировки луча.

Описанный выше алгоритм трассировки луча имеет ряд недостатков. Самый существенный из них — слишком низкая скорость выполнения. 70 % всего времени расходуется на вычисление квадратного корня по приведенной формуле и на проверку пересечения в данной точке луча со стеной. Очевидно, чтобы ускорить процесс, необходимо, во-первых, исключить операцию извлечения квадратного корня, а во-вторых, сократить число точек, в которых луч может пересекаться со “стеной”. С этой целью создадим новую карту нашего пространства. Разобьем ее на одинаковые квадраты размером, например, 70×70 единиц. Это позволит пользователю переместиться на 70 единиц в направлении оси X или оси Y перед тем, как попасть в другой квадрат. Стены будем строить только на сторонах квадратов (см. рис.2). Таким образом, имеются стены двух типов:

- 1) проектирующиеся в точку на оси X (для краткости будем в дальнейшем называть их X -стенами);
- 2) проектирующиеся в точку на оси Y (аналогично назовем их Y -стенами).

Вернемся к рис.2 и снова будем вести луч до пересечения его со стеной. Но как же определить тип стены, пересеченной лучом? Самый простой способ — трассировать по одному направлению не один луч, а два. При трассировке одного из них будем обращать внимание только на горизонтальные стороны квадратов, где могут находиться Y -стены, а при трассировке другого — только на вертикальные, где могут находиться X -

стены. Первое, что необходимо определить — координаты пересечения нашего луча с горизонтальной (вертикальной) стороной первого встретившегося на пути квадрата. А так как размеры квадратов фиксированы, то координаты следующего пересечения можно экстраполировать. Ниже приведена общая схема оптимизированного таким образом алгоритма трассировки луча:

1. Вычесть из угла направления взгляда пользователя 30° , чтобы получить текущий угол просмотра (экран заполняется слева направо).

2. Проводим на карте первый луч для текущего угла просмотра и обращаем внимание только на вертикальные стороны квадратов (т.е. ищем X -стену). Определяем X , Y координаты пересечения луча с нужной стороной.

3. Используя тангенс текущего угла просмотра, определяем положение точки пересечения относительно начала вертикальной стороны пересеченного квадрата.

4. Зная ширину каждого квадрата (в нашем случае — 70 единиц), определяем следующую Y координату точки, с которой пересечется наш луч, если мы увеличим X координату на 70. Т.е. мы сразу пропускаем 70 точек карты, так как из ее построения следует, что там стена находится не может.

5. Шаги 2—4 выполняются до тех пор, пока луч не пересечется со стеной или не выйдет за пределы карты.

6. Как только определена X -стена, используется Y координата, чтобы определить, какую колонку стены надо прорисовать, и X координата, чтобы определить расстояние до стены. Таким образом, исключена необходимость вычисления квадратного корня.

7. Повторяя шаги 2—5, обращаем внимание лишь на горизонтальные стороны квадратов (т.е. ведется поиск Y -стены). Теперь, если будет “обнаружена” стена, то будет использована X координата, чтобы определить, какую колонку стены надо прорисовать, и Y координата для определения расстояния.

8. Сравниваются два полученных на предыдущих шагах расстояния с целью определения ближайшей к наблюдателю стены и сохраняется номер колонки этой стены.

9. Так как алгоритм использует графический режим 320×200 и угол обзора в 60° , то необходимо увеличить угол просмотра на $60:320=0.1875^\circ$. После этого процесс повторяется снова и снова, пока не будут протрассированы все 320 пар лучей. Следует отметить, что данный способ оптимизации метода трассировки луча имеет недостаток — стены могут соприкасаться только под прямым углом. Этим объясняется “угловатость” создаваемого

описанными алгоритмическими средствами виртуального пространства. Следующим этапом оптимизации данных математических моделей является поиск нового способа оптимизации алгоритма трассировки луча, лишенного указанного выше недостатка.

Наложение текстуры.

Предположим, что произведена трассировка одной пары лучей и найдена ближайшая стена. Результатом является номер колонки определенной стены и расстояние до нее. Что касается последнего, то необходимо, разделив его на экспериментально подобранную константу, получить высоту первой. При подборе данной константы следует сделать высоту стены равной высоте пользователя (наблюдателя). По мнению авторов, это должно способствовать повышению реализма создаваемого пространства. В качестве такой константы используется 20 000, однако возможно применение других субъективно выбранных констант.

Теперь определяем текстуру, которую надо наложить на стену и, используя номер колонки стены, найденный на этапе трассировки луча, находим нужную колонку текстуры. Если вычисленная алгоритмически высота колонки стены и высота колонки текстуры не совпадают, то к последней должен быть применен алгоритм масштабирования.

Масштабирование растровой графики.

Сам алгоритм масштабирования растровой графики можно найти в [3], где он излагается в популярной форме, а также приводится текст программы на языке программирования Microsoft C, реализующей указанный алгоритм. Конечно, это не самый совершенный вариант данного алгоритма, но зато самый простой и, что самое главное, достаточно быстрый. Фрагмент кода из [3] позволяет масштабировать изображение как вдоль горизонтальной, так и вдоль вертикальной осей. Для целей данной разработки необходимо масштабирование только вдоль вертикальной оси. Следует отметить также необходимость перевода этого фрагмента кода с языка программирования высокого уровня C на Ассемблер, что позволит на 80 % ускорить его исполнение. Ниже описан специализированный вариант данного алгоритма.

Предположим, что в результате масштабирования должна быть получена колонка текстуры, высотой 90 пикселей, из имеющейся колонки, высотой 60 пикселей. В этом случае алгоритм должен “вытянуть” колонку, т.е. изменить масштаб вдоль оси Y. Коэффициент масштабирования вычисляется как пропорция:

$$90:60=1.5.$$

Сам алгоритм можно представить следующим образом:

1. Пиксели исходной колонки проиндексируем целыми числами от 1 до 60.
2. Проиндексируем все 90 ячеек результирующей колонки от 1 до 60, но дробными числами. При этом шаг приращения дробного индекса вычисляется по формуле:
шаг приращения = 1: коэффициент масштабирования.
3. Для данной ячейки результирующей колонки текстуры, округлив ее дробный индекс до ближайшего целого, получим номер пикселя исходной колонки.
4. Выполним копирование пикселя с полученным номером в данную ячейку результирующей колонки текстуры.
5. Повторим шаги 3, 4 для каждой из 90 ячеек.

Реализация статических и перемещающихся объектов.

Для манипуляций с объектами приходится создать отдельную карту, совпадающую по размерам с картой конструируемого пространства. Описанный выше алгоритм трассировки луча модифицируется с целью наблюдения за объектами. Теперь в этом алгоритме происходит отслеживание трассируемого луча по карте объектов. Если луч пересечется с объектом, то этот объект заносится в специальный список и у него устанавливается флаг видимости с целью предотвращения добавления того же самого объекта еще раз в список при трассировке “соседнего” луча. Причем необходима сортировка списка по дальности объектов так, чтобы дальние объекты были первыми. Следует отметить, что трассировка луча должна продолжаться и за объектами, так как информация о стенах, которые могут находиться позади объектов и только частично ими перекрываться, также необходима при прорисовке пространства. Объекты обрабатываются лишь после того, как стены будут прорисованы в специальном буфере экрана. Обработка списка объектов начинается по порядку записи, т.е. с самых дальних. При этом расстояние каждой колонки спрайта объекта следует сравнивать с расстоянием до соответствующей стены: если стена ближе, то надо рисовать колонку стены, а не объекта. Отметим, что нет необходимости проверять еще и расстояния до других объектов, так как ближние перекроют дальние. Этот процесс продолжается до тех пор, пока все объекты не будут прорисованы. Очевидно, что при каждой перерисовке экрана необходимо очищать флаги видимости объектов. Это позволит находить новые объекты и перемещать старые.

В настоящее время авторами проводятся исследования по созданию новой структуры данных, которая позволила бы разделить карту на

элементы произвольной формы, а не только квадратной, как в данный момент. Это предоставило бы возможность не только располагать стены под произвольным углом друг к другу, но и перейти от "одноэтажных" конструкций к "многоэтажным". Кроме того, оценивается целесообразность перехода из реального режима работы в защищенный, что может положительно сказаться на производительности всей системы в целом. Все эти методы преследуют единственную цель — добиться максимальной близости к реальному миру и при этом минимизировать требования к аппаратным ресурсам вычислительной системы.

Список литературы: 1. *Алексеев А.Н.* Построение виртуальных миров // Компьютер Пресс. 1997 № 2. С. 25—30. 2. *Алексеев А.Н.* Пакет VHSB // Компьютер Пресс. 1997. №3. С. 85—88. 3. *А. Ла Мот.* Секреты программирования игр: К.: ВHV, 1995. 355 с.

Поступила в редколлегию 23.10.97

УДК 519.7

В.А. МУСИЙЧЕНКО, Н.П. МУСТЕЦОВ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ СИМПТОМАМИ В МЕДИЦИНСКИХ БАЗАХ ЗНАНИЙ

База знаний экспертной системы с вероятностной логикой содержит условные вероятности определенного симптома при определенной болезни. Симптомы считаются независимыми друг от друга там, где зависимость не указана явно. Неявная зависимость обнаруживается корреляционными методами. Если ее не учитывать, то, в предельном случае, задавая один и тот же вопрос пациенту (коэффициент корреляции в этом случае равен единице), в конечном счете, получим равную единице вероятность болезни, для которой этот симптом специфичен, но не определяет её однозначно, хотя после получения первого ответа никакой информации в систему не поступило.

Разные авторы по-разному подходят к решению этой проблемы. Наиболее распространена такая методика: “При коэффициенте корреляции или корреляционном отношении (в случае нелинейной зависимости рассматриваемых показателей) $r \geq 0.7$ два параметра заменяются обобщенным симптомом или же выбирается один из них. Если $0.3 \leq r \leq 0.7$, то для уменьшения погрешности внимание обращается лишь на экстремальные значения каждого из показателей, сопоставленных с возможной величиной второго. Наконец, при $r < 0.3$ считаем симптомы невзаимосвязанными и подлежащими дальнейшему изучению” [1, с.54].

Перед проведением корреляционного анализа “на основании эмпирических соображений (врачебного опыта) составляется сознательно завышенный перечень признаков, которые могут иметь значение в оценке тяжести состояния больного и риска намечаемого лечения” [1, с.54].

Необходимо отметить, что “завышенный перечень признаков” часто составляется несознательно и поэтому всегда есть потребность в обработке корреляции.

Предлагаемый метод позволяет проводить такую обработку автоматически. Теоретической основой метода являются статистические методы обработки распределений [2], теория вероятностей.

Коэффициент корреляции между симптомами S_k, S_l вычисляется по формуле таким образом:

$$r_{k,l} = \frac{\text{COV}(x_k, x_l)}{\delta_k \delta_l}; \quad (1)$$

$$\text{cov}(x_k, x_l) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_k)(x_{il} - \bar{x}_l); \quad (2)$$

$$d_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}, \quad (3)$$

где $x_{ik} = P(S_k/D_i)$ — условная вероятность k -го симптома при i -й болезни;

$\bar{x}_k = \bar{P}(S_k|D)$ — средняя условная вероятность k -го симптома при обрабатываемом множестве болезней;

n — количество болезней в множестве;

δ_k — среднее квадратическое отклонение степени для вероятности k -го симптома;

$\text{cov}(x_k, x_l)$ — взаимная ковариация вероятностей симптомов;

x_k — вариация k -го симптома.

Следующий шаг — введение коэффициента корреляции в формулу Байеса [1] для коррекции вероятности заболевания — уменьшение изменения этой вероятности в случае высокой корреляции (как положительной, так и отрицательной). Предлагается следующее эмпирическое решение:

$$P(D/S_1 \dots S_k) = \frac{P(D) * \prod_{i=1}^k P(S_i/D)}{\prod_{i=1}^k \left(P(S_i/D) + \left(\prod_{j=1}^{i-1} (1 - r_{ji}^2) \right) * P(\bar{D}/S_1 \dots S_{k-1}) * (P(S_i/\bar{D}) - P(S_i/D)) \right)}, \quad (4)$$

где $P(D|S_1 \dots S_k)$ — условная вероятность диагноза D при условии выбора симптомов $S_1 \dots S_k$;

$P(D)$ — априорная вероятность диагноза D ;

$P(\bar{D}|S_1 \dots S_k)$ — условная вероятность отсутствия диагноза D при условии выбора симптомов $S_1 \dots S_k$;

$P(S_i|\bar{D})$ — условная вероятность i -го симптома S при отсутствии диагноза D .

Формула (4) отличается от формулы Байеса наличием множителя $\prod_{j=1}^{i-1} (1 - r_{ji}^2)$ во 2-м слагаемом знаменателя. Этот множитель позволяет учесть корреляцию между симптомами. Если коэффициент корреляции будет равен нулю, то формула (4) превращается в формулу Байеса, где события S_i считаются независимыми. Если $r=1$ хотя бы с одним из предыдущих симптомов, множитель превращается в 0 и значение $P(D|S_1 \dots S_k)$ не изменяется по отношению к предыдущему своему значению $P(D|S_1 \dots S_{k-1})$.

В случае когда $r < 0$, действие формулы аналогично изложенному выше, т.е. осуществляется уменьшение изменения вероятности заболевания, но отрицательный коэффициент корреляции говорит о противоречии в базе знаний, о чем в некоторых случаях целесообразно извещать пользователя.

Поскольку учёт корреляции в формуле (4) на интервал $r \in]0; 1[$ не является строгим, множитель, учитывающий корреляцию, может быть представлен в другом виде: $\prod_{j=1}^{i-1} (1 - |r_{ij}|)$ или $\prod_{j=1}^{i-1} (1 - r_{ij}^2)^{1/2}$, однако избрана вы-

шеприведенная форма ввиду её согласованности с формулой (5) зависимости коэффициента множественной корреляции от коэффициентов частной(парной) корреляции [4]:

$$1 - R_k^2 = \prod_{j=1}^{k-1} (1 - r_{kj}^2) \quad (5)$$

Коэффициенты парной корреляции могут быть вычислены на этапе создания базы знаний и храниться в ней. Они могут служить критерием отбора вопросов.

Рассмотрим применение формулы (1) на фрагменте реальной медицинской базы знаний [3].

База знаний предназначена для диагностики заболеваний желудка. Допустим, пользователь выбрал первый симптом из группы взаимоисключающих симптомов:

- ригидность складок слизистой есть;
- ригидность складок слизистой отсутствует;

и первый симптом из группы:

- пониженный тонус желудка;
- нормальный тонус желудка;
- повышенный тонус желудка.

Условные вероятности симптомов (%)

Симптом	Номер диагноза																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Ригидность складок	13	05	13	10	16	06	03	02	02	03	06	60	04	20	13	03	05
Пониженный тонус	16	08	32	32	25	50	06	05	06	08	68	80	10	16	13	03	08

Избранные симптомы имеют следующие условные вероятности при каждой из 17 диагностируемых болезней (см. таблицу):

Коэффициент парной корреляции между симптомами, вычисленный по формулам (1)—(3), $r=0.53$.

Значение $P(D|S)$ для 1-го симптома вычисляем по теореме Байеса, т.е. по формуле(4) при $r=0$. Учитываем при этом формулы (5)—(7).

$$P(S|\bar{D}) = \frac{P(S) - P(S|D) * P(D)}{1 - P(D)}, \quad (5)$$

где $P(S)$ — априорная полная вероятность симптома S ;

$$P(S) = \sum_{i=1}^k P(D_i)P(S|D_i); \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^k D_i = 1. \quad (7)$$

Например, для болезни №11 — “стенозирующая язва” — при априорной вероятности $P(D)=0.1$ условная вероятность диагноза $P(D|S_1)=0.293$. Значение $P(D|S_1S_2)$ вычисляем уже с учётом корреляции второго симптома с первым: $P(D|S_1S_2)=0.352$. Вычисление по теореме Байеса, т.е. без учёта корреляции, даёт результат, больше отличающийся от $P(D|S_1)$, $P(D|S_1S_2)=0.382$.

При наличии большого количества вопросов в базе знаний накопление незначительных погрешностей может приводить к существенным изменениям конечного результата, что доказывает необходимость учёта корреляции.

Предлагаемый вычислительный метод может быть полезен при обработке больших массивов информации, где коррекция данных экспертом требует больших затрат.

Список литературы: 1. *Кибернетика в сердечной хирургии* / Минцер О.П., Кнышов Г.В., Цыганин А.А. К.: Вища шк. Головное изд-во, 1984. 140 с. 2. *Павловский З. Математическая статистика*. М.: Статистика, 1969. 3. *Вишневский А.А., Артоболевский И.И., Быховский М.Л. Машинная диагностика и информационный поиск в медицине*. М.: Наука 1969. 242 с. 4. *Терехов Л.Л. Экономико-математические методы*. М.: Статистика. 1968. 300 с.

Поступила в редколлегию 30.10.97

УДК 510.62

С.А. ПОСЛАВСКИЙ, В.А. ПОХОДЕНКО,
С.Ю. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО

КОМПАРАТОРНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОНЕЧНОМЕРНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Математическое описание $u=Ax$ исследуемого процесса A при классической идентификации отыскивается по его входным x и выходным u сигналам. Такая идентификация называется прямой, поскольку она требует физического измерения выходных сигналов u . Идентификация информационных процессов, реализуемых человеком, часто имеет дело с такими процессами, выходные сигналы которых субъективны. Субъективные состояния (ощущения, восприятия, мысли и т. п.) не могут быть физически измерены. Поэтому методы прямой идентификации здесь неприменимы. Разновидностью непрямой идентификации является *компараторная идентификация*, имеющая дело с двумя идентичными процессами $u=Ax$ и $v=Ay$, выходные сигналы которых анализируются компаратором $t=D(u, v)$, реализующим предикат равенства.

Компараторная идентификация имеет обширную сферу применения. Это обусловлено способностью человека устанавливать факт равенства или неравенства двух любых своих субъективных состояний. Например, человек способен установить, равны или нет ощущения цвета u, v , порождаемые предъявленными ему световыми излучениями x, y ; субъективные образы, возникающие в его сознании при восприятии тех или иных физических ситуаций; смыслы, порождаемые различными текстами, и т.п. Цель *структурной идентификации* — установить характеристические свойства предиката $E(x, y)=D(Ax, Ay)$, соответствующие заданному общему виду преобразования A , *параметрической* — отыскать численные значения параметров исследуемого процесса, присутствующих в общем виде преобразования A . Имеется много различных психофизических процессов, которые могут быть адекватно описаны компараторным методом в виде линейного оператора A , определенного на пространстве R^m над полем вещественных чисел. Примером может служить процесс зрения человека, преобразующий световые излучения x в ощущения цвета u , который идентифицируется линейным оператором $u=Ax$ [1]. В статье рассмотрены теоретические аспекты компараторной идентификации конечномерных линейных процессов и ее практическое применение для математического описания процесса зрения человека.

Предикат E , определенный на $R^m \times R^m$, называется *аддитивным*, если при любых $x, x', y, y' \in R^m$ $E(x, y)$ и $E(x', y')$ влечет $E(x+x', y+y')$; *однород-*

ным, если при любых $x, y \in R^m$ $E(x, y)$ влечет $E(\alpha x, \alpha y)$ при любом $\alpha \in R$. Аддитивный и однородный предикат E называется *линейным*. Предикат E называется *n-мерным*, если существуют векторы $a_1, \dots, a_n \in R^m$, такие что для каждого $x \in R^m$ $E\left(x, \sum_{i=1}^n \alpha_i a_i\right)$ при единственном наборе вещественных

чисел $\alpha_1, \dots, \alpha_n$, и *нульмерным*, если при любом $x \in R^m$ $E(x, 0)$. Векторы a_1, \dots, a_n называются *основными* для предиката E .

Теорема 1. *Предикат эквивалентности E , определенный на $R^m \times R^m$, линеен в том и только том случае, если найдется проектор P в R^m такой, что при любых $x, y \in R^m$ $E(x, y) = D(Px, Py)$. Каждый линейный предикат E имеет единственную размерность n ($0 \leq n \leq m$).*

Доказательство. Рассмотрим множество $S \subseteq R^m$, заданное условием $S = \{y \mid E(0, y)\}$. Оно является подпространством R^m размерности $m-n$. Выберем базис a_1, \dots, a_n в R^m так, чтобы векторы a_{n+1}, \dots, a_m служили базисом для подпространства S . Пусть $x = \sum_{i=1}^m \xi_i a_i$ — разложение по базисным векторам

произвольного $x \in R^m$. Если $n \neq 0$, то $P_x = \sum_{i=1}^n \xi_i a_i$ есть проекция x парал-

лельно S на подпространство $T \subseteq R^m$, натянутое на векторы a_1, \dots, a_n . При этом $\dim T = n$, $S \oplus T = R^m$, $S = \ker P$. Выбор дополнительного к S подпространства T неоднозначен, однако существует естественный изоморфизм $\varphi: T \rightarrow R^m/E$, сопоставляющий каждому вектору $u \in T$ класс $W_u = \{u+z \mid z \in S\}$ из фактор-пространства R^m/E . На множестве классов вводим операции сложения $W_x + W_y = W_{x+y}$ и умножения на число α $W_x = W_{\alpha x}$ ($\alpha \in R$). Для любых $x, y \in R^m$ условия $E(x, y)$ и $\exists u \in T(x, y \in W_u)$ равносильны. Предикат E является ядерной эквивалентностью для проектора P [2].

Укажем алгоритм определения размерности n линейного предиката эквивалентности E и выбора его основных векторов. На первом шаге выбираем вектор a_1 , удовлетворяющий условию $\bar{E}(0, a_1)$. Если вектор a_1 не существует, то предикат E нульмерен. На i -м шаге выбираем вектор a_i , удовлетворяющий условию $\forall \alpha_1, \dots, \alpha_{i-1} \in R \bar{E}\left(a_i, \sum_{k=1}^{i-1} \alpha_k a_k\right)$. Алгоритм обрывает-

ся на $(n+1)$ -м шаге, когда вектор a_n уже найден, а вектор a_{n+1} не существует. Возможны различные варианты выбора основных векторов для предиката E . Алгоритм позволяет получать любые варианты основных векто-

ров. Векторы a_1, \dots, a_n могут быть использованы в качестве базисных для подпространства T .

Пусть e_1, \dots, e_m — базис пространства R^m . Предикат E называется *базисно рефлексивным*, если при любых $k = \overline{1, m}$ $E(e_k, e_k)$; *базисно n -мерным*, если для каждого $k = \overline{1, m}$ $E\left(e_k, \sum_{i=1}^n \alpha_i a_i\right)$ при единственном наборе вещественных чисел $\alpha_1, \dots, \alpha_{i-1}$.

Теорема 2. *Линейный предикат, определенный на $R^m \times R^m$, является n -мерной эквивалентностью тогда и только тогда, когда он обладает свойствами базисной рефлексивности и базисной n -мерности. Указанная система свойств несократима.*

Теорема 3. *Для каждой n -мерной линейной эквивалентности E , определенной на $R^m \times R^m$, найдется линейный оператор A , отображающий R^m на R^n , такой, что при любых $x, y \in R^m$ $E(x, y) = D(Ax, Ay)$.*

Оператор A называется *характеристическим* для предиката E . Его выбор для заданного предиката неоднозначен. Найдём связь между проектором P и оператором A , о которых шла речь в теоремах 1 и 3. Пусть E — линейный n -мерный предикат эквивалентности на $R^m \times R^m$, $A: R^m \rightarrow R^n$ — его характеристический оператор, $A = \|\alpha_{ij}\|$ — матрица оператора A a_i ($i = \overline{1, n}$)

— какие-нибудь прообразы базисных векторов из R^n . Тогда $Ae_j = \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} a_i$.

В то же время, для проектора P в роли T можно выбрать подпространство R^m натянутое на векторы a_1, \dots, a_n . Сделаем так, получим: $Pe_j = \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} a_i$. Таким образом, $\ker A = \ker P$.

Характеристический оператор A n -мерного линейного предиката эквивалентности E определяется матрицей $A = \|\alpha_{ij}\|$ размера $n \times m$. Укажем метод отыскания последней. Используем специально подобранные векторы $b_j \in R^m$ ($j = \overline{1, m}$), для которых отыскиваются числа β_{ij} , удовлетворяющие условию $E(b_j, \sum_{i=1}^n \beta_{ij} a_i)$. По числам β_{ij} затем определяем числа α_{ij} , обра-

зующие матрицу A . В первом варианте метода берём векторы $b_1 = (\delta_1, 0, \dots, 0)$, $b_2 = (0, \delta_2, 0, \dots, 0), \dots, b_m = (0, \dots, 0, \delta_m)$, во втором — векторы $b_1 = (\delta_1, 0, \dots, 0)$, $b_2 = (\delta_1, \delta_2, 0, \dots, 0), \dots, b_m = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m)$. Здесь $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m$ —

произвольно выбираемые ненулевые вещественные числа. Числа α_{ij} ($i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$) вычисляем в первом варианте метода по формуле $\alpha_{ij} = \beta_{ij} / \delta_j$, во втором — по формуле $\alpha_{ij} = (\beta_{ij} - \beta_{i, j-1}) / \delta_j$. В более общем случае в

роли β_{ij} берем такие векторы $b_j = \sum_{i=1}^m \gamma_{ij} e_i$ ($j = \overline{1, m}$), чтобы для матрицы

$C = \|\gamma_{ij}\|$ существовала обратная матрица C^{-1} . К векторам b_j подбираем вещественные числа β_{ij} такие, чтобы удовлетворялось условие

$E\left(b_j, \sum_{i=1}^n \beta_{ij} a_i\right)$. Искомая матрица $A = \|a_{ij}\|$ определяется формулой $A = BC^{-1}$,

где $B = \|b_j\|$.

Линейные операторы A и A' , отображающие R^m на R^n , называются конгруэнтными, если найдется взаимно однозначное отображение $B: R^m \rightarrow R^n$ такое, что $A' = BA$. Линейные предикаты эквивалентности, определенные на $R^m \times R^m$, совпадают в том и только том случае, если их размерности одинаковы, а характеристические операторы конгруэнтны. Условие равенства предикатов E и E' можно записать также в виде $\ker A = \ker A'$, где A и A' — характеристические операторы предикатов E и E' . Пусть A и A' — матрицы операторов A и A' . Условие равенства предикатов E и E'

запишется следующим образом: $\text{rang } A = \text{rang } A' = \text{rang} \begin{vmatrix} A \\ A' \end{vmatrix}$, где $\begin{vmatrix} A \\ A' \end{vmatrix}$ — мат-

рица, составленная из матриц A и A' , выписанных одна под другой. Это же условие можно представить также и в виде $A' = BA$, где B — невырожденная матрица размера $n \times n$.

Пусть E и E_1 — линейные n -мерные предикаты эквивалентности на $R^m \times R^m$ и $R_1^m \times R_1^m$. Предикат E называется F -изоморфным предикату E_1 , если при любых $x, y \in R^m$ $E(x, y) = E_1(Fx, Fy)$, где $F: R^m \rightarrow R_1^m$ — обратимый линейный оператор. Пусть $A: R^m \rightarrow R^n$ и $A_1: R_1^m \rightarrow R_1^n$ — характеристические операторы предикатов E и E_1 .

Теорема 4. *Линейные n -мерные предикаты эквивалентности E и E_1 F -изоморфны тогда и только тогда, когда существует обратимый линейный оператор $G_1: R^n \rightarrow R_1^n$, такой что $A = G_1^{-1} A_1 F$.*

Из теоремы следует, что установление F -изоморфности линейных эквивалентностей E и E_1 сводится к проверке равенств

$\text{rang } A = \text{rang } A' = \text{rang} \begin{vmatrix} A \\ A_1 & F \end{vmatrix}$, где A, A_1, F — матрицы операторов A, A_1, F .

Применим изложенные выше теоретические результаты для идентификации процесса цветового зрения человека. Свтовое излучение, действующее на глаз человека, формально представляем в виде вектора пространства R^m . Спектр светового излучения выражается координатным представлением вектора. Число m координат вектора совпадает с числом участков, на которые разбивается частотный интервал спектра. Уровни лучистой яркости на участках спектра соответствуют координатам вектора. Число m выбирается исследователем в зависимости от требуемой точности математического описания светового излучения. В роли базисных можно использовать излучения единичной яркости, ограниченные одним из только что упомянутых участков спектра. Однонаправленное совмещение в пространстве двух световых излучений соответствует сложению векторов. Изменение потока излучения в α раз при сохранении его спектрального состава (например, диафрагмированием) соответствует умножению числа α на вектор.

Предикат $E(x, y)$ описывает поведение человека, воспринимающего на соседних полях сравнения световые излучения x, y и устанавливающего равны или нет возбуждаемые ими цвета. Если цвета равны, то человек реагирует на излучения x, y утвердительным ответом $E(x, y)=1$, если не равны, то отрицательным $E(x, y)=0$. Свойства предиката E интерпретируются как законы цветового зрения. Закон рефлексивности гласит: *одинаковые световые излучения одноцветны*. Закон симметричности: *одноцветные излучения остаются одноцветными после их перестановки на полях сравнения*. Закон транзитивности: *если световые излучения x, y и y, z попарно одноцветны, то излучения x, z также одноцветны*. Закон аддитивности: *суммы одноцветных излучений одноцветны*. Закон однородности: *после одинакового изменения интенсивности одноцветные излучения остаются одноцветными*. Закон n -мерности: *для каждого человека найдутся основные излучения a_1, \dots, a_n такие, что любое излучение x может быть уравнено по цвету со смесью $\alpha_1 a_1 + \dots + \alpha_n a_n$ основных излучений при единственном наборе их интенсивностей $\alpha_1, \dots, \alpha_n$* . Перечисленные законы с высокой точностью выполняются в эксперименте. У большинства людей зрение трехкомпонентно. Однако встречаются лица с двух- и однокомпонентным зрением. Слепота соответствует нулькомпонентному зрению.

Для идентификации цветового зрения человека как линейного процесса, преобразующего m -мерные сигналы в n -мерные, достаточно выполнения законов аддитивности, однородности, базисной рефлексивности и базисной

n -мерности (теорема 2). Каждый цвет представляем в виде вектора n -мерного линейного пространства, называемого *цветовым*. Размерность цветового пространства и основные излучения отыскиваются экспериментально вышеописанным методом. Цвет u , возбуждаемый в сознании человека световым излучением x , определяется линейным оператором $u = Ax$, матрица которого находится методом, описанным выше. Оператор A определяет преобразование светового излучения в цвет, осуществляемое зрительной системой человека. Предикат E представляется в виде $E(x, y) = D(Ax, Ay)$. Предикат равенства $D(u, v)$ описывает работу сознания человека, сравнивающего цвета $u = Ax$ и $v = Ay$. Все световые излучения x одного цвета $u = Ax$ называются *метамерными*, они образуют множество W_u , которое естественно принять в качестве объективного представления цвета u . Сложение цветов $u = Ax$ и $v = Ay$ определяется зависимостью $u + v = A(x + y)$, умножение числа α на цвет $u = Ax$ — зависимостью $\alpha u = A(\alpha x)$.

Строки матрицы A преобразования A светового излучения в цвет интерпретируем как *функции спектральной чувствительности зрения* (*кривые сложения*) [3], они могут быть найдены из эксперимента по методу, описанному выше. Пересчет координат цвета излучения x при переходе к новым основным цветам можно выполнить, используя понятия конгруэнтности операторов по формуле $A'(x) = BA(x)$. Пересчет кривых сложения может быть осуществлен с помощью формулы $A' = BA$. Иногда в роли базисных удобнее брать не монохроматические, а произвольные излучения (например, когда базис излучений представлен набором цветных ламп). В этом случае возникает необходимость пересчета результатов идентификации зрения конкретного испытуемого из одного базиса излучений в произвольно выбранный другой. Данная задача решается на базе теоремы 4 при помощи формулы $A = G^{-1}A_1F$.

Список литературы: 1. Шабанов-Кушнарченко Ю.П. Теория интеллекта. Проблемы и перспективы. Х.: Выща шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1987. 160 с. 2. Мальцев А.И. Алгебраические системы. М.: Наука. 1970. 392 с. 3. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники. Ч. 2. М.: Энергоатомиздат, 1989. 429 с.

Поступила в редколлегию 28.10.97

С.Г. УДОВЕНКО

ПРОГРАММНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ПОМЕХ В КОНТУРАХ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

При моделировании и оптимизации стохастических многомерных систем, в том числе и биологических, широкое распространение получили адаптивные модели типа ARMAX [1]. Однако эффективность функционирования контуров цифрового управления с использованием этих моделей во многом зависит от уровня и характера неконтролируемых возмущений, влияющих на поведение управляемой системы. Зачастую является целесообразной и даже необходимой их предварительная фильтрация программными или аппаратными средствами. Рассмотрим одну из возможностей подавления помех в контурах адаптивного управления стохастическими процессами.

При практической реализации цифровых регуляторов особое значение имеет точность регистрации значений выходной величины $y(k)$. Наличие ошибок измерения иногда приводит к возникновению высокочастотных шумов в системе и, как следствие, к скачкообразным изменениям амплитуды управляющих сигналов. Одним из способов подавления нежелательных помех измерения является применение многократных выборок в пределах каждого из тактов идентификации и управления.

В частности, достаточно эффективным представляется метод, основанный на аппроксимации выходного сигнала по результатам обработки таких выборок [2]. Непрерывный выход управляемой системы $y(t)$ в большинстве случаев соответствует гладкой функции между двумя изменениями управляющих воздействий. Если период квантования сигнала $y(t)$ достаточно мал, то эту функцию можно аппроксимировать линейной моделью (в пределах одного такта):

$$y(t) = K_a t + \varepsilon_a(t) + C_a, \quad (1)$$

где K_a — m_y -мерный вектор направлений отдельных составляющих выхода;
 $\varepsilon_a(t)$ — ошибка аппроксимации;
 C_a — вектор абсолютных членов.

Предположив, что в каждом такте осуществляется дополнительная дискретизация сигнала $y(t)$ с постоянным шагом Δf , зависимость (1) с учетом погрешности измерений запишем в виде

$$\hat{y}_i = K_a i + \omega_i + C_a, \quad i = \overline{1, m}, \quad (2)$$

где \hat{y}_i — оценка i -го дискретного значения $y(t)$;

i — номер выборки (дискретное время);

m — количество выборок;

$$\omega_i = \varepsilon_{a_i} + \varepsilon_{b_i},$$

$\varepsilon_{a_i}, \varepsilon_{b_i}$ — соответственно погрешность аппроксимации и ошибка измерения i -й ординаты.

Представим (2) в компактной форме:

$$\hat{y}_i = P_f^T m_i + \omega_i, \quad (3)$$

где $P_f^T = [K_a, C_a]$, $m_i^T = [i, 1]$.

Уравнение (3) представляет собой модель фильтрации в пределах одного такта управления. Предположим, что параметры P_f неизменны на протяжении каждого такта K , однако отличны для разных тактов. Оценку этих параметров можно осуществить методом наименьших квадратов, минимизируя критерий

$$J_f = \text{Tr} \sum_{i=1}^m \omega_i^T S \omega_i = \text{Tr} \sum_{i=1}^m S \omega_i \omega_i^T,$$

где S — произвольная положительно определенная матрица.

С учетом (2) получаем

$$\begin{aligned} J_f &= \text{Tr} \sum_{i=1}^m S (\hat{y}_i - P_f^T m_i) (\hat{y}_i - P_f^T m_i)^T = \\ &= \text{Tr} S \left[P_f^T \sum_{i=1}^m m_i m_i^T P_f - P_f^T \sum_{i=1}^m m_i \hat{y}_i^T - \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^m \hat{y}_i m_i^T P_f + \sum_{i=1}^m \hat{y}_i \hat{y}_i^T \right]. \end{aligned}$$

Принимая обозначения

$$M_1 = \sum_{i=1}^m m_i m_i^T; \quad M_2 = \sum_{i=1}^m \hat{y}_i m_i^T,$$

представим J_f в виде

$$J_f = \text{Tr}S[(P_s - \hat{P}_f)^T M_1 (P_s - \hat{P}_f) - \\ - \hat{P}_f^T M_1 \hat{P}_f + \sum_{i=1}^m y_i y_i^T],$$

где $\hat{P}_f = M_1^{-1} M_2$.

Поскольку матрица M_1 является положительно определенной, то минимум J_f достигим при $P_S = \hat{P}_f$, следовательно, оценка выхода системы в момент i

$$\hat{y}_i = K_a i + C_a = \hat{P}_f m_i, \quad (4)$$

где $m_i^T = [i, 1]$.

Подставляя в (4) значение \hat{P}_f , получаем

$$\hat{y}_i = M_2^T M_1^{-1} m_i = M_2^T f,$$

где $f = M_1^{-1} m_i = [f_1, f_2]^T$, f_1, f_2 — постоянные коэффициенты фильтра.

Опишем результирующий алгоритм фильтрации:

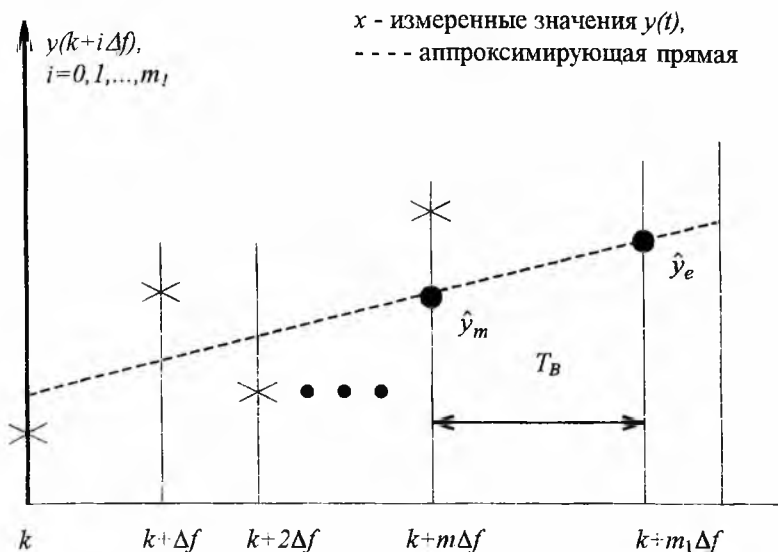
в каждом такте K последовательно с шагом Δf измеряем значения \hat{y}_i и

формируем суммы $\sum_{i=1}^m i \hat{y}_i$, $\sum_{i=1}^m \hat{y}_i$;

после последнего m -го измерения определяем оценку \hat{y}_m в соответствии с зависимостью

$$\hat{y}_i = M_2^T f = f_1 \sum_{i=1}^m i \hat{y}_i + f_2 \sum_{i=1}^m \hat{y}_i.$$

Отфильтрованная величина \hat{y}_m принимается в дальнейшем в качестве оценки выхода в текущем такте управления. Однако, подобный подход не всегда позволяет осуществлять оперативные расчеты по фильтрации выходных данных адаптивного регулятора ввиду необходимости создания резервов времени при различной продолжительности процедур оценивания и поиска управляющих воздействий в каждом из тактов. На рисунке проиллюстрирован процесс фильтрации для k -го периода наблюдения при использовании m -го кратного линейного экстраполирующего фильтра.



Если момент оценки выхода системы соответствует моменту последнего наблюдения, то константы f_1 и f_2 зависят лишь от количества отсчетов в каждом такте, а аппроксимирующее уравнение принимает вид

$$\hat{y}_m = \frac{2}{m} \left[\frac{3}{m+1} \sum_{i=1}^m i \hat{y}_i - \sum_{i=1}^m \hat{y}_i \right].$$

Рассмотрим дополнительную возможность использования описанного метода. Предположим, что проведение m выборок в очередном такте завершено в момент $(k+m\Delta f)$. В этом случае представляется целесообразной экстраполяция аппроксимирующей прямой на m_2 шагов с целью получения оценки \hat{y}_e в момент $(k+m_1\Delta f)$, более приближенный к следующему такту основной дискретизации $(k+1)$. При этом появляется возможность в течение времени T_B осуществить все необходимые расчеты по фильтрации данных. Нетрудно показать, что экстраполяционная оценка \hat{y}_e может быть определена по следующей зависимости:

$$\hat{y}_e = \hat{y}_m + m_2 \left[\frac{6(\hat{y}_m - 2a_1)}{m(m+1)(m-1)} + \frac{2(a_2 - \hat{y}_m m + \hat{y}_m)}{m(m-1)} \right],$$

где $a_1 = \sum_{i=1}^{m-1} i \hat{y}_i$, $a_2 = \sum_{i=1}^{m-1} \hat{y}_i$.

Таким образом, рассмотренный подход позволяет осуществить оперативную фильтрацию помех на выходе цифровых регуляторов по простым в вычислительном отношении процедурам оценивания.

Применение таких процедур повышает робастность контуров идентификации и управления, что делает их пригодными для моделирования поведенческих реакций биологических систем на быстро меняющиеся раздражители.

Список литературы: 1. Larminat P. A robust solution to the admissibility problem in indirect adaptive control without persistency of excitation // *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing*. 1988. 2. P. 95—110. 2. Hebky Z. Multiple sampling in digital control // *Automatizace*. 1984. 27. N6. P.142—145.

Поступила в редколлегию 23.10.97

УДК 681.513

Ф. ХЮБЕНТАЛЬ, А. ШТЕФАН

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ЗАДАНИИ ПАРАМЕТРОВ ПОМЕХ НА ТОЧНОСТЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Многие практические задачи (идентификация, классификация, распознавание образов, прогнозирование и т.д.) сводятся к задаче оценивания параметров линейной регрессионной модели вида

$$Y_n = X_n c_n^* + \Xi_n, \quad (1)$$

где $Y_n = (y_n, y_{n-1}, \dots, y_1)^T$ — вектор $n \times 1$;

$X_n = (x_n, x_{n-1}, \dots, x_1)^T$ — матрица $n \times N$;

$c_n^* = (c_1^*, c_2^*, \dots, c_N^*)^T$ — вектор неизвестных параметров $N \times 1$;

$\Xi_n = (\xi_n, \xi_{n-1}, \dots, \xi_1)^T$ — вектор помех $n \times 1$.

Решением (1) является

$$c_n = X_n^+ Y_n, \quad (2)$$

где X_n^+ — матрица, обратная к X_n , и в зависимости от ранга матрицы X_n принимает вид

$$c_n = \begin{cases} X_n^T (X_n X_n^T)^{-1} Y_n, & \text{если } n < N; \\ (X_n^T X_n)^{-1} X_n^T Y_n, & \text{если } n \geq N. \end{cases} \quad (3)$$

Если $\Xi_n \sim N(0, \sigma_\xi^2 I)$, где I — единичная матрица $n \times n$, данный алгоритм (МНК — метод наименьших квадратов) обеспечивает получение состоятельных оценок с минимальной дисперсией. Если же $\text{cov}\{\Xi_n\} = M\{\Xi_n \Xi_n^T\} = D_n$, где D_n — известная невырожденная ковариационная матрица помех, то наименьшей дисперсией и матрицей ковариации обладает оценка (см. литературу).

$$c_n = \begin{cases} X_n^T (X_n X_n^T + D_n)^{-1} Y_n, & \text{если } n < N; \\ (X_n^T D_n^{-1} X_n)^{-1} X_n^T D_n^{-1} Y_n, & \text{если } n \geq N. \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, при учете коррелированности помех процедура оценивания оказывается значительно сложнее, чем при независимых помехах, что обусловлено, в первую очередь, необходимостью обращения ковариационной матрицы помех D_n . Это приводит к тому, что при оценивании в случае коррелированности помех часто пренебрегают влиянием этой коррелированности и получают заведомо неоптимальные результаты.

Последствия, к которым приводит неучет коррелированности помех (недооценка выборочных дисперсий коэффициентов регрессии, снижение эффективности модели в задаче прогнозирования и т.д.), заставляют искать удобные методы вычисления оценок. К числу таких методов относятся рекуррентные, позволяющие уточнять оценки искомых коэффициентов и элементов ковариационной матрицы помех по мере поступления новой информации. Хотя при этом упрощается сам процесс идентификации, проблема устойчивости алгоритмов к ошибкам в априорных данных остается.

Неточное знание (задание) ковариационной матрицы помех D_n приводит к тому, что вместо этой матрицы в алгоритмах оценивания (5), (6) будет использоваться отличающаяся от нее матрица \tilde{D}_n , т.е. будут вычисляться оценки

$$c_n = \begin{cases} X_n^T (X_n X_n^T + \tilde{D}_n)^{-1} Y_n, & \text{если } n < N; \\ (X_n^T \tilde{D}_n^{-1} X_n)^{-1} X_n^T \tilde{D}_n^{-1} Y_n, & \text{если } n \geq N. \end{cases} \quad (7)$$

Рассмотрим случай, когда \tilde{D}_n незначительно отличается от D_n , т.е.

$$\tilde{D}_n = D_n + \Delta D_n,$$

где ΔD_n "мало".

При использовании алгоритма (5) матрица ковариации оценки c_n определяется соотношением

$$\begin{aligned} \text{cov}\{c^* - c_n\} &= M\{(c^* - c_n)(c^* - c_n)^T\} = \\ &= M\{c^* c^{*T} - c^* c^{*T} X_n^T (X_n X_n^T + D_n)^{-1} X_n - \\ &- X_n^T (X_n X_n^T + D_n)^{-1} X_n c^* c^{*T} + X_n^T (X_n X_n^T + D_n)^{-1} (X_n c^* + \\ &+ \Xi_n)(X_n c^* + \Xi_n)^T (X_n X_n^T + D_n)^{-1} X_n\}. \end{aligned}$$

Для простоты примем, что $M\{c^* c^{*T}\} = I$, где I — единичная матрица $N \times N$. Тогда

$$\text{cov}\{c_n\} = I - X_n^T (X_n X_n^T + D_n)^{-1} X_n. \quad (10)$$

Для оценки (7)

$$\begin{aligned} \text{cov}\{\tilde{c}_n\} &= I - 2X_n^T (X_n X_n^T + \tilde{D}_n)^{-1} X_n + \\ &+ X_n^T (X_n X_n^T + \tilde{D}_n)^{-1} (X_n X_n^T + D_n)(X_n X_n^T + \tilde{D}_n)^{-1} X_n. \end{aligned} \quad (11)$$

При оценивании влияния неточности задания матрицы D_n воспользуемся разложением

$$(1+x)^{-1} = 1 - x + x^2 - \dots \quad (12)$$

и ограничимся членами второго порядка. Тогда

$$\begin{aligned} (X_n X_n^T + \tilde{D}_n)^{-1} &\approx (X_n X_n^T + D_n)^{-1} - (X_n X_n^T + D_n)^{-1} \Delta D (X_n X_n^T + \\ &D_n)^{-1} + (X_n X_n^T + D_n)^{-1} \Delta D (X_n X_n^T + D_n)^{-1} \Delta D (X_n X_n^T + D_n)^{-1}. \end{aligned} \quad (13)$$

Подстановка (13) в (11) и несложные преобразования дают

$$\begin{aligned} \text{cov}\{\tilde{c}_n\} &\approx I - X_n^T (X_n X_n^T + D_n)^{-1} X_n^T + \\ &+ X_n^T (X_n X_n^T + D_n)^{-1} \Delta D (X_n X_n^T + D_n)^{-1} \Delta D (X_n X_n^T + D_n)^{-1} X_n. \end{aligned}$$

Сравнивая ковариационные матрицы оценок c_n и \tilde{c}_n , получаем

$$\begin{aligned} \text{cov}\{\tilde{c}_n - c_n\} &= X_n^T (X_n X_n^T + \\ &+ D_n)^{-1} \Delta D (X_n X_n^T + D_n)^{-1} \Delta D (X_n X_n^T + D_n)^{-1} X_n. \end{aligned}$$

Анализ данного выражения затруднителен, однако из него видно, что $\text{cov}\{\tilde{c}_n - c_n\}$ пропорциональна $(\Delta D)^2$, т.е. если ковариационная матрица, используемая в алгоритме, отличается от истинной на ΔD , это вызывает увеличение дисперсии ошибок оценивания на $(\Delta D)^2$.

Если для оценивания неизвестных параметров c^* используется алгоритм (6) или (при неточно заданной ковариационной матрице) (8), то нетрудно показать, что

$$\begin{aligned} \text{cov}\{c_n\} &= (X_n^T D_n^{-1} X_n)^{-1}, \\ \text{cov}\{\tilde{c}_n\} &= (X_n^T \tilde{D}_n^{-1} X_n) X_n^T \tilde{D}_n^{-1} D_n \tilde{D}_n^{-1} X_n (X_n^T \tilde{D}_n^{-1} X_n)^{-1}. \end{aligned}$$

Поступая по аналогии с изложенным выше, т.е. воспользовавшись разложением (12) и ограничившись членами второго порядка

$$\tilde{D}_n^{-1} = D_n^{-1} - D_n^{-1} \Delta D D_n^{-1} + D_n^{-1} \Delta D D_n^{-1} \Delta D D_n^{-1} - \dots,$$

после несложных преобразований имеем

$$\begin{aligned} \text{cov}\{\tilde{c}_n - c_n\} &= (X_n^T D_n^{-1} X_n)^{-1} X_n^T D_n^{-1} \Delta D D_n^{-1} (I - \\ &- X_n (X_n^T D_n^{-1} X_n)^{-1} X_n^T D_n^{-1}) \Delta D D_n^{-1} X_n (X_n^T D_n^{-1} X_n)^{-1}, \end{aligned}$$

т.е. как и в рассмотренном выше случае, отличие используемой в алгоритме ковариационной матрицы от истинной на ΔD приводит к увеличению дисперсии ошибок оценивания на $(\Delta D)^2$.

Литература: Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси. М.: Наука, 1982. 200 с.

Поступила в редколлегию 17.08.97

И. И. ЗИМА

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА ДЛЯ ОБЪЯСНЕНИЯ ФЕНОМЕНОВ БИОФИЗИЧЕСКОГО ОБМЕНА ИНФОРМАЦИЙ И ЭНЕРГИЙ

При макроскопическом рассмотрении человеческого организма в качестве источника и приемника биофизических полей первым приходит в голову тот факт, что тело человека защищено толстым изолирующим покрытием в виде жира и кожи. Непосредственное взаимодействие человека с окружающей средой происходит через небольшие отверстия в этом покрытии.

Взгляд на человеческое тело в таком ракурсе позволяет использовать в оценке его излучательных свойств модель абсолютно черного тела (АЧТ) применительно ко всем отверстиям и, в первую очередь, к главному, так как до 90 % информации человек получает с помощью зрительного анализатора.

Такой подход позволяет развить гипотезу об электромагнитной инфракрасной природе феноменов биофизического обмена информацией и энергией.

В качестве модели абсолютно черного тела обычно принимают полый шар с отверстием [1]. Если в отверстие попадает под некоторым углом луч света, то, многократно отразившись от стенок, и растеряв всю свою энергию, он так и не выйдет из шара. Отверстие этого простого устройства поглощает падающее на него излучение полностью. Даже самый черный бархат отражает часть света, и следовательно отверстие "чернее" самого черного бархата.

Важным свойством абсолютно черного тела является его способность излучать электромагнитную энергию. Нагретое до определенной температуры отверстие само становится источником излучения электромагнитных волн инфракрасного (ИК) и видимого диапазонов волн. Излучательная способность АЧТ пропорциональна четвертой степени его температуры (закон Стефана — Больцмана). При этом с повышением температуры тела длина волны, соответствующая максимуму излучения, уменьшается, спектр смещается от инфракрасной к ультрафиолетовой области (закон Голицына — Вина). Штриховая линия на рис. 1 показывает характер этого изменения.

Как известно, человеческий глаз выполняет роль оптического анализатора в видимом диапазоне длин волн (0,3...0,7 мкм). Подобно абсолютно черному телу он представляет собой глазное яблоко, выполненное в виде шара с отверстием. Принцип действия глаза, связанный с поглощением световой энергии, также позволяет провести параллель между глазом и абсолютно черным телом, нагретым до температуры 309,6 К.

При таком подходе можно предположить, что глаз, подобно АЧТ, способен и излучать электромагнитную энергию. График распределения энергии в спектре АЧТ при температуре 309,6 К приведен на рис. 2, а.

Видно, что диапазон длин волн, соответствующий максимуму излучения, лежит в инфракрасной области в пределах 8...10 мкм.

По-видимому, в этом диапазоне длин волн лежат и спектры ИК излучений всех органов человеческого тела, имеющих температуру около 36° С. При этом можно предположить, что эти излучения связаны с биофизическим обменом электромагнитной энергией между людьми.

Возможность биофизического обмена энергией и информацией между людьми зависит также от физических свойств пространства, в котором распространяются ИК волны, в частности от степени их поглощения в земной атмосфере. На рис. 2 приведена общая картина спектра поглощения атмосферных газов [2] на поверхности земли (б) и на высоте 11 км (в). Видно, что как раз в области ИК-излучений на длинах волн 7...15 мкм земная атмосфера имеет окно прозрачности с незначительным поглощением энергии озоном. Из этого можно сделать вывод о том, что ИК волны в указанном диапазоне имеют дальность распространения не меньшую, чем видимые волны.

Следовательно, с точки зрения затухания волн в атмосфере, предположение о возможности биофизического обмена энергией между людьми в ИК-диапазоне можно считать оправданным.

Реальность существования такого обмена зависит от энергетических соотношений, то есть от мощности источника излучений и чувствительности их приемника, от энергии излучаемых сигналов, модуляции и возможности их оптимальной обработки на фоне внутренних шумов и внешних помех.

Остановимся подробнее на внешних помехах. Из приведенных графиков видно, что предполагаемый обмен энергией происходит в диапазоне волн, не видимых для глаза. В этом диапазоне волн практически отсутствует солнечное излучение. В качестве источников внешних помех в данном случае могут выступать человеческие и другие тела, имеющие температуру около 36° С. Действительно, мы ощущаем на себе взгляд другого человека и чувствуем его присутствие в полной темноте. Можно предположить, что это только энергетическое воздействие излучений другого человека. В информационном плане человеческий глаз защищен от излучений других тел и органов и воспринимает только излучения, исходящие из зрачков глаз живого человека.

Возможность существования такой защиты связана с тем, что, в отличие от классического абсолютно черного тела, глаз заполнен жидкостью и его отверстие закрыто оптической линзой — хрусталиком. Известно, что

благодаря этим особенностям оптическая система глаза обладает коэффициентом преломления, равным примерно 1,5. Вследствие этого длина волны внутри глаза примерно в 1,5 раза меньше, чем снаружи.

Следовательно, если глаз как абсолютно черное тело, нагретое до температуры $309,6^{\circ}\text{K}$ и другие тела и органы испускают ИК энергию на длинах волн 8...10 мкм, то через зрачок она должна излучаться на длинах волн 12...15 мкм. Заметим, что эти длины волн также лежат в окне прозрачности земной атмосферы. Таким образом как бы обеспечивается частотная развязка между излучениями полезных сигналов и помех. Теперь на частотах сигнала в качестве источников помех могут выступать тела и предметы, которые холоднее тела живого человека. Однако их излучения менее интенсивны (рис. 1) и уже представляют собой ИК-фон, соответствующий диапазону комнатных температур и ниже.

При приеме излучений, исходящих из зрачка глаза, происходит обратное преобразование длин волн.

Оценим энергию излучений АЧТ в указанных диапазонах волн. На границе красного и ИК излучений длина волны равняется 0,7 мкм, что соответствует частоте около $4 \cdot 10^{14}$ Гц. Энергия фотона такой частоты равна примерно 1,8 эВ. Такая энергия достаточна для разрыва молекулярных связей жидкостей, диапазон прочности которых лежит в пределах нескольких электронвольт.

Эта способность фотонов видимого света использована природой при построении человеческого глаза. Чувствительными элементами глаза являются палочки и колбочки сетчатки, воспринимающие световое раздражение. В палочках находится особое вещество — родопсин, получившее название зрительного пурпура, а в колбочках — иодопсин. Предельная чувствительность глаза определяется чувствительностью палочек. Под влиянием света зрительный пурпур подвергается изменениям: на свету он распадается, а в темноте — восстанавливается.

Химически родопсин представляет собой соединение ретинена со специфическим белком опсином. Небольшая молекула ретинена связывается с большой белковой молекулой опсина, представляющей собой длинную цепочку аминокрупп. Под действием светового кванта этот комплекс распадается, что ведет к серии реакций, которые в конечном счете порождают электрический импульс в фоторецепторной клетке. При прекращении поступления фотонов видимых излучений разрушенные химические связи восстанавливаются. Подобно молекулам жидких кристаллов длинные цепочки молекул родопсина складываются друг с другом, образуя сложные пространственные структуры, характеризующие ближний порядок зрительного пурпура. По-видимому, аналогичные процессы происходят и со структурой стекловидного тела, заполняющего глазное яблоко.

Возможности образования упорядоченной структуры в жидкостях ограничены тем, что кинетическая и потенциальная энергия их молекул примерно равны и поэтому они находятся в непрерывном тепловом движении. Поэтому зрительному анализатору, как и любой оптической системе, свойственно наличие тепловых шумов, ограничивающих их чувствительность. Максимальная чувствительность зрительного анализатора соответствует полной темноте и состоянию покоя. При этом при отсутствии разрыва молекулярные связи света возможно проявление действия на зрительный анализатор и инфракрасных излучений.

Энергия фотона, соответствующего длине волны 8 мкм, примерно в десять раз меньше чем для видимых волн и составляет около 0,15 эВ. Она недостаточна для разрыва химических связей, но достаточна для возмущения молекул. В частности, известно, что такая энергия может изменить вращательное и колебательное движение молекул жидкости. Особенностью ИК излучений указанного диапазона волн является также и то, что период их колебаний меньше, чем время релаксации жидкостей глаза. Такая волна не успевает увлечь за собой молекулу жидкости и может только ее активизировать. При этом в сочетании с действием электростатических полей организма воздействие ИК излучения вызывает процессы аналогичные тем, что происходят при встряхивании кристаллизирующейся жидкости.

Благодаря активирующему воздействию ИК излучений на жидкости глазного яблока и чувствительных элементов глаза происходит дополнительное упорядочение их молекул, и уменьшается уровень внутренних шумов зрительного анализатора. При этом можно говорить о появлении фоновой (экстрасенсорной) чувствительности глаза к ИК излучениям. Воздействие ИК излучения при этом приводит к уменьшению уровня фона в конкретном чувствительном элементе глаза и к появлению черно-белого изображения на сетчатке в целом. Субъективно, при фоновом обнаружении сигнал наблюдается в виде почернения серого фона. Заметим, что при обычном обнаружении в диапазоне видимых волн появление сигнала наблюдается в виде белого изображения.

Проведенный анализ показывает, что с точки зрения энергетики фотонов ИК-излучений и их влияния на зрительный аппарат предположение о возможности биофизического обмена в ИК диапазоне можно также считать оправданным.

В дополнение к высказанным суждениям можно добавить положительные предпосылки в части сохранения закономерностей геометрической оптики глаза в диапазоне ИК волн; возможности использования одних и тех же биологических устройств обнаружения и распознавания для видимых и ИК волн; возможности биофизического обмена как абстрактной, так и пространственно ориентированной информацией.

Окончательное суждение о плодотворности высказанной идеи об использовании модели абсолютно черного тела и гипотезы об электромагнитной инфракрасной природе феноменов биофизического обмена информацией и энергией может быть высказано после проведения исследований на микроскопическом уровне и достоверных радиоизмерений.

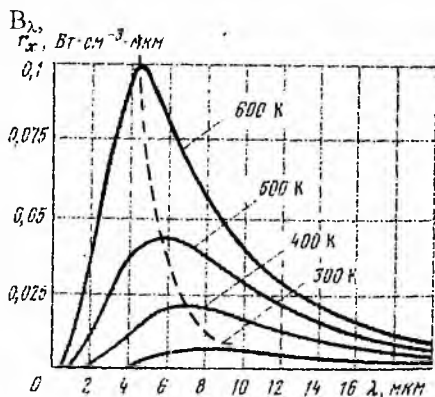


Рис. 1

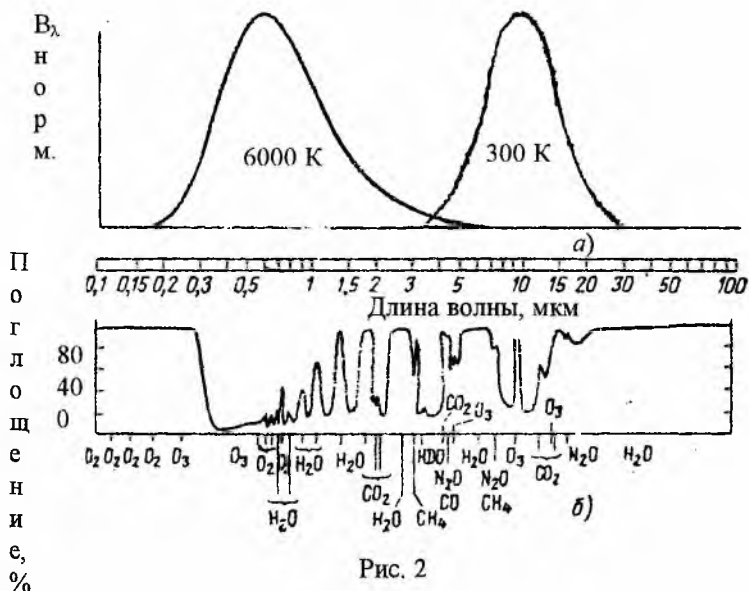


Рис. 2

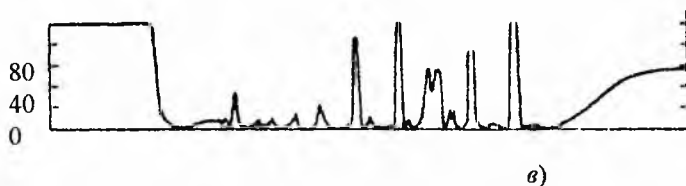


Рис. 2 (Продолжение)

- Список литературы:** 1. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1985.
2. Зув В.Е.. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Сов. радио, 1970.

Поступила в редколлегию 05.11.97

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СТРУКТУР ОРГАНИЗАЦИОННО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Отличительной особенностью методов синтеза иерархических структур организационно-технологических комплексов является необходимость декомпозиции глобальной оптимизационной задачи управления в ряд иерархически связанных подзадач. Традиционный подход к созданию таких структур [1, 2] предусматривает формулировку сначала локальных подзадач, которые обеспечивают достижение локальных целей структурных подразделений объекта управления, а затем — синтез дополнительных подзадач, которые обеспечивают координацию локальных решений, направленную на достижение глобальной цели всей системы. В этих методах глобальная цель системы формально не выражается в явном виде, а обеспечивается только качеством процедур координации. Кроме того, координационные методы не дают строго формализованного подхода к получению локальных подзадач введением упрощений и эволюционного изменения глобальной цели в случае недостаточности исходной информации об объекте управления на момент проектирования и опытной эксплуатации. В координационном подходе упрощения глобальной цели производятся в неявном виде при построении процедур координации, что может привести к недооценке степени взаимодействия подзадач и плохой координируемости всей системы.

В противоположность традиционным подходам проектирования иерархических структур организационно-технологических комплексов предлагается исследовать глобальную цель функционирования, чтобы на формальном уровне показать необходимость и возможность получения иерархически связанных оптимизационных подзадач, достижение локальных целей которыми обеспечит достижение глобальной цели всей системы.

Одним из важных преимуществ предлагаемого подхода является то, что всегда при замене глобальной цели на локальные формально учитываются любые допустимые упрощения, при этом в явном виде учитываются все взаимосвязи между подзадачами. Кроме того, синтезированные в соответствии с предлагаемым подходом, основанным на принципе “от глобальной цели к иерархии подцелей”, структуры организационно-технологических комплексов могут не совпадать с естественной композиционной природой объекта, что может служить основанием для реорганизации объекта с целью его совершенствования.

Во многих случаях, когда глобальная оптимизационная задача содержит связующие переменные и ограничения, возникает необходимость применения методов замены переменных и множителей Лагранжа, позволяющих заменить соединяющие ограничения переменными взаимосвязи, а потом, используя параметрическую декомпозицию, ослабить действие соединительных переменных и, наконец, получить структуру, которая допускает разделение на иерархически связанные подзадачи.

Для иллюстрации предлагаемого подхода рассмотрим следующую оптимизационную задачу.

Пусть объектом управления является организационно-технологический комплекс, в состав которого входит N пооперационно специализированных участков и обрабатывающих центров. В соответствии с пооперационной специализацией и технологией изготовления деталей и сборочных единиц между участками и обрабатывающими центрами существуют взаимосвязи через потоки деталей и общие ресурсы (материалы, энергетические ресурсы, людские ресурсы, финансовые и др.). Общей целью функционирования организационно-технологического комплекса является минимизация затрат на производство или максимизация прибыли при заданных расходах ресурсов и при заданном качестве выпускаемой продукции. Формально это можно выразить следующим образом.

Задача 1:

$$\min_{u_1, \dots, u_N} \sum_{i=1}^N f_i(x_i, u_i); \quad (1)$$

$$x_i = \sum_{j=1}^N k_{ij} G_j(x_j, u_j); \quad (2)$$

$$y_i = Y_i(x_i, u_i); \quad (3)$$

$$R_i(x_i, u_i) \geq 0; \quad i = 1, \dots, N; \quad (4)$$

где организационно-технологический объект управления в своем составе имеет N взаимосвязанных технологических участков и обрабатывающих центров;

x_i — входы i -го участка или обрабатывающего центра, связанные с выходами других структурных единиц;

y_i — выход i -го участка или обрабатывающего центра;

u_i — управляющий вход i -го участка или обрабатывающего центра;

R_i, Y_i — определяют связывающие ограничения на входные и управляющие воздействия i -го участка или обрабатывающего центра;

G_j — определяет структуру взаимосвязей i -го участка или обрабатывающего центра с j -м;

k_{ij} — коэффициенты взаимосвязи i -го и j -го участка или обрабатывающего центра;

f_i — критерий эффективности функционирования i -го участка или обрабатывающего центра.

Отметим, что в заданном соотношениями (1)—(4) виде оптимизационная задача не может быть декомпозирована на N независимых подзадач вследствие наличия технологических взаимосвязей (2) между участками и обрабатывающими центрами, а также связующих ограничений на способы функционирования, выраженные соотношениями (3), (4).

Прежде всего, для ослабления структурных связей (2) воспользуемся методом замены переменных. Тогда задача 1 может быть преобразована к виду:

Задача 2:

$$\min_{u_1, \dots, u_N} \sum_{i=1}^N f_i(x_i, u_i); \quad (5)$$

$$x_i = \sum_{j=1}^N k_{ij} z_j; \quad (6)$$

$$z_i = G_i(x_i, u_i); \quad (7)$$

$$y_i = Y_i(x_i, u_i); \quad (8)$$

$$R_i(x_i, u_i) \geq 0; \quad i=1, \dots, N. \quad (9)$$

Связывающие ограничения (6) можно убрать, используя метод множителей Лагранжа, включив их в критериальную функцию.

Задача 3:

$$\max_{\lambda_1, \dots, \lambda_N} \min_{u_1, \dots, u_N} \sum_{i=1}^N f_i(x_i, u_i) + \lambda_i^T \left[\sum_{j=1}^N k_{ij} z_j - x_i \right]; \quad (10)$$

$$z_i = G_i(x_i, u_i); \quad (11)$$

$$y_i = Y_i(x_i, u_i); \quad (12)$$

$$R_i(x_i, u_i) \geq 0; \quad i=1, \dots, N. \quad (13)$$

Следует отметить, что хотя предпринятые изменения задачи и сняли связующие ограничения (6), тем не менее задачу 3 нельзя разделить на ряд независимых подзадач из-за связующих переменных $\lambda_1, \dots, \lambda_N$. Для решения этой проблемы воспользуемся методом параметрической декомпозиции,

выбрав в качестве параметров множители Лагранжа. При этом задача 3 преобразуется в две взаимосвязанные подзадачи вида:

Подзадача ПЗ4:

$$\max_{\lambda_1, \dots, \lambda_N} \sum_{i=1}^N L_i(x_i^*, u_i^*, z_i^*, \lambda); \quad (14)$$

Подзадача ПЗ5:

$$\min_{u_i, \dots, u_N} \sum_{i=1}^N L_i(x_i, u_i, z_i, \lambda^*); \quad (15)$$

при условии

$$z_i = G_i(x_i, u_i); \quad (16)$$

$$y_i = Y_i(x_i, u_i); \quad (17)$$

$$R_i(x_i, u_i) \geq 0; \quad i=1, \dots, N, \quad (18)$$

где $L_i(x_i, u_i, z_i; \lambda) = f_i(x_i, u_i) + \sum_{j=1}^N \lambda_j^T k_{ji} z_i - \lambda_i^T x_i$,

x_i^* , u_i^* , z_i^* — решение подзадачи ПЗ5, а λ^* — решение подзадачи ПЗ4.

Полученные в результате параметрической декомпозиции оптимизационные подзадачи (14), (15) должны решаться совместно. Подзадача ПЗ4 является оптимизационной задачей без ограничений, а подзадача ПЗ5 может быть представлена в виде N не связанных локальных оптимизационных подзадач с разделенными критериальными функциями и ограничениями.

Подзадача ПЗ5(i):

$$\min_{u_i} L_i(x_i, u_i, z_i, \lambda^*), \quad (19)$$

при ограничениях

$$z_i = G_i(x_i, u_i); \quad (20)$$

$$y_i = Y_i(x_i, u_i); \quad (21)$$

$$R_i(x_i, u_i) \geq 0. \quad (22)$$

Локальные оптимизационные подзадачи ПЗ5(i) пониженной размерности могут быть решены с применением методов линейного или нелинейного программирования в зависимости от формы выражений (19)—(22).

Ни один из рассмотренных методов декомпозиции не дает структур, которые обеспечивали бы один из важных признаков иерархии — односто-

ронную подчиненность решаемых подзадач. Подзадачи, полученные методом разделения, являются независимыми и не требуют вмешательства координатора, т.е. не требуют иерархии в организации их совместного решения. Подзадачи, полученные в результате применения параметрической и структурной декомпозиции, являются взаимозависимыми друг от друга и не имеют приоритета влияния. Поэтому для получения иерархии подзадач необходимо преобразовать двустороннюю зависимость в одностороннюю или, по крайней мере, значительно ослабить одну из них. Рассмотрим один из возможных подходов к построению таких зависимостей на основе декомпозиции, полученной методом параметризации.

В результате применения метода параметрической декомпозиции глобальная оптимизационная задача разделяется на две взаимосвязанные подзадачи *ПЗ1* и *ПЗ2*. Результатом решения *ПЗ1* является оптимальное значение $x_2^*(x_1)$ при $x_1=x_1^*$, а результатом решения *ПЗ2* — x_1^* при $x_2=x_2^*(x_1)$. Условно это можно показать в виде следующей схемы (рис. 1).

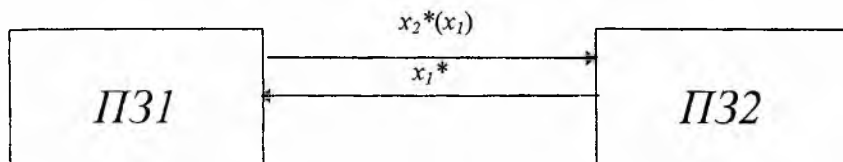


Рис. 1

Для обеспечения приоритета влияния *ПЗ2* относительно *ПЗ1* необходимо избавиться от взаимосвязи $x_2^*(x_1)$ или хотя бы ослабить эту взаимосвязь. Предположим, что имеется возможность сформировать модифицированную подзадачу *ПЗ2₀*, которая имеет всю информацию для получения решения x_1^* , и эта информация не противоречит *ПЗ1*. В этом случае подзадача *ПЗ2₀* станет независимой от *ПЗ1* и будет иметь приоритетное влияние на нее (см. рис. 2.).

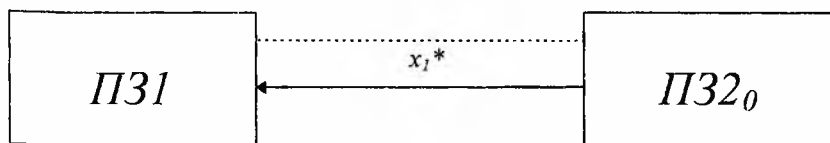


Рис. 2

В показанной структуре $ПЗ2_0$ сможет определить x_1^* без обратной связи с $ПЗ1$ только в случае, если она будет содержать в себе часть подзадачи $ПЗ2$ и часть $ПЗ1$. Для обоснования этого положим, что $ПЗ1$ может быть разделена на две идентичные подзадачи $ПЗ1.1$ и $ПЗ1.2$ (рис. 3). При этом $ПЗ1.1$ обеспечивает информацией ($x_2^*(x_1)$) $ПЗ2$, необходимой для ее решения, а $ПЗ1.2$ обеспечивает нахождение оптимального значения x_2 соответствующего оптимальному значению x_1 , т.е. определенис ($x_2^*(x_1^*)$). Если при этом объединить $ПЗ2$ и $ПЗ1.1$, то получившаяся подзадача $ПЗ2_0$ была бы независимой от $ПЗ1.2$ и имела бы приоритет воздействия на нее. Поэтому подзадачи $ПЗ2_0$ и $ПЗ1.2$ образуют иерархию. Однако эта иерархия в связи с идентичностью подзадач $ПЗ1.1$ и $ПЗ1.2$ не имеет практического значения, ибо решение глобальной оптимизационной задачи было бы получено при решении только подзадачи $ПЗ1_0$. Поэтому для того, чтобы иерархия имела практический смысл, подзадачи $ПЗ1.1$ и $ПЗ1.2$ не должны быть идентичны т.е. функции этих подзадач должны иметь значительное различие. Это может быть достигнуто на практике соответствующим подбором параметра x_1 при первоначальной декомпозиции глобальной задачи на подзадачи $ПЗ1$ и $ПЗ2$. Например, при параметризации глобальной задачи можно разделить ее таким образом, чтобы к подзадаче $ПЗ1$ отнести быстро изменяющиеся переменные, а к подзадаче $ПЗ2$ — медленно изменяющиеся переменные. Тогда появится возможность в $ПЗ1.2$ не учитывать медленно изменяющиеся процессы, а в $ПЗ1.1$ не учитывать быстро изменяющиеся процессы, что обеспечит их различие.

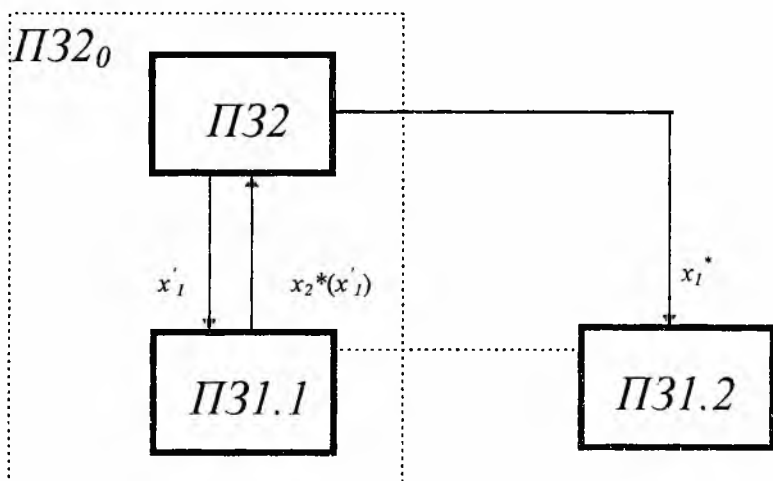


Рис. 3

Следует отметить, что подзадачи, показанные на рис. 3, образуют иерархию даже тогда, когда они не объединены в подзадачу *П32₀*. В этом случае они образуют пару подзадач (*П32*, *П31.1*), которая имеет приоритет влияния на *П31.2*. На практике это бывает удобным в человеко-машинных системах, когда подзадачу *П32* решает человек, а подзадачу *П31.1* решает компьютер (например, уставки регулирования для данного режима функционирования технологического объекта задаются оператором-технологом, а задачу цифрового управления решает ЭВМ). При этом, период вмешательства в процесс управления оператора значительно больше, чем принятая дискретизация в методах непосредственного цифрового управления.

Список литературы: 1. Волик Б.Г., Буянов Б.Б., Лубков Н.В. и др. Методы анализа и синтеза структур управляющих систем / Под ред. Б.Г. Волика. М.: Энергоатомиздат, 1988. 296 с. 2. Васильев В.И., Гусев Ю.М., Ефанов В.Н. и др. Многоуровневое управление динамическими объектами. М.: Наука, 1987. 309 с. 3. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с. 4. Макаров А.А. Методы и модели согласования иерархических решений. Новосибирск: Наука: Сиб.отд-ние, 1979. 240 с. 5. Козуб В.М. Иерархические системы моделей планирования. М.: Радио и связь, 1984. 176 с. 6. Лэддон Л. Оптимизация больших систем. М.: Наука, 1975. 532 с. 7. Чернышев М.К., Гаджиев М.Ю. Математическое моделирование иерархических систем с приложением к биологии и экономике. М.: Наука, 1983. 192 с.

Поступила в редколлегию 20.10.97

Н. В. КРИВИЧ, С. А. МАРЬИН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТНОШЕНИЙ С ПАРАМЕТРАМИ В МЕТАСЕМАНТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

В настоящее время модели представления знаний используются скорее как средство для борьбы со сложностью управления и контроля над некоторой предметной областью, чем как простой контейнер для хранения экспертных знаний. Отсюда становится очевидной необходимость развития уже известных и широко применяемых при построении экспертных систем методов с целью адаптировать их к возросшим требованиям [1]. В этой связи, чрезвычайно актуальной до сих пор остается проблема представления знаний в интеллектуальных системах. Данная работа посвящена проблеме моделирования процесса принятия решений в сложных динамических предметных областях, знания о которых представляются в виде многоуровневых систем метапродукций, дополненных отношениями с параметрами. Основные принципы и идеи формирования многоуровневых моделей рассматриваются в [2, 3, 4]. Данная работа является продолжением исследований по теории и приложениям продукционных моделей к различным задачам представления и использования знаний. Использование метасемантического подхода позволяет моделировать объекты со сложной динамикой поведения. Однако при моделировании таких объектов возникает проблема описания как декларативно заданных свойств, так и свойств характеризуемых числовыми значениями, которые, в общем случае, не остаются постоянными, а динамично изменяются при развитии системы.

На данный момент наиболее полно подобные системы можно было бы описать при помощи модели “сущность-связь” (“Entity-Relation Model”) предложенной П. Ченом [5]. В этой модели предметная область представляется в виде сущностей, связей и атрибутов. Атрибут является свойством сущности и может быть как числовым так и символьным. Однако такая модель не позволяет изменять значение атрибутов при выводе на этих знаниях.

Остановимся более подробно на понятии “отношения с параметром”. Подобное отношение представляет собой некоторый тип отношений, которые имеют различие лишь в числовой характеристике самого отношения. т. е., по определению, отношение с параметром определяет множество отношений, описывающих одно и то же взаимодействие при различных значениях характеристик этого взаимодействия.

В процессе формирования предикатов и вывода на продукциях отношение с параметром ведет себя так же как и любое другое отношение. При этом при построении предиката, мы не обращаем внимания на значение числовой характеристики отношения, считая предикат одним и тем же при любом ее значении. Предикат, задающий отношение с параметрами, имеет следующий вид:

$$P_l = P(A_i, L_k(X), A_j), \quad (1)$$

где — $l \in \{1, \dots, N\}$, N — количество предикатов;

A_i, A_j — объекты ($i, j \in \{1, \dots, M\}$, M — количество объектов);

L_k — отношение ($k \in \{1, \dots, K\}$, K — количество отношений);

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ — множество всех существующих параметров x_i , общее для всех отношений. Другими словами, каждое отношение имеет в качестве параметров все множество X , при этом, если отношение не зависит от какого либо параметра из данного множества, то значение этого параметра равно nil. Таким образом, отношение без параметров является частным случаем отношения с параметром, у которого все параметры nil. Параметры предиката P_l будем записывать в виде: (x_1, x_2, \dots, x_n) .

Значение числовой характеристики может влиять на процессы “рождения” и “смерти” отношений, как и сам факт “рождения” или “смерти” отношения может вызывать изменение в значениях числовых характеристик других отношений. Поэтому кроме правил (продукций) “рождения” и “смерти” отношений необходимо ввести, во-первых, правила “преобразования”, вызывающие изменение значения параметра отношения, задаваемого предикатом в заключительной части. Правила такого типа записываются следующим образом:

$$R_j: IF (S_i) THEN \tilde{P}_k, \quad (2)$$

где индекс i при S обозначает номер состояния в ходе вывода, исходное состояние имеет индекс 0.

И, во-вторых, ввести правила, в условной части которых может находиться условие на значение некоторого подмножества множества параметров X для некоторых предикатов. Например, если правило выполняется при условии, что значения параметров x_1 и x_2 предиката P_2 равны значениям параметров x_1 и x_2 предиката P_5 и в данный момент не существует отношения, задаваемого предикатом P_8 , то правило имеет следующий вид:

$$R_j : IF [(x_1, x_2)_2 = (x_1, x_2)_5] \wedge \bar{P}_8) THEN P_8 .$$

Каждому предикату отношения с параметром в соответствие ставится набор функций, по которым изменяется этот параметр. Множество этих функций можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} X_i &= F(X_{i-1}, p), \\ p &\subset \{P\}, F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\} \end{aligned} \quad (3)$$

где X_i, X_{i-1} — множества значений параметров на i и на $i-1$ шагах вывода; $\{P\}$ — множество предикатов.

В общем случае в динамике развития сложных объектов правила их поведения не остаются постоянными во времени. В любой момент времени правила описываются некоторым состоянием более высокого уровня. “Рождение” или “смерть” отношения на этом уровне равноценно появлению новых и исчезновению некоторых действующих правил. Определим “правило с параметрами” как такое правило, в консеквенте которого находится предикат отношения с параметром; параметрами правила являются функции, задающие правила изменения параметров отношения. Подобно тому как правила поведения объектов не постоянны во времени, правила изменения параметров также могут изменяться во времени. Следовательно, необходимо дополнить метасемантическую модель механизмом, определяющим эти изменения. Каждому правилу с параметрами ставится в соответствие набор функций, определяющих изменение параметров этого правила, а следовательно, — функций, задающих правила изменения параметров отношения.

Для любого уровня n метасемантической модели существуют метаправила с параметрами, у которых в качестве параметров выступают функции изменения параметров правил более низкого уровня. В этом случае метаправила имеют вид

$$R_j^{(n)} : IF (S_i^{(n)}) THEN \tilde{R}_k^{(n-1)} \quad (4)$$

Следовательно, параметры метаправила n -го уровня представимы в виде

$$x_i^{(n)} \stackrel{def}{=} f^{(n-1)}(x^{(n-1)}, r^{(n-1)}), \quad (5)$$

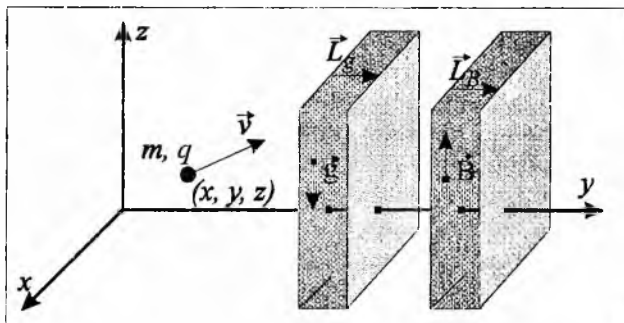
где $r^{(n-1)} \subset \{R^{(n-1)}\}$.

По аналогии с нулевым уровнем каждому метаправилу с параметрами ставится в соответствие набор функций, определяющих изменение параметра, а именно:

$$\begin{aligned} X^{(n)} &= F^{(n)}(X^{(n)}, r^{(n)}), \\ r^{(n)} &\subset \{R^{(n)}\}, F^{(n)} = \{f_1^{(n)}, f_2^{(n)}, \dots, f_m^{(n)}\} \end{aligned} \quad (6)$$

В заключение рассмотрим пример применения метасемантической модели, дополненной отношениями с параметрами для моделирования физической задачи. Рассмотрим движение заряженной частицы, обладающей массой m и зарядом q (см. рисунок). Полагаем три возможных случая: свободное движение, движение в гравитационном (\vec{g}) и в магнитном полях (\vec{B}) (поля не пересекаются). В каждом случае движение частицы описывается различными законами движения.

Смоделировав данную задачу, мы получаем наборы из объектов, отношений и их параметров; наборы продукций первого уровня и метапродукции, которые регулируют изменение законов движения частицы при изменении внешних условий. В процессе вывода на полученных продукциях, используя физические законы движения частицы при различных внешних условиях, мы можем решить задачу об определении координат и скорости частицы в любой момент времени.



Таким образом, введение отношений с параметрами в метасемантическую модель представления знаний не нарушило ее целостности, однотипности представления данных и знаний на всех уровнях и универсальности, что значительно расширило круг проблем, для описания которых удобно применять именно метасемантическую модель. В частности расширение метасемантической модели механизмом работы с параметром позволяет

моделировать объекты со сложной динамикой поведения, имеющие числовые характеристики, которые, в свою очередь, могут изменяться во времени по сложным законам.

Список литературы. 1. *Hautamaki, A.* (1992). A Conceptual Space Approach to Semantic Networks. In Lehman J. (Ed.) *Computers & Mathematics with Applications*. Vol. 23, No. 6-9. P. 517-525. Pergamon Press. 2. *Марьин С. А.* Многоуровневые адаптивные стратегии вывода в медицинских экспертных системах // *Материалы науч.-техн. конференции MicroCAD'97*. Харьков, 1997. P. 319—323. 3. *Mariyn S., Stephan A., Terziyan V.* A Multilevel Models With Flexible Level Management // *Prog. 42 International Symposium Informatics and Automation in age of the Information Society*. Immenau, Germany. 4. *Huebenthal F., Mariyn S., Vyazelenko S.* Model of multilevel metarules over semantic network in medicine // *Prog. of International Meeting on Informateon Technology*. Ukraine (Kharkov). 1997. P. 363—366. 5. *Chen, P.* P-S. (1988). The Entity-Relation Model: Towards a unified view of data. In J. Mylopoulos & M. Brodie (Eds.) *Readings in Artificial Intelligence and Databases*. P. 98-111. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publ., Inc.

Поступила в редколлегию 24.10.97

УДК 519.7

В.А. МУСИЙЧЕНКО

МЕТОД СТИМУЛИРОВАНИЯ ПРОДУКТИВНОГО МЫШЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ АССОЦИАЦИЙ В МЕДИЦИНЕ

Разработка и эксплуатация медицинских экспертных систем (ЭС) сопровождается рядом трудностей: неразрешимостью проблемы извлечения и адекватного представления экспертных знаний, узостью охватываемых знаний, а также предназначенностью ЭС для замены интеллекта эксперта, т.е. для усиления возможностей неэкспертного персонала. Системы, усиливающие интеллектуальные возможности экспертов, отсутствуют.

Последняя проблема отчасти преодолевается в системах поддержки принятия решений (СППР), где лицом, принимающим решение, становится эксперт. Это также позволяет частично решить вопрос извлечения и представления знаний так как в такой системе база знаний (БЗ) оказывается распределенной между экспертом и системой.

Качественно новой концепцией инженерии знаний является использование механизмов стимулирования продуктивного мышления активного оператора интеллектуальной системы, предложенной и проанализированной в работах Swanson D.R. [1], Kaas A.[2]. Как дальнейшее развитие этой концепции в данной работе предлагается метод активизации поиска вариантов решений, основанный на использовании нечетких ассоциаций, генерируемых интеллектуальной системой. Метод направлен на выработку оператором оптимальных решений в медицинских системах распознавания образов. Критериями эффективности метода являются качественные показатели: глубина, обоснованность, новизна принимаемого решения, а также скорость его принятия. Оценка качественных показателей проводится экспертным путем.

Реализация метода осуществляется на основе антропоцентрической интеллектуальной системы, включающей экспертную и информационно-поисковую системы. Их объединение при условии взаимодействия даёт большую отдачу, чем сумма отдельно взятых систем.

Подключение третьей составляющей — человека — приводит к качественно изменению и повышению эффективности в задачах, где на определённых этапах именно человеческое мышление незаменимо. Антропоцентрический подход, принцип активного оператора занял ведущее место в инженерной психологии.

Использование метода нечетких ассоциаций (МНА) в СППР способствует росту интеллекта человеко-машинного комплекса. Человек в этом комплексе — активный оператор, эксперт (в отличие от ЭС). В отличие от СППР механизм нечетких ассоциаций способствует выработке решения не на стадии выбора одного из его вариантов, а на стадии генерирования этих вариантов (альтернатив, идей). В отличие от гипертекстовых систем, где устанавливается жесткая связь между объектами информации (либо объекты связаны, либо нет), механизм нечетких ассоциаций устанавливает гибкую, нечеткую связь, что позволяет включить в рассмотрение оператора большее количество таких объектов, создать насыщенную информационную среду. Решение, учитывающее большее число условий, более обосновано. Упорядочение объектов информации по релевантности решаемой задаче создает градиент информационной среды, способствующий ускорению принятия решения.

Суть метода сводится к следующему: в ответ на введенные симптомы заболевания, жалобы, предполагаемые диагнозы, система, использующая МНА, выводит перечень информационных объектов — терминов, ссылок, изображений — в порядке убывания релевантности перечню симптомов. Система функционирует на основе предварительно созданной матрицы ассоциируемости терминов (МАТ).

Основные этапы работы медицинской интеллектуальной системы, использующей метод нечетких ассоциаций, представлены на рисунке.



0 — Пациент — источник информации для каждой из трёх составляющих человеко-машинного комплекса: ответы на вопросы ЭС поступают в виде перечня симптомов активному оператору, а также на вход ЭС и информационно-поисковой системы (ИПС). Активный оператор, кроме того, получает невербальную информацию, вступает в личный контакт. Возможна установка промежуточного модуля со следующей структурой: дополнительная ИПС принимает лингвистическую информацию от врача в виде од-

ного ключевого слова, описывающего симптом. Например, "температура", "кашель". В ответ на введенное слово осуществляется поиск вопросов в БЗ ЭС, имеющих в своем индексе данное слово. ИПС должна иметь словарь синонимов для обработки слов, не входящих в словарь индексирующих терминов.

1 — Функция ЭС : принять ответы на вопросы и выдать список диагнозов.

ЭС допускает включение нескольких БЗ от разных экспертов. Качественный состав (вопросы и диагнозы) одинаков для всех БЗ. Отличаются лишь цифровые (лингвистические) оценки условных вероятностей, которые задаются числом $P \in [0;1]$.

Механизм вывода основан на теореме Байеса.

Возможно задание вероятности интервалом, не выходящим за вышеуказанные границы. В этом случае алгоритм диагностики усложняется добавлением максиминной композиции (свертки) для обработки нечеткостей и интервальных значений [3, с.60]:

$$D' = S' \circ R(D \rightarrow S)$$

Переход к интервальным значениям есть переход к нечетким множествам второго рода, которые близки к нечеткостям человеческих суждений.

В диалоговом режиме последовательность вопросов определяется потенциальной информационной емкостью ответов [4].

Перечни диагнозов по каждой БЗ объединяются по правилам объединения свидетельств Демпстера-Шафера [5] с использованием несуммируемых мер веры и правдоподобия [3].

2 — Функция конечной ИПС в создании насыщенной и направленной на решение информационной среды.

Основным элементом этой системы является матрица ассоциируемости терминов, вычисляемая по методу Ф.Деннис [7] на основе экспертных оценок. Матрица готовится предварительно, что заключается в обращении экспертной матрицы. Для этих целей используется отдельный программный модуль получения обратной матрицы по методу Гаусса. При этом методе количество вычислений растет в квадратичной зависимости от числа неизвестных.

При вычислении релевантности библиографической информации применяется фактор предыдущего использования [8].

Для обработки нечеткой информации, поступившей на вход системы, применяется метод нечеткой многоатрибутной оценки [3].

Конвертирование нечетких значений релевантности информационных объектов в лингвистические переменные проводится согласно [6].

3 — Перечень диагнозов с интервальными вероятностями или лингвистическими оценками и перечень релевантных информационных объектов (библиография, терминология) предоставляется пользователю для выработки обоснованного решения.

Пользователю доступен механизм проверки гипотез, при котором в ответ на ввод названия предполагаемой болезни, имеющейся в базе знаний, выдается перечень вопросов в порядке убывания их информативности для данной болезни с наиболее типичными ответами на них. Информативность вычисляется согласно [4].

2-й и 3-й этапы реализуют метод нечетких ассоциаций в выработке решения.

Существующие методы активизации поиска не ориентированы на применение программных средств. В медицине основным средством стимулирования мышления врача при постановке диагноза является проведение консилиума — эффективного способа коллективного взаимодействия, подобного брейнстормингу. Применение программных средств позволяет использовать другие методы воздействия на мышление врача. Один из них — МНА, являющийся реализацией антропоцентрического подхода в проектировании медицинских интеллектуальных систем.

Список литературы: 1. Roy Davies "The creation of new knowledge by information retrieval and classification" // *Journal of Documentation*, Vol.45. No.4. December 1989, P. 273—301. 2. *Question and information system*/edited by Thomas W.Lauer, Eileen Peacock, Arthur C.Graesser. USA: Lawrence Erlbaum Associates, 1992. 374 p. 3. *Прикладные нечёткие системы: Пер.с япон.* / К.Асаи, Д.Ватада, С. Иваи и др.; под ред. Т.Тэрано, К.Асаи, М.Сугэно. М.: Мир, 1993. 368 с. 4. Мусийченко В.А., Мустецов Н.П. Определение приоритетных диагностических показателей в медицине. Проблемы физической и биомедицинской электроники // Сб. докладов междунар. науч.-техн. конференции 18—20 мая 1995 года. Киев.: КПИ, 1995. С.182—184. 5. Cortes-Rello E., Golshani F. Uncertain reasoning using the Dempster-Shafer method: an application in forecasting and marketing management, *Expert Systems*, February 1990. Vol.7. No.1. P. 9—17. 6. Мусийченко В.А., Мустецов Н.П. Информационная и количественная мера лингвистической переменной // 2-я Международная конференция "Теория и техника передачи, приёма и обработки информации": Тез. докл./ХТУРЭ, Харьков-Туапсе, 1996. 228 с. 7. *Информационный поиск* // Сб. материалов: Сокр.пер. с англ. под ред. К.Н. Трофимова М.: Восн. изд-во Министерства обороны СССР, 1970. 320 с. 8. *Architectures for intelligence/the Twenty-second Carnegie Symposium on Cognition*: edited by Kurt VanLehn. USA: Lawrence Erlbaum Associates, Inc. 1991.

Поступила в редколлегию 30.10.97

УДК 519.81; 504.05:62/69

О. А. НЕСТЕРЕНКО

ОПЫТ СОЗДАНИЯ ПРОТОТИПА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ

Основная причина неуклонно возрастающего уровня загрязнения окружающей среды заключается в существующем противоречии между постоянным ростом производства во всех областях хозяйства и медленным внедрением новых прогрессивных технологий. Сравнительно новая научная дисциплина, промышленная экология, изучает взаимодействие общества с природной средой в процессе общественного производства. Специалисты в этой области считают, что правильно организованная деятельность промышленного предприятия, в том числе успешно выбранное и внедренное очистное сооружение или природоохранное мероприятие, позволит решить проблему гармонического взаимодействия промышленности и природы. В этом направлении является эффективным использование интеллектуальной технологии экспертной оценки и поддержки принятия решений с целью ее применения при разработке систем прогнозирования критических ситуаций, уменьшения затрат, связанных с ликвидацией их последствий. Проведенный анализ существующих в современном обществе условий, требующих решения новых сложных проблем управления техническими системами при дефиците времени, специалистов и повышении ответственности руководителей за принятие эффективных решений, свидетельствует о необходимости создания соответствующих методов и интеллектуальных средств. Для создания средств помощи руководителям различных уровней и решения современных проблем управления необходима проработка следующих вопросов:

- системный анализ и концептуальное моделирование ситуаций и проблемных областей;
- решение неформализованных задач в слабоформализованных проблемных областях;
- разносторонняя обработка, анализ и классификация больших объемов разноплановой информации;
- учет объективных текстологических знаний и субъективных предпочтений лица, принимающего решение (ЛПР).

Руководители, принимающие решения в области промышленной экологии, сталкиваются со сложным выбором: необходимостью учета множе-

ства разнородных факторов, с рассмотрением сотен альтернативных вариантов, для оценки которых необходимы знания многих специалистов. Здесь, естественно, возникает вопрос о применении для решения таких проблем экспертных систем (ЭС), так как, если проблема может быть полностью структурирована и есть возможность получить алгоритм ее решения, поддержка решения не нужна. Но проблемная область, связанная с экологией, является слабоструктурированной, как и большинство естественно образовавшихся областей. Проблема выбора природоохранных мероприятий обладает некоторой неопределенностью относительно состава элементов, необходимых для успешного решения, и связей между ними. Именно для решения таких проблем, обладающих некоторой структурой, но требующих суждений и предпочтений человека, наиболее эффективно создание систем поддержки принятия решений (СППР) [1]. СППР является мощным средством решения такого рода проблем, однако такие системы только помогают пользователю принять решения, но не могут заменить творчески мыслящего руководителя. Конечно, СППР позволит всесторонне проанализировать предложенные варианты и найти наилучшее или допустимое решение, учитывая предпочтения и возможности лица, принимающего решение. Но вот вопросы применения СППР на этапе предварительного анализа и структуризации проблемы одного из принципиально важных этапов подготовки и принятия решений, наименее разработаны. В направлении повышения качества и сокращения времени принятия решений при управлении промышленными комплексами и системами возникло новое научное направление — интеллектуальные СППР.

Важность эффективной структуризации и эффективного анализа проблемной области отмечается в работах по созданию любых интеллектуальных систем [2]. Было обнаружено, что использование на начальных этапах разработки таких систем принципов системного анализа, в частности целевого принципа, позволяет значительно сократить время выполнения этих этапов. Согласно [3], сущность целевого принципа заключается в том, что анализ любого процесса принятия решения должен начинаться с выявления и четкой формулировки целей. Под целью предлагается понимать желаемый результат деятельности, желаемое состояние объекта управления. При разработке системы цель определялась одним из наиболее распространенных способов: на основе рассмотрения системы более высокого уровня. Объектом исследования в промышленной экологии являются системы, образовавшиеся в результате взаимодействия конкретного производства с окружающей его природной средой. Именно такая система и является системой более высокого уровня по отношению к промышленному предприятию, а согласно задачам промышленной экологии генеральной целью при управлении такими системами является достижение гармониче-

ского взаимодействия промышленного предприятия и окружающей его природной среды. Исходя из генеральной цели системы высшего уровня можно выделить цель разрабатываемой системы: это уменьшение отрицательного влияния промышленного предприятия на природную среду путем помощи руководителю в процессе выбора для внедрения природоохранного мероприятия.

Большую степень упрощения описания такого сложного объекта, как промышленное предприятие, позволяет достигнуть также применение принципа иерархичности [3], который предполагает существование естественной иерархической структуры сложного объекта, которая вскрывается путем декомпозиции этого объекта. Декомпозиция промышленного предприятия на цеха (или производственные процессы), а далее на производственные агрегаты, которые собственно и образуют на своем выходе вредные промышленные отходы, является наиболее плодотворной. Подобная декомпозиция сложного объекта позволила получить также путем декомпозиции целей следующее дерево целей:

- уменьшение отрицательного влияния всего комплекса выбросов промышленного предприятия на состояние природной среды;
- уменьшение влияния комплекса выбросов отдельного цеха;
- уменьшение влияния комплекса выбросов отдельно взятого агрегата;
- уменьшение вредного влияния отдельно взятого выброса конкретного агрегата на состояние окружающей среды.

Выявленное дерево целей позволило определить необходимый подход к построению СППР. Был применен подход, который и по мнению Петровского [1], является наиболее приемлемым при построении систем класса СППР, — это прототипирование систем. Декомпозиция целей при таком подходе сыграла свою положительную роль. Прототип СППР создавался для самого нижнего уровня дерева целей. Пути наращивания возможностей системы в процессе прототипирования при таком подходе очевидны — это движение вверх по иерархии дерева целей. Таким образом, ближайший уровень прототипа — реализация в системе возможности подбора очистных устройств для очистки всего комплекса выбросов отдельно взятого агрегата. Созданный прототип СППР в области промышленной экологии поддерживает выполнение следующих функций:

- приобретение и предоставление экспертной информации о текущем состоянии окружающей среды, составе и характеристиках выбросов, структурных особенностях промышленного предприятия, основных характеристиках очистных сооружений;

- анализ взаимосвязи промышленного объекта с окружающей средой и предоставление экспертных выводов о необходимости применения очистных устройств;
- подбор в зависимости от специфики производственного процесса и ряда других факторов соответствующих природоохранных мероприятий;
- многокритериальная оценка качества вариантов решения;
- предоставление аналитической помощи ЛПР в процессе выбора наиболее оптимального с его точки зрения природоохранного мероприятия.

При разработке СППР в направлении их сближения с экспертными системами существует острая необходимость перенести некоторые из концепций ЭС в сферу СППР. Одна из таких концепций — реализация возможности приобретения системой знаний, что ставит систему на ступень выше тех СППР, в которых не предусмотрено формирование описания проблемы средствами самой системы. Эффективная эксплуатация такой интеллектуальной СППР в немалой степени зависит от мощности разработанной базы знаний, в основу которой должна быть положена концептуальная модель проблемной области. Когда задача изначально не структурирована, как в случае с областью промышленной экологии, ее структура должна быть выявлена в таком виде, чтобы она была понятна ЛПР во взаимосвязи ее основных элементов. Особые трудности здесь возникают, прежде всего, из-за того, что анализ проблемы представляет собой творческий процесс, плохо поддающийся формализации. Поэтому особенно необходимо в практике разработки баз знаний для СППР использование новых, системологических когнитивных методов концептуального моделирования неформализованных проблемных областей: методов, которые уже нашли свое эффективное применение в разработках ЭС. В процессе работы над системой был проведен концептуальный анализ проблемной области и определены основные компоненты, необходимые при выборе природоохранных мероприятий. Таким образом, база знаний прототипа содержит следующую информацию:

- описание иерархии промышленного предприятия в виде структуры типа: предприятие — производственный процесс (цех) — промышленный агрегат (устройство);
- описание текущего состояния окружающей среды, включающее информацию об основных сферах: гидросфера (водные объекты, в которые предприятие сбрасывает сточные воды); атмосфера (воздушный бассейн над территорией предприятия); литосфера (земельные площади, служащие местом хранения твердых отходов);

- описание состава выбросов загрязняющих агрегатов, включающее список вредных веществ со следующими их характеристиками: сравнительная степень опасности загрязнителя, масштаб его распространения, возможность его переноса и стойкость, предельно допустимая концентрация и интенсивность его выброса;
- описание очистных устройств и природоохранных мероприятий с учетом следующих их характеристик: тип работы устройства, производительность, область применения (перечень очищаемых загрязнителей и степень их очистки), экономические и технологические характеристики устройства.

В ходе анализа проблемной области было обнаружено, что не существует какой-либо надежной количественной модели (другими словами, объективной модели), связывающей те критерии, которые необходимо учитывать в процессе выбора. Было определено, что здесь наиболее успешно может использоваться субъективная модель принятия решений, которая поможет установить эти связи, исходя из некоторой субъективной информации, а именно: предпочтений самого пользователя. Для реализации таких возможностей был выбран диалоговый метод замкнутых процедур у опорных ситуаций (ЗАПРОС) построения квазипорядка на множестве многокритериальных альтернатив [4], который удовлетворяет всем требованиям корректного и научно-обоснованного метода для решения, так называемых, проблем уникального выбора, к которым относится проблема выбора очистного устройства. Ведь именно здесь проявляется уникальность и неповторимость ситуации выбора, наличие совокупности разнородных факторов, которые следует принимать во внимание, сложный для оценки характер рассматриваемых альтернатив.

В этом случае пользователь не имеет целостного представления о варианте решения. СППР должна помочь ЛПР определить состав параметров (критериев), характеризующих его отношение к рассматриваемой проблеме. С этой целью в системе посредством реализации базы моделей (БМ) предусмотрена оценка качества альтернатив природоохранных мероприятий по экономическим, эксплуатационно-технологическим и экологическим критериям. БМ, согласно структуре СППР, предложенной Петровским, должна содержать набор разнообразных моделей, к которым могут привести анализ и структуризация задачи принятия решения. При разработке прототипа в систему была заложена возможность моделировать ситуации выброса в водные объекты загрязнителей определенной концентрации и определять необходимость применения очистных устройств, исходя из установленных предельно допустимых концентраций на данный вид загрязнителя. С этой целью в систему заложена модель распространения вредных

веществ в водных объектах, расположенных на равнинных территориях [5]. Эта модель позволяет учесть фоновую концентрацию вредных веществ в водотоке, способ спуска сточных вод, скорость течения реки и другие характеристики водного объекта. Исходя из необходимости многокритериальной оценки качества очистных устройств в базу моделей прототипа были заложены следующие объективные и субъективные модели:

- объективная модель оценки экологической эффективности природоохранного мероприятия (или модель оценки остаточного ущерба окружающей среде). В основу этой модели была положена система оценки состояния окружающей среды Бателле [6], основанная на проведении комплексного анализа различных сред;
- модель оценки эксплуатационно-технологической эффективности очистного устройства. Она является субъективной моделью и позволяет учитывать предпочтения пользователя по следующим характеристикам: потребность при эксплуатации устройства в обслуживающем персонале, свободных площадях, возможность переноса очистного устройства, надежность, легкость монтажа, легкость в управлении и др.;
- различного рода экономические модели, позволяющие учитывать прямые и косвенные затраты на приобретение очистного устройства, затраты на его установку (монтаж).

Полученные в процессе создания данного прототипа практические и теоретические результаты являются лишь небольшим шагом по пути устранения той реальной угрозы глобального экологического кризиса, перед которым оказалось наше общество на современном этапе развития. Необходимо отметить, что автоматизация экспертной обработки и процесса принятия решений по вопросам устранения критических ситуаций посредством применения ЭС и СППР, основанных на современных интеллектуальных технологиях, может стать одним из направлений в решении экологических проблем общества.

Список литературы: 1. Петровский А. Б., Стернин М. Ю., Морзов В. К. Системы поддержки принятия решений. Препринт. М.: ВНИИСИ, 1987. 42 с. 2. Проектирование банков естественноязыковых знаний / Е. А. Соловьева, М. Ф. Бондаренко, С. И. Маторин, П. Ф. Павлов: Учеб. пособие. / К.: УМК ВО, 1992. 136 с. 3. Полищук Ю. М., Хон В. Б. Теория автоматизированных банков информации: Учеб. пособие для вузов по спец. "Автоматизированные системы обработки информации и упр." М.: Высш. шк., 1989. 184 с. 4. Мошквич Е. М. Диалоговая система ЗАПРОС (построение упорядочения многокритериальных альтернатив на основе предпочтений лица, принимающего решения) // Человеко-машинные процедуры принятия решений. М.: ВНИИСИ. 1988. N 11. С. 13—21. 5. Вторжение в природную среду. Оценка воздействия (основные положения и методы) / Под ред. А. Ю. Ретегема. М.: Прогресс, 1983. 191 с. 6. П. Бертокс, Д. Радд. Стратегия защиты окружающей Среды от загрязнений / Пер. с англ. под ред. Я. Б. Черткова. М.: Мир. 1980. 606 с.

Поступила в редколлегию 05.11.97

А.А. ГОРДЕЕВ, С.А. МАРЬИН, А.В. ТКАЧУК, А.В. ЦЫМБАЛ

ЭВРИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ

Важной задачей распределения ограниченного числа ресурсов между поступающими заявками является выбор такого механизма распределения, при котором используются данные ресурсы с максимальной отдачей. Задача ставится таким образом: пусть имеется набор ресурсов (объектов), каждый из которых обладает набором свойств. В случайные моменты времени поступают заявки на резервирование (использование) набора ресурсов с заданными свойствами в определенный промежуток времени. Временной промежуток заявки на ресурс может начинаться либо с текущего момента времени, либо с определенного момента в будущем. В процессе жизненного цикла системы заявки на резервирование могут создаваться, переноситься во времени, удаляться, изменять требования к ресурсам. Возможны такие ситуации, когда в определенные моменты ресурсы заняты (зарезервированы) таким образом, что невозможно удовлетворить очередную заявку, хотя общая загруженность ресурсов невысока.

Итак, в процессе резервирования система должна выполнить следующие действия:

- определить наличие подмножества свободных в данный промежуток времени ресурсов с заданными свойствами;
- выбрать из этого подмножества нужное число ресурсов;
- попытаться перераспределить уже имеющиеся заявки таким образом, чтобы освободить необходимое число ресурсов, если на данный промежуток времени в системе нет свободных ресурсов.

Типичным примером подобной модели может служить резервирование номеров в гостинице. Обычно резервирование происходит следующим образом: клиент звонит по телефону в гостиницу и спрашивает: “Есть ли у Вас двухместный номер “люкс” с 21 октября на 7 дней, и сколько это будет стоить”? Работник гостиницы должен быстро определить наличие свободных мест и выдать информацию клиенту. Гостиница будет терпеть убытки в случае неоперативного реагирования на заявки клиентов. Таким образом, в этом примере ресурсами являются жилые номера, а свойствами ресурсов — количество комнат в номере, наличие телевизора, мини-бара, факса, уровень престижности.



Рис. 1

На рис. 1 слева изображен список номеров; а сверху — календарь. Таким образом бронь *A* занимает номер 101 с 21.10.97 по 23.10.97. Допустим, поступает заявка на бронирование номера люкс с 21.10.97 по 26.10.97. Задача сводится к поиску номера класса люкс, свободного в эти 7 дней. Как видно на рисунке, в данный момент нет свободного номера в требуемый календарный промежуток. Однако удовлетворить заявку возможно, если переместить бронь *B* из номера 102 в номер 101. В этом случае номер 102 освободится на необходимое время, и заявка может быть выполнена.

Рассмотрим процесс обслуживания заявок в системе. Рассматриваемая система является разновидностью системы массового обслуживания (СМО) с потерями [1,2]. Данный тип СМО характеризуется отсутствием очереди (сразу же после поступления заявку надо либо принять и обработать, либо отказать). Целью работы таких СМО обычно является минимизация потерь. Примером такого типа СМО являются АТС, гостиницы.

СМО с потерями бывают двух видов:

- с немедленной обработкой заявки (городские АТС);
- с заявками, которые необходимо выполнять в определенное время, т.е. заявка здесь — резервирование ресурса на определенное время (АТС с заказными разговорами, гостиницы).

В обоих случаях сразу после поступления заявки необходимо либо принять ее, либо отказать.

В системах второго типа в процессе поступления заявок происходит перераспределение ресурсов между заявками так, чтобы уже принятые заявки были обработаны на одном из подходящих ресурсов, и чтобы потери (необработанные заявки) были минимальными. Рассматриваемая нами система является примером СМО с потерями второго типа.

Мы предлагаем использовать двухуровневую схему обработки заявок:

- обработка заявок при наличии свободных (незарезервированных) ресурсов;
- обработка заявок, конфликтующих с уже зарезервированными ресурсами (оптимизация размещения заявок на ресурсах).

С самого начала работы системы (число поступивших заявок равно нулю) используется первый уровень обработки заявок. Он используется до тех пор, пока очередная поступившая заявка не будет конфликтовать с текущим распределением ресурсов. Для обработки таких заявок применим алгоритм второго уровня, использующий перераспределение ресурсов между заявками с целью удовлетворения поступившей заявки.

На первом уровне обработка происходит по следующему алгоритму:

определение множества свободных в заданный промежуток времени ресурсов с указанными в заявке свойствами;

вычисление определенного функционала "качества" этого ресурса для каждого ресурса из этого множества;

резервирование ресурса с оптимальным показателем качества.

Основной целью этого этапа является обработка максимального числа заявок без привлечения процедуры второго уровня (без оптимизации размещения заявок). Процедура второго уровня является более трудоемкой, чем процедура первого уровня, и может выполняться неограниченное время (время ее выполнения зависит от многих факторов — от числа принятых и перемещаемых заявок, от продолжительности времени выполнения каждой заявки и др.).

Кроме того, на данном этапе могут быть достигнуты и другие цели (например, равномерное использование ресурсов, использование наиболее дешевых ресурсов). Критерии использования ресурсов на этом уровне, а также приоритет каждого из критериев должны отражаться в используемом функционале "качества" ресурсов.

К процедура второго уровня прибегают в случае отсутствия в системе в данный промежуток времени свободных ресурсов и заключается она в попытке перераспределения ресурсов уже принятых заявок с целью освобождения необходимого числа ресурсов. Самый простой путь решения задачи — полный перебор вариантов размещения принятых заявок на подходящих ресурсах. Однако число просматриваемых вариантов в таком случае будет равно

$$N_z^{(r-1)},$$

где N_z — число перераспределяемых заявок, r — число подходящих ресурсов для одной заявки (в случае равного количества подходящих ресурсов).

Мы предлагаем алгоритм, который позволяет получить некоторые отсечения в переборе. Рассмотрим рекурсивный вариант этого алгоритма.

РАЗМЕСТИТЬ (Заявка i)

Найти подмножество ресурсов

$$R_i \subset R,$$

где R — множество всех ресурсов системы, удовлетворяющее требованиям Заявки i . Пусть J — мощность множества

$$R_j: |R_j| = J.$$

Для каждого ресурса

$$r_j \in R_j, j = \overline{1, J},$$

определить множество заявок Z_{ij} , препятствующих обслуживанию Заявки i с использованием ресурса r_j .

Если существует

$$Z_{ij} = \emptyset,$$

то разместить Заявку i на ресурсе r_j и завершить процедуру.

Иначе для каждого из множеств

$$Z_{ij}, j = \overline{1, J}$$

попытаться разместить все входящие в него заявки на других ресурсах.

$$\forall z_i, z_i \in Z_{ij} \text{ РАЗМЕСТИТЬ}(z_i)$$

Процедура прекращается при нахождении множества Z_{ij}^* , для которого удастся разместить все входящие в него заявки. Заявка i размещается на ресурсе r_j . Если такое множество Z_{ij}^* не найдено, то Заявке i необходимо отказать.

Такой алгоритм достаточен для решения многих прикладных задач довольно большой размерности, хотя в некоторых случаях (при большой загруженности ресурсов, при большом разбросе в размерах и времени выполнения заявок) он приближается по сложности к полному перебору.

Теоретические исследования проблемы резервирования были апробированы в процессе создания программной подсистемы "Машина резервирования". Данная подсистема создана как отдельный модуль, имеющий

специальный интерфейс для настройки на конкретную проблемную область. Иными словами, подсистему проектировали таким образом, чтобы после настройки параметров использоваться в программных системах, обслуживающих задачи оптимизации резервирования ресурсов. На рис. 2 приведена информационная модель данного программного модуля.



Рис. 2

Модуль настройки обеспечивает инициализацию подсистемы на конкретную проблемную область. С его помощью подсистеме передается формат БД, конкретные свойства ресурсов, критерии оптимизации. После настройки подсистема способна обращаться к БД и обрабатывать запросы на резервирование, которые поступают в подсистему по установленному протоколу. Результаты обработки запроса выводятся на монитор в виде рекомендации оператору, который имеет возможность скорректировать и подтвердить резервирование. Подсистема предлагает оператору набор вариантов резервирования с проставленными коэффициентами предпочтения. Эти коэффициенты вычисляются на основе встроенного в подсистему алгоритма и настроек критериев оптимизации.

Подсистема "Машина резервирования" была использована в программном продукте "HOTELLO-2". Данный продукт представляет собой систему ведения гостиничного хозяйства, включающую: бронирование номеров, учет и анализ финансовой деятельности, ведение базы гостей, комнат, счетов.

Благодаря возможности иерархической организации структуры гостиницы, "HOTELLO-2" не накладывает ограничений на количество комнат. Все функции системы можно условно разделить на следующие группы.

Создание новых броней. Все функции по созданию новой брони сосредоточены в подсистеме *Reservation Wizard*, которая помогает пользователю легко достичь желаемого результата и на каждом шаге снабжает его исчер-

пывающей информацией. При создании брони система поддерживает следующие функции:

- выбор необходимого временного промежутка с подсказками в виде календаря и длительности брони;
- определение списка всех номеров, свободных в данный промежуток времени и удовлетворяющих запросу.

Пользователь может увидеть список всех номеров, свободных в данный промежуток времени (вне зависимости от категории номера), а также произвести бронирование номера непосредственно из календаря броней. Для этого необходимо просто с помощью мыши указать конкретные комнаты и временной промежуток (рис.4).

Работа со счетами. Система предлагает богатый набор различных функций для облегчения пользователю работы со счетами. В терминах системы счет может быть выписан гостю, комнате, группе или третьему лицу. Подсистема *Open-Invoice Wizard* помогает пользователю быстро найти существующий или создать новый счет, открыть для рассмотрения любое количество счетов и легко переходить со счета на счет; добавить, удалить, изменить позиции счета; перенести группу позиций из одного счета в другой, используя drag&drop.

На рис. 3 представлена информационная модель, показывающая, каким



Рис. 3

образом подсистема резервирования внедрена в реальный программный продукт.

Поддержка сезонных цен на номера. Цена на номера в гостинице не постоянна и может меняться в зависимости от сезона, длительности брони, тактовых цен. Система позволяет пользователю создать список сезонных цен на каждую категорию номеров. По этому списку система автоматически определит цену номера и подскажет ее в момент резервирования, выдав соответствующий комментарий.

Оптимизация резервирования. Одной из проблем при работе гостиницы является оптимальное распределение броней по номерам с целью увеличения числа обслуживаемых гостей. Система имеет интеллектуальную подсистему, которая анализирует распределение броней и предлагает список номеров в порядке предпочтения. Данная подсистема учитывает следующие критерии:

- приоритет в использовании номера, предоставленный пользователем;
- примыкание новой брони к соседним;
- количество дней, которое остается между соседними бронями;
- количество дней, которые данный номер уже эксплуатировался.

Ограничение доступа к системе. В связи с тем, что систему могут обслуживать как один пользователь, так и целая группа клерков, система позволяет защищать определенные функции от несанкционированного доступа. Пользователь может эксплуатировать систему в двух режимах доступа:

- отсутствие ограничений в доступе. В этом режиме при входе в систему не нужно регистрироваться и вводить пароль. Все функции системы открыты для использования;
- режим ограничения в доступе. В этом режиме в систему может войти только зарегистрированный пользователь. При регистрации нового пользователя *Supervisor* может проставить ему определенные права в использовании функций системы.

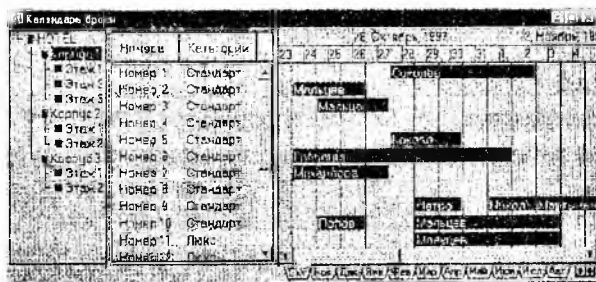


Рис. 4

Итак, в данной работе была рассмотрена проблема оптимизации резервирования в системах распределения ресурсов. Разработан метод решения задачи оптимального распределения ресурсов с минимизацией потерь и другими критериями. Предложенный метод позволяет избежать исчерпывающего перебора вариантов. Рассмотрены вопросы программной реализации указанного метода. Приведенный метод может быть применен для разработки различных программных систем распределения ресурсов. В статье также рассматривалось использование указанного метода для разработки системы автоматизированного управления ресурсами гостиницы "Hotello-2".

Список литературы: 1. Кофман А., Крюкоп Р. Массовое обслуживание. Теория и приложения. Пер. с франц. М., 1965. 2. Саати Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. Пер. с англ. М., 1971.

Поступила в редколлегию 28.10.97

УДК 681.324.

Т.Ю. ПЕТРЕНКО

МОДЕЛИРОВАНИЕ π -КВАНТОВЫХ СЕТЕЙ НЕЧЕТКИХ РАССУЖДЕНИЙ ДЛЯ ВЫВОДА РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

1. Постановка задачи

Общеизвестна уникальная способность человека принимать целенаправленные решения в условиях неопределенности (при недостатке данных) путем логической цепи рассуждений, опираясь на четкие и нечеткие знания. По-прежнему актуальна проблема моделирования этой способности с целью создания искусственных знаниеориентированных систем компьютерной поддержки принятия решений.

В работах [1,2] разработана теория моделей представления точных (t -квантов) и нечетких (π -квантов) знаний, а также эффективная информационная технология манипулирования ими при решении практических задач вывода решений в условиях неопределенности. Предложенный метод разноуровневых алгоритмических квантов знаний (РАКЗ-метод), в отличие от существующих, обеспечивает компьютерный синтез РАКЗ-моделей точных (tk -знаний) и нечетких (πk -знаний) знаний, а также алгоритмическое манипулирование ими средствами векторно-матричных операторов индуктивного и дедуктивного вывода знаний [1]. Опираясь на эти результаты, в данной работе сформулирована и решена задача автоматического *квантования* (структурирования) входной информации в классе tk -, πk -знаний, на базе использования которой реализована модель π -квантовой сети нечетких рассуждений (π -КСНР) для вывода решений в условиях неопределенности. Очевидно, синтезированная π -КСНР для определенной проблемной области может выполнять роль «машины вывода» в экспертной системе целевого назначения.

Пусть целевая сцена знаниеориентированного принятия решений представлена исходной информацией в форме нечеткого текста-сценария (Н-ТС) как естественно-языковой совокупности нечетких высказываний о характеристиках (признаках) объекта принятия решений (ОПР) $\omega \in \Omega$. *Нечеткими* назовем *тексты*, содержащие хотя бы одно из нечетких высказываний, связанных логикой «И», «ИЛИ», «НЕ» по имплицативной схеме «посылка \rightarrow следствие» относительно целевых признаков-следствий $x_{1ч}$, $x_{2ч}, \dots, x_{Sч}$ [2]. Пусть НТ-С состоит из системы логически связанных элементарных нечетких подтекстов (ЭНП), т.е. строк с имплицативными структу-

рами относительно одного целевого признака x_{iu} ($i = \overline{1, s}$). ЭНП содержит имена соответствующих нечетких и лингвистических переменных, посылок и следствий (импликаций) с указанием их показателей достоверности (ПД) и символов «rev» или «prev» в зависимости от обратимости или необратимости импликаций [2]. Очевидно, ЭНП отвечает отдельному π -кванту знаний определенного уровня, а НТ-С описывает сеть многоступенчатых рассуждений на основе системы разноуровневых π -квантов заранее неизвестного уровня. Тогда общая задача моделирования нечетких рассуждений формулируется так: по заданным НТ-С проблемной области и целевым критериям принятия решений требуется синтезировать семантически адекватную структуру π -квантов знаний соответствующего уровня в форме модели π -КСНР. Очевидно, базовым ядром этой задачи является задача квантования информации, которая заключается в построении алгоритмов автоматической генерации π -квантов заранее неизвестного уровня на основе анализа строк ЭНП заданного НТ-С, по правилам конструирования Π_x , A_x -задачи, решенной в [2].

2. Общая методика решения задачи

Предлагаемая общая методика синтеза модели π -КСНР для вывода решений в условиях неопределенности мотивируется следующим формальным определением π -КСНР.

Определение. Многосвязный ориентированный граф $G = (E, \Gamma)$, упорядоченный по ярусам $N_0, N_1, \dots, N_S \subset E$ порядковой функции согласно заданной цели принятия решений и удовлетворяющий следующим требованиям:

а) $G = (E, \Gamma)$ — продукт алгоритмической обработки заданного НТ-С;
 б) $\forall X_i \in E$ — есть вершины, отвечающие π -квантам различных уровней, содержащие знания о проблемной области принятия решений, а дуги из $\Gamma: E \rightarrow E$ (как многозначного отображения) отвечают логическим связям между π -квантами, определяющими технологию G ;

в) $\forall X_i \in N_0 \subset E$ — есть π -кванты исходных посылочных знаний с известными показателями достоверности (ПД), а $\forall X_i \in N_S \subset E$ — π -кванты знаний, определяющие выходные целевые следствия искомым решений при фиксированном E и $\Gamma^{-1} N_0 = \emptyset$, $\Gamma N_S = \emptyset$, называется π -квантовой сетью нечетких рассуждений для вывода решений.

Очевидны два этапа реализации методики решения поставленной задачи. На 1-м этапе по заданному НТ-С строят соответствующий ему *сценарный граф* (СГ), описываемый *сценарной матрицей* инцидентий (СМ). Этап завершается алгоритмическим преобразованием СГ в *упорядоченный*

сценарный граф (УСГ) путем нахождения ярусов порядковой функции СГ для выявления упорядоченных подмножеств вершин (посылок, следствий), определяющих структуру и связи искомым π -квантов.

На втором этапе по информации УСГ алгоритмически строят разноуровневые π -кванты с учетом использования логических связей «И», «НЕ», « \rightarrow » в междоменных отношениях и связи «ИЛИ» в межкомпонентных связях домена.

В этом процессе с помощью УСГ автоматически выявляются исходные простые посылки с известными $d[\bullet]$, определяемые как π -кванты 1-го уровня, а также множества независимых посылок, образующих π -кванты 2-го уровня. В результате УСГ преобразуется в π -квантовую сеть нечетких рассуждений, отвечающую исходному НТ-С и являющуюся ядром будущей π -квантовой сети вывода (π -КСВ) приближенных решений.

3. Алгоритмы автоматического квантования

Алгоритмизация решения поставленной в п.1 задачи сводится к синтезу алгоритмов реализации 1-го и 2-го этапов общей методики с учетом определения π -КСВ.

Присвоим синтезируемому алгоритму имя КВАНТАЛ, а вспомогательному алгоритму построения упорядоченного сценарного графа на 1-м этапе — имя УСГАЛ.

Вспомогательный алгоритм УСГАЛ

Вход: сценарная матрица НТ-С размера $(n \times n)$, соответствующая СГ $G = (E, \Gamma)$, $E = \{X_i \mid i = \overline{1, n}\}$, $\Gamma: E \rightarrow E$.

Выход: упорядоченный сценарный граф (УСГ).

Действия:

1. В процессе циклического обозревания СМ НТ-С найти пустые столбцы, т.е. те, которым не предшествует никакая вершина X_i , и образовать ярус порядковой функции $N_0 = \{X_i \mid X_i \in E, \Gamma^{-1}X_i = \emptyset\}$; удалить вершины $X_i \in N_0$ из СМ.

2. Найти в усеченной СМ пустые столбцы и образовать из соответствующих им вершин X_i следующий уровень порядковой функции $N_1 = \{X_i \mid X_i \in E - N_0, \Gamma^{-1}X_i = N_0\}$, удалив из СМ все $X_i \in N_1$.

3. Аналогичные действия 1 и 2 продолжать до тех пор, пока из СМ не будут удалены все вершины.

4. Из образовавшихся упорядоченных по ярусам порядковой функции вершин сформировать УСГ.

5. Конец.

Алгоритм КВАНТАЛ

Вход: нечеткий текст-сценарий (НТ-С) заданной сцены принятия решений.

Выход: π -квантовая сеть нечетких рассуждений (π -КСНР), соответствующая заданному НТ-С принятия решений.

Действия:

1. Руководствуясь общей методикой в п. 2, построить СМ, описывающую НТ-С и соответствующий СГ.

2. Применить к СМ алгоритм УСГАЛ и сформировать адекватный НТ-С упорядоченный сценарный граф.

3. Организовать цикл обзора ярусов УСГ N_0, N_1, \dots, N_S и выделить вершины $X_i \in N_0$ с предлагаемыми известными показателями достоверности $d[\bullet]$, присвоить им имена π -квантов 0-го уровня, из которых затем будут формироваться домены π -квантов старших уровней, отвечающих вершинам из ярусов N_1, \dots, N_S .

4. Выделить вершины УСГ $X_i \in N_1$, присвоить им имена соответствующих подлежащим построению π -квантам определенного уровня и последовательно конструировать π -кванты из подмножества N_1 согласно дугам-импликациям и связкам «И», «ИЛИ», «НЕ». При этом уровень строящегося π -кванта определяется количеством независимых (не связанных связками «И», «ИЛИ») дуг-импликаций, входящих в вершину X_i с именем π -кванта. Одна дуга $E_i \rightarrow C_j$ порождает π -квант 1-го уровня с двумя активными доменами, содержащими, как минимум, две компоненты. Одна из них равна значению e_i посылки E_i с ее ПД $d[e_i]$, т.е. « $e_i | d[e_i]$ » в 1-м домене, а вторая содержит значение «0», т.е. резервная. Второй домен строится по аналогии для следствия C_j с первой компонентой « $c_j | d[\rightarrow c_j]$ » и второй «0-й» — резервной. Последний пассивный домен определяет выход π -кванта и содержит запись « $:1 | d[c_j](rev)$ », что означает: «общее заключение π -кванта с именем C_j справедливо с вычисленной достоверностью $d[c_j](обратимо)$ ». Такой выходной домен всегда непосредственно следует за целевым доменом, признаком которого является наличие компоненты относительно следствия « $c_j | d[\rightarrow c_j]$ ».

Если несколько дуг $E_i \rightarrow C_j$ со связками «И», «ИЛИ», «НЕ» сходятся в одном узле-следствии C_j (j — зафиксировано, $i = \overline{1, l}$), то связка «ИЛИ» обуславливает формирование нескольких компонент в одном домене, связка «И» — формирование нового домена, а связка «НЕ» приводит к отрицанию соответствующей компоненты в одном π -кванте 1-го уровня.

Если несколько дуг $E_i \rightarrow C_j$ сходятся в одном узле-следствии C_j ($j_c = \overline{1, l}$), то формируется матричный квант 2-го уровня с именем C_j , состоящий из l π -квантов (строк матрицы) 1-го уровня. Выходной домен π -кванта 2-го уровня содержит запись

$$\begin{array}{c} :|d[{}_1c_j](rev) \\ :|d[{}_1c_j](rev) \\ \vdots \\ :|d[{}_lc_j](rev) \end{array} |d[c_j](rev),$$

которая означает, что общее заключение π -кванта 2-го уровня с именем C_j справедливо с вычисляемой достоверностью $d[c_j]$ (обратимо), зависящей от ПД $d[{}_1c_j], d[{}_2c_j], \dots, d[{}_lc_j]$.

Если конструируемый π -квант с *необратимым* (*nrev*) следствием имеет *отрицательный* ПД посылки, то π -квант исключается как *противоречивый*.

5. Продолжать действие 4. в цикле, пока не исчерпается последний ярус N_s УСГ.

6. Сформировать π -квантовую сеть нечетких рассуждений в соответствии с заданной НТ-С принятия решений.

6.1. Присвоить всем ПД компонент доменов всех π -квантов значение «0.0».

6.2. Выделить в качестве *ВХОДА* π -квантовой сети вывода (π -КСВ) решений все π -кванты 0-го уровня, отвечающие исходным посылкам, значения и достоверности которых известны либо выясняются посредством вопросов экспертам или пользователю.

6.3. Зафиксировать совокупность целевых характеристик ОПР, относительно которых должен осуществляться вывод решений с возможностью варьирования комбинации их значений.

6.4. Определить структуру и семантику выходных сообщений и сформировать файл π -КСНР.

7. Конец.

4. Иллюстративный пример синтеза модели π -КСНР

Пусть задан НТ-С гипотетического вида:

1. Если $E1|0.9$, ТО $C1|0.0$; $d[E1 \rightarrow C1] = 0.8(nrev)$,
2. Если $E2|0.9$, ТО $C2|0.0$; $d[E2 \rightarrow C2] = 0.9(rev)$,
3. Если $E3|-0.3$, ТО $C2|0.0$; $d[E3 \rightarrow C2] = 0.7(rev)$,
4. Если $E4|-0.4$, ТО $C3|0.0$; $d[E4 \rightarrow C3] = 0.6(nrev)$,
5. Если $\overline{E5}|-0.3$, ТО $C3|0.0$; $d[\overline{E5} \rightarrow C3] = 0.5(nrev)$,
6. Если $(C2|0.0$ И $C3|0.0)$ ТО $C4|0.0$; $d[(C2$ И $C3) \rightarrow C4] = 0.9(rev)$,
7. Если $(C1|0.0$ ИЛИ $C4|0.0)$ ТО $C5|0.0$; $d[(C1$ ИЛИ $C4) \rightarrow C5] = 0.8(nrev)$,
8. Если $(E1|0.9$ И $C4|0.0)$ ТО $C6|0.0$; $d[(E1$ И $C4) \rightarrow C6] = 0.7(rev)$,
9. Если $C3|0.0$, ТО $C6|0.0$; $d[C3 \rightarrow C6] = 1.0(rev)$,
10. Конец.

(1)

Напомним, что показатель достоверности некоторого события $d[\bullet]=0$ означает «НЕ ЗНАЮ», т.е. о достоверности знаний ничего пока не известно.

Требуется построить π -квантовую модель нечетких рассуждений для вывода заключения о предпочтении ситуации с характеристикой $C5$ или $C6$ в зависимости от наблюдаемых значений нецелевых признаков ОПР $E1$, $E2$, $E3$, $E4$, $E5$.

Руководствуясь действиями алгоритма КВАНТАЛ и входными данными НТ-С (1), проиллюстрируем методикой алгоритмического конструирования разноуровневых π -квантов, составляющих π -КСНР.

После выполнения 1, 2, 3 действий алгоритма КВАНТАЛ получаем РАКЗ-модели π -квантов 0-го уровня:

$$\begin{aligned} \pi k_0 E1 &= [e1|0.9], \quad \pi k_0 E2 = [e2|0.9], \quad \pi k_0 E3 = [e3|-0.3], \\ \pi k_0 E4 &= [e4|-0.4], \quad \pi k_0 \overline{E5} = [e5|-0.3]. \end{aligned} \quad (2)$$

Используя π -кванты и выполняя действия 4, 5, конструируем последовательно очередные разноуровневые π -кванты в форме векторно-матричных РАКЗ-моделей 1-го и 2-го уровней.

Так, относительно импликации « $E1 \rightarrow C1$ », которая логически констатирует « $E1$ и $C1$ », получаем двухдоменную структуру

$$\begin{aligned} \pi k_1 C1 &= [e1|d[e1], 0: c1|d[E1 \rightarrow C1], 0: 1|d[C1](nrev)] = \\ &= [e1|0.9, 0: c1|0.8, 0: 1|0.0(nrev)], \end{aligned} \quad (3)$$

где 1-й активный домен отвечает признаку x_1 как посылки $E1$ и содержит компоненту с ее нечетким значением « $e1|d[e1]$ », а также резервную компоненту «0»; 2-й активный домен отвечает промежуточному целевому признаку $x_2=x_{ц}$ как следствию (импликации) $C1$ с ее нечетким значением $C1|d[E1 \rightarrow C1]$ и резервной компонентой «0». Третий (пассивный) выходной домен свидетельствует о необратимом следствии с неизвестным значением (0,0) показателя достоверности, пока π -квант не возбужден от специального сигнала управления, обуславливающего вычисление $d[C1]$ общего заключения.

Относительно следствия $C2$ имеем две независимые импликации: « $E2 \rightarrow C2$ » и « $E3 \rightarrow C3$ », что приводит к построению двух векторных π -квантов 1-го уровня, объединяемых в один матричный π -квант 2-го уровня. Относительно того же следствия $C2$:

$$\pi k_2 \|C2\| = \left[\begin{array}{l} \pi k_1^1 C2 = [e2|0.9, 0: {}^1 c2|0.9, 0: l|0.0(rev)] \\ \pi k_1^2 C2 = [e3|-0.3, 0: {}^2 c2|0.7, 0: l|0.0(rev)] \end{array} \right] / |0.0(rev)| \quad (4)$$

Аналогично относительно следствий $C3, C4, C5, C6$ имеем следующие π -квантовые модели в виде доменализированных векторов:

$$\pi k_2 \|C3\| = \left[\begin{array}{l} [e4|-0.4, 0: {}^1 c3|0.6, 0: l|0.0(nrev)] \\ [e5|-0.3, 0: {}^2 c3|0.5, 0: l|0.0(nrev)] \end{array} \right] / |0.0(nrev)| \quad (5)$$

$$\pi k_2 C4 = [c2|d[c2], 0: c3|d[c3], 0: c4|d[c2 \rightarrow c3], 0: l|d[c4(rev)]] = [c2|0.0, 0: c3|0.0, 0: c4|0.9, 0: l|0.0(rev)]; \quad (6)$$

$$\pi k_1 C5 = [c1|d[c1], c4|d[c4], 0: c5|d[(c1 \vee c4) \rightarrow c5], 0: l|d[c5(nrev)]] = [c1|0.0, c4|0.0, 0: c5|0.8, 0: l|0.0(nrev)], \quad (7)$$

где из-за связки «ИЛИ» в 1-м домене образованы две значащие компоненты и третья — резервная.

$$\pi k_2 \|C6\| = \left[\begin{array}{l} [e1|0.9, 0: c4|0.0, 0: {}^1 c6|0.7, 0: l|0.0(rev)] \\ [c3|0.0, 0: {}^2 c6|1.0, 0: l|0.0(rev)] \end{array} \right] / |0.0(rev)| \quad (8)$$

Таким образом, выражениями (2) — (8) определены разноуровневые π -кванты, составляющие π -квантовую сеть нечетких рассуждений (π -КСНР), представленную на рис. 1.

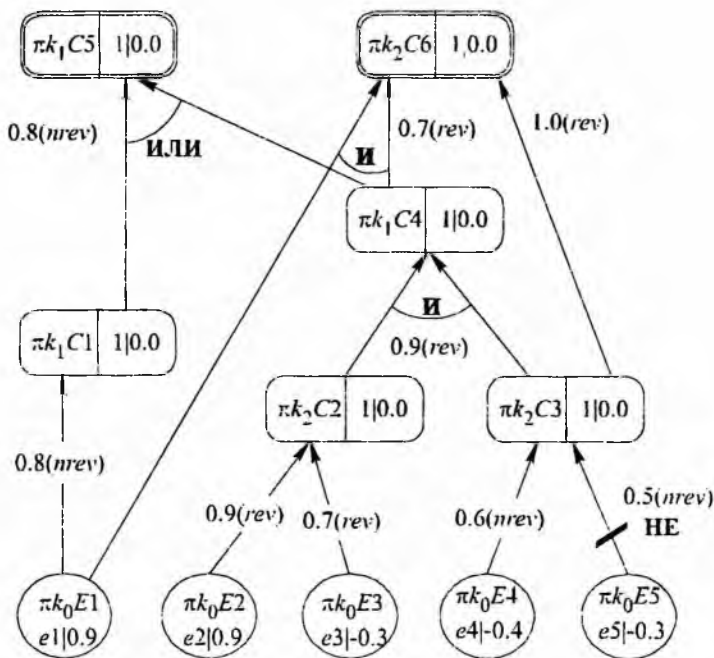


Рис. 1

В указанных выражениях символами «0» обозначены резервные компоненты доменов, разделенными «:». «Символы «1» в пассивных доменах π -квантов обозначают «истинность» πk -знаний с показателем достоверности $d[\bullet]$ общего заключения, стоящего непосредственно за разделяющей вертикальной чертой с указателем обратимости (rev) или необратимости (nrev) соответствующих импликаций. Значения $d[\bullet]=0.0$ указывают на необходимость их вычисления.

5. Выводы

На основе сформулированной и решенной задачи автоматического квантования знаний построена эффективная модель нечетких рассуждений

в форме π -КСНР, обеспечивающая вывод приближенных решений в условиях неопределенности.

Диск литературы: 1. Сироджа И.Б. Теория и новая информационная технология принятия производственных решений на основе инженерии знаний // Информатизация та нові технології. 996. № 3. С. 3—10. 2. Сироджа И.Б., Петренко Т.Ю. Квантовые модели нечетких знаний для принятия решений при недостатке данных // См. наст. сборник.

Поступила в редколлегию 08.12.97

УДК 681.5.015

В.П. АВРАМЕНКО, И.Д. КАЛАЧЕВ, В.В. КАЛАЧЕВА

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Введение

Важная роль в повышении эффективности производства отводится средствам искусственного интеллекта, которые позволяют повысить качество принимаемых решений в условиях неопределенности цели, условий функционирования и проявления внешней среды. Источниками неопределенности в задачах моделирования и оптимизации организационно-технологического управления (ОТУ) являются следующие факторы:

- отсутствие информации о предпочтительности ситуации при выборе многокритериального решения; несогласованность (противоречивость) требований плана и выделенных ресурсов;
- отклонение исходных предпосылок от фактически существующих условий;
- наличие дрейфа характеристик и зашумленности измерений, слабой формализуемости процессов и плохой обусловленности системы; варьирование исходных данных и т.п.

Решения, принимаемые в условиях неопределенности исходных данных и проявления внешней среды, всегда приводят к худшим результатам, чем при полной определенности. В этом случае под квазиоптимальным решением подразумевается не самое безусловно лучшее, а лучшее в некотором смысле, например в среднем, при многократном повторении или в смысле близости к некоторому предпочтительному решению с точки зрения конкретного лица, принимающего решения (ЛПР). При формализации задачи предпринимаются попытки снизить меру неопределенности путем привлечения дополнительной информации или логических допущений. Фактически осуществляется переход от полной неопределенности к частичной стохастической неопределенности или расплывчатым множествам, что приводит к множеству допустимых квазиоптимальных решений. Для выбора наиболее предпочтительного из квазиоптимальных решений в работе разрабатываются интеллектуальные процедуры принятия решений в условиях конкретного вида неопределенности.

Факторы неопределенности в задачах ОТУ

Большинство реальных задач ОТУ приходится решать в условиях неопределенности – неполноты, недостоверности и несвоевременности посту-

пления информации. Планирование производства обычно ведется в условиях неполной информации об обстановке, в которой будет выполняться план и реализовываться производственная программа. Управление производственными процессами осуществляется при различной интенсивности помех, статистические характеристики которых не всегда могут быть определены и учтены при выработке управляющих воздействий.

Существует значительное количество источников и форм проявления неопределенности: 1) неопределенность, вызванная недостатком информации и ее достоверности в силу организационных, технологических и других причин; 2) неопределенность, связанная с ограничениями в ситуации принятия решения: по времени решения, заданной точности, объему оперативной памяти ЭВМ; 3) неопределенность, обусловленная слишком высокой или недоступной платой за определенность; 4) неопределенность, возникающая из-за неадекватности модели по причинам неопределенности цели и критериев функционирования, неопределенности проявления внешней среды по отношению к рассматриваемой системе, неопределенности при выборе рациональной сложности модели; 5) неопределенность, порождаемая действиями людей в процессе производства и принятия решений; 6) неопределенность, организованная преднамеренно для сокрытия поведения системы и ее ресурсов.

Формализация процедур принятия решений в условиях неопределенности [1-4]

Математическое описание общей задачи ОТУ с учетом компонент фактора неопределенности можно представить моделью

$$Q(x, \gamma_1) = \{\varphi_1(x), \dots, \varphi_k(x); \gamma_1\} \rightarrow \max_{x \in D} \quad (1)$$

$$D(x; \gamma_2, \gamma_3) = \{x \in R^n / R_i = \varphi_i(x, a; \gamma_2) \geq B_i, \quad (2)$$

$$a_j(x, \gamma_3) \leq x_j \leq b_j(x, \gamma_3), x_j \geq 0, j = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где γ_1 — компонента, отражающая неопределенность процедуры свертки критериев; γ_2 — случайная компонента, отражающая флуктуирование ограничивающих условий; γ_3 — детерминированная компонента, отражающая изменения начальных условий (исходных данных).

Особенностью задачи (1)–(3), принадлежащей к классу задач стохастического программирования, является тот факт, что функционалы задачи не заданы в явном виде и для их вычисления необходимо проводить усреднение по γ , что в общем случае связано с вычислением многомерных интегралов. Вычислительные затраты в этом случае оказываются несоизмеримо высокими по сравнению с решением детерминированных задач нелинейно-

го программирования. Поэтому более эффективны по расходу вычислительных ресурсов процедуры, предусматривающие редуцирование задачи стохастического программирования совокупностью детерминированных задач линейного и нелинейного программирования применительно к фиксированным значениям случайного вектора $\gamma = \{\gamma^l\}$, где $l = 1, 2, \dots$.

В результате редуцирования задачи (1)—(3) получим совокупность детерминированных задач

$$Q(x, \gamma_1^k) = \{\varphi_1(x), \dots, \varphi_k(x); \gamma_1^k\} \rightarrow \max_{x \in D_j} \quad (4)$$

$$D_1(x; \gamma_2^1, \gamma_3^1) = \{x \in R_n / R_j = \varphi_j(x, a; \gamma_2^1) \geq b_j\}, \quad (5)$$

$$a_j(x_1, \gamma_3^1) \leq x_j \leq \overline{b_j}(x_1, \gamma_3^1), x_j \geq 0, j = \overline{1, n}, \quad (6)$$

решения которых образуют совокупность $\{x^l\}$. Выбор наиболее предпочтительного решения из совокупности квазиоптимальных осуществляется ЛПР.

Таким образом, желание избавиться от статистической неопределенности приводит к постановкам задач в классе стохастического программирования, решение которых сопряжено со значительными вычислительными трудностями и внесением новых неопределенностей. Поэтому на первом этапе целесообразно решить задачу детерминированной оптимизации при фиксированных значениях γ^1 , а затем исследовать устойчивость и чувствительность полученного решения к проявлениям внешней среды.

Регуляризующие процедуры принятия решений

Многие задачи оптимизации ОТУ сводятся к решению скалярных и векторных задач математического программирования (линейного и нелинейного) с приближенно заданными исходными данными. Основные методы решения задач математического программирования создавались при молчаливом предположении, что задача корректна, сильно устойчива и хорошо обусловлена. В реальной ситуации система ограничивающих условий $Ax \geq b$ может иметь линейно зависимые строки, что свидетельствует о некорректной постановке задачи. При варьировании параметров модели задачи линейного программирования условие независимости ограничений практически не проверяемо.

Большинство практических задач ОТУ в лучшем случае являются слабо корректными и плохо обусловленными. В них отсутствует достоверная информация о непротиворечивости ограничений, характере возмущающих

воздействий и погрешности вычислений. Такой класс некорректно поставленных задач характеризуется отсутствием решения в классическом смысле, неединственностью получаемых решений и неустойчивостью. Чтобы из множества допустимых решений выделить множество квазиоптимальных решений, необходимо в постановку задачи ввести дополнительные условия регулярности, учитывающие желательные свойства решений и позволяющие из множества квазиоптимальных выбрать наиболее предпочтительные.

Задачи ОТУ в классе моделей линейного программирования часто бывают настолько плохо обусловлены, что получить предпочтительное решение традиционными методами не представляется возможным. В качестве регуляризованного решения задачи можно выбрать нормальное решение x_H , наименее уклоняющегося от некоторого заданного вектора x_0 , который может интерпретироваться как ранее составленный план или производственная программа. Чем ближе новая искомая программа x_H к предыдущей, тем меньше переналадок оборудования, тем эффективнее полученное решение. Мету уклонения нового и старого решений можно задать квадратом нормы

$$\Omega[x_H - x_0] = \|x_H - x_0\|_n^2.$$

Предположим, что задан некоторый вектор $x_0 \in X$. Искомый вектор x_H представляет нормальное решение задачи линейного программирования (по отношению к x_0), если справедливо соотношение

$$\|x_H - x_0\|^2 = \min_{x^* \in X} \|x^* - x_0\|^2,$$

где x^* — любое решение этой задачи. Из совокупности квазиоптимальных решений в случае вырожденности задачи выделяется одно нормальное решение, наилучшее в смысле выбранной функции уклонения.

Многокритериальные задачи по сравнению с задачами скалярной оптимизации можно отнести к классу многократно некорректных. Их некорректность возникает, во-первых, из-за некорректности задач локальной оптимизации, во-вторых, из-за процедур принятия многокритериальных решений, в основу которых положен принцип неединственности. Множественность эффективных решений является скорее достоинством, а не недостатком, поскольку «жесткие» схемы получения единственного решения неадекватны сущности векторной оптимизации, а имеющаяся «свобода» выбора предпочтительного решения из множества эффективных позволяет учесть неопределенность целей и критериев.

Заключение

Поскольку мир неопределенностей чрезвычайно разнообразен, то при исследовании конкретной предметной области целесообразно выделять наиболее характерные для нее неопределенности с точки зрения решаемых в данный момент задач. В задачах моделирования ОТУ довольно распространена неопределенность обстановки причинами которой являются случайные отклонения параметров технологических процессов, непредсказуемые волевые решения организационных вопросов, изменяющиеся неслучайным образом условия работы и проявления внешней среды, старение и износ оборудования. В задачах оптимизации неопределенность проявляется в недостоверности и неполноте исходных данных, неадекватности используемых соотношений и противоречивости системы ограничений. Неопределенность многокритериальных задач включает в себя неопределенность, вносимую исходными данными, регуляризацией при оценивании параметров функциональных ограничений, аппроксимацией некорректно поставленной задачи и сверткой частных критериев.

Решение задач конкретной предметной области с учетом дрейфа характеристик объекта, проявления внешней среды и нарушения исходных предпосылок моделирования и оптимизации требует разработки интеллектуальных (регуляризованных, эвристических, слабоформализованных) процедур принятия решений, ориентированных на конкретный вид неопределенности.

Список литературы: 1. *Трухаев Р.И.* Модели принятия решений в условиях неопределенности. М.: Наука, 1981. 258 с. 2. *Жуковин В.Е.* Многокритериальная модель принятия решений с неопределенностью. Тбилиси: Мицниереба, 1983. 105 с. 3. *Воцинин А.Л., Сотиров Г.Р.* Оптимизация в условиях неопределенности. Изд-во МЭИ (СССР) и «Техника» (НРБ), 1989. 224 с. 4. *Авраменко В.П.* Управление производством в условиях неопределенности. К.: УМІ ВО, 1992. 48 с.

Поступила в редколлегию 08.12.9

Т.Ю. ПЕТРЕНКО, И.Б. СИРОДЖА

КВАНТОВЫЕ МОДЕЛИ НЕЧЕТКИХ ЗНАНИЙ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ ПРИБЛИЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ НЕДОСТАТКЕ ДАННЫХ

1. Постановка задачи

Обобщим основные результаты, полученные в работах [1,2] относительно моделей представления точных знаний (*tk*-знания), на случай нечетких (приближенных) *pk*-знаний в условиях неопределенности на базе развиваемого метода равноуровневых алгоритмических квантов знаний (РАКЗ-метод).

Суть обобщения заключается в формальной постановке и решении задачи формализации знаний (*A*-задачи) на более общий случай π -квантов знаний (*pk*-знаний), которые в частном случае при степени достоверности, равной 1, вырождаются в четкие *t*-кванты знаний (*tk*-знания). Эта задача имеет бионическую природу, поскольку знания извлекаются и используются человеком как продукт человеческого интеллекта для построения искусственных систем, имитирующих разумное принятие решений.

Пусть нечетким знаниям соответствуют приближенные, так называемые π -кванты знаний, которые в отличие от *t*-квантов [1,2] имеют степень достоверности меньше 1, определяемую показателем достоверности $d[\bullet]$. Предположим, что значения показателей достоверности лежат в интервале $[-1, \dots, 0, \dots, +1]$, где «-1» означает, что знания абсолютно неверны; «0» — полная неопределенность знаний; «+1» — знания полностью достоверны, а промежуточные значения интервала отображают степень *доверия* или *недоверия* к соответствующим знаниям. Таким образом, под *недостатком данных* мы понимаем условия, когда известны нечеткие (в смысле достоверности) знания об объекте принятия решений (ОПР), и (или) когда неизвестны достаточно информативные признаки (характеристики) для идентификации ОПР. Указанные значения показателей достоверности π -квантов могут быть назначены экспертами по данной предметной области либо вычислены по специальным обоснованным методикам [3,4]. Используя терминологию *t*-квантов [1] с некоторыми особенностями, сформулируем A_{π} -задачу формализации π -квантов на основе предлагаемых РАКЗ-моделей представления нечетких знаний. *Первая* особенность состоит в приписывании каждой единичной компоненте признакового домена в π -кванте числового значения $d[\bullet]$ коэффициента достоверности, отделяемого вертикальной чертой. При этом значение $d[\bullet]$, соответствующее доменным компонентам *целевого признака*, характеризует оценку достоверности *следствия*. Значения $d[\bullet]$ компонент других признаков оценивают достоверность *посылоч-*

ных знаний для данного следствия. Вторая особенность заключается в использовании задаваемых значений $d[\bullet]$ посылок и импликаций для вычисления коэффициента достоверности $d[Y_\omega] = d[\pi_k, Y_\omega]$ всего заключения, т.е. показателя достоверности π -кванта j -го уровня с именем Y_ω , по схеме с жесткой логикой: посылки внутри доменов комбинируются дизъюнктивно (связка или), а междоменные — конъюнктивно (связка и). Алгоритмически найденное значение $d[\pi_k, Y_\omega]$ хранится всегда в ячейке последнего $(n+1)$ -го домена π -кванта Y_ω , описывающего ОПР $\omega \in \Omega$. Эта ячейка называется пассивным доменом, символизирующим выход π -кванта.

Тогда A_π -задача формализации π -квантов знаний по аналогии с A -задачей [1] представляется «пятеркой»:

$$A_\pi = \langle S, \pi K_T, D, \Pi_\pi, Q_\pi \rangle, \quad (1)$$

где S — символьный язык t - и π -квантов знаний, состоящий из конечного множества букв, цифр и символов операций теории алгоритмов; πK_T — конечное множество терминальных π -квантов знаний; D — множество значений некоторой функции достоверности $d_M[\bullet]$ разноуровневых π -квантов из интервала $[-1, +1]$ (показателей достоверности); Π_π — правила конструирования разноуровневых π -квантов; Q_π — множество семантических кодов для π -квантовых структур.

Другими словами, в A_π -задаче требуется создать формальный механизм построения класса разноуровневых πk -знаний в языке S со значениями степени достоверности из D на основе применения правил Π_π к терминальным π -квантам из πK_T с семантическими кодами из Q_π .

2. Решение A_π -задачи формализации и синтеза π -квантов знаний

2.1. Основные определения

Поставим в соответствие приближенным πk -знаниям нечеткие множества. Обозначим через $U = \{u\}$ универсальное множество.

Определение 1. Нечетким множеством ${}^\pi M$ на множестве U называется совокупность пар вида

$${}^\pi M = \{\langle u | d_M[u] \rangle\}, \quad (2)$$

где $d_M : U \rightarrow [-1, \dots, 0, \dots, +1]$ — отображение множества U в отрезок $[-1, \dots, +1]$, называемое функцией достоверности нечеткого множества ${}^\pi M$. Значение функции достоверности для конкретного элемента $u \in U$ назовем показателем достоверности, характеризующим степень достоверности. Всюду будем полагать, что показатель достоверности $d_M[u]$ является субъ-

ективной либо некоторой объективной мерой того, насколько элемент $u \in U$ соответствует понятию, смысл которого формализуется нечетким множеством ${}^{\pi}M$.

Определение 2. Носителем нечеткого множества ${}^{\pi}M$ называется множество

$$\Sigma_M = \{u \mid u \in U \wedge d_M[u] \in [-1, \dots, +1]\},$$

то есть подмножество Σ_M универсального множества U , для элементов которого функция достоверности d_M строго принимает значения на отрезке $[-1, \dots, +1]$.

Например, если универсальному множеству U соответствует множество возможных значений срока выполнения конкретной работы (в днях) от 10 до 30 дней, то нечеткое множество ${}^{\pi}M$, отвечающее нечеткому (приближенному) понятию «краткосрочная работа», можно представить в виде

$${}^{\pi}M = \{\langle 10 \mid 1 \rangle, \langle 11 \mid 0.9 \rangle, \langle 12 \mid 0.8 \rangle, \langle 13 \mid 0.6 \rangle, \langle 14 \mid 0.1 \rangle, \langle 15 \mid 0.0 \rangle, \langle 16 \mid -0.3 \rangle, \langle 17 \mid -0.5 \rangle, \dots\}, \quad (3)$$

где $\langle \bullet \mid \bullet \rangle$ — принятая символика обозначения нечеткой информации.

Данное нечеткое множество представимо графически в виде дискретных точек на плоскости, абсциссы которых соответствуют значениям $u \in U$, а значения ординат — функции достоверности $d_M[u]$. Носителем ${}^{\pi}M$ в нашем примере есть конечное подмножество

$$\Sigma_M = \{10, 11, 12, 13, 14\}. \quad (4)$$

Определение 3. Декартовым произведением нечетких множеств ${}^{\pi}M_i$, определенных на U_i , $i = \overline{1, t}$, называется множество

$${}^{\pi}M_1 \times {}^{\pi}M_2 \times \dots \times {}^{\pi}M_m = \{\langle (u_1, u_2, \dots, u_m) \mid d_U[u_1, u_2, \dots, u_m] \rangle\}, \quad (5)$$

где $u_i \in U_i$; $d_U[u_1, u_2, \dots, u_m] = \min\{d_{M_1}[u_1], d_{M_2}[u_2], \dots, d_{M_m}[u_m]\}$.

Определение 4. Нечетким бинарным отношением ${}^{\pi}R$ на множестве U называется нечеткое подмножество прямого произведения $U \times U$, характеризующееся функцией достоверности $d_R: U \times U \rightarrow [-1, \dots, +1]$.

Значение $d_R(u_i, u_j)$ для конкретной пары (u_i, u_j) характеризует субъективную или некоторую объективную меру выполнения отношения $u_i {}^{\pi}R u_j$.

Для описания семантики нечетких знаний будем использовать нечеткие высказывания. Нечеткими высказываниями назовем высказывания следующих трех видов:

1) высказывание $\langle \beta \text{ есть } \alpha \rangle$, где β — имя лингвистической переменной, отражающей некоторый ОПР или параметр реальной действительности, относительно которой утверждается α , являющееся ее нечеткой переменной (нечеткой оценкой);

2) высказывания вида $\langle \beta \text{ есть } \mu\alpha \rangle$, $\langle \beta \text{ есть } q\alpha \rangle$, $\langle q\beta \text{ есть } \mu\alpha \rangle$, $\langle \mu\beta \text{ есть } q\alpha \rangle$, где μ — модификатор (ему соответствуют слова типа: ОЧЕНЬ, БОЛЕЕ ИЛИ МЕНЕЕ, СРЕДНИЙ, ДОСТАТОЧНЫЙ и др.); q — квантификатор (ему соответствуют слова типа: НЕСКОЛЬКО, БОЛЬШИНСТВО, МНОГО, НЕМНОГО, ОЧЕНЬ МАЛО и др.);

3) высказывания, образованные из высказываний 1-го и 2-го видов с союзами И, ИЛИ; ЕСЛИ ..., ТО; ЕСЛИ ..., ТО ... ИНАЧЕ.

2.2. Синтез векторно-матричных РАКЗ-моделей нечетких знаний

Рассмотрим механизм алгоритмической формализации π -квантов знаний в рамках формулировки A_π -задачи (1).

Как и прежде, наблюдаемые ОПР $\omega \in \Omega$ характеризуются конечным числом разнотипных признаков x_1, x_2, \dots, x_n . Пусть они принимают значения из конечных нечетких множеств

$$\begin{aligned} \pi X^{(1)} &= \{\alpha_1^1 | d_{X^1}[\alpha_1^1], \dots, \alpha_{\rho_1}^1 | d_{X^1}[\alpha_{\rho_1}^1]\}, \quad \pi X^{(2)} = \{\alpha_1^2 | d_{X^2}[\alpha_1^2], \dots, \alpha_{\rho_2}^2 | d_{X^2}[\alpha_{\rho_2}^2]\}, \dots \\ &\dots, \pi X^{(n)} = \{\alpha_1^n | d_{X^n}[\alpha_1^n], \dots, \alpha_{\rho_n}^n | d_{X^n}[\alpha_{\rho_n}^n]\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $d_{x_j} : X^{(j)} \rightarrow [-1, \dots, 0, \dots, +1]$ — функция достоверности нечеткого множества $\pi X^{(j)}$.

Тогда представим конечное множество терминальных π -квантов знаний πK_T в A_π -задаче (1) следующими тремя терминальными π -квантами:

1) векторный π -квант 0-го уровня

$$\pi k_0 y = [\alpha_1^1 | d_{X^1}[\alpha_1^1], \dots, \alpha_{\rho_1}^1 | d_{X^1}[\alpha_{\rho_1}^1] : \dots : \alpha_1^n | d_{X^n}[\alpha_1^n], \dots, \alpha_{\rho_n}^n | d_{X^n}[\alpha_{\rho_n}^n]] \quad (7)$$

$y \in S$, $\pi k_0 \in Q_\pi$ с семантикой: «наблюдаемый ОПР характеризуется n признаками x_j ($j = \overline{1, n}$), значения которых $\alpha_{k_j}^j \in \pi X^{(j)}$, ($k_j = \overline{1, \rho_j}$) с соответствующими показателями достоверности $d_{X^j}[\alpha_{k_j}^j] \in D^{(j)}$ », (доменные компоненты π -кванта разделяются запятыми);

2) выбирающий π -квант 0-го уровня

$$\pi k_0 \alpha = V_k^P[\alpha_1 | d_A[\alpha_1], \alpha_2 | d_A[\alpha_2], \dots, \alpha_p | d_A[\alpha_p]] = \alpha_k | d_A[\alpha_k], \quad (8)$$

$\alpha \in S$, $\pi k_0 \in Q_\pi$ с семантикой: «из p -мерной совокупности ${}^\pi A$ наблюдаемых нечетких значений признаков выбрано значение α_k с показателем достоверности $d_A[\alpha_k] \in D^{(k)}$ »; $D^{(k)} \subseteq D$;

3) *характеристический π -квант 1-го уровня*

$$\pi k_1 \beta = \chi_{Y_j}(\alpha_k^j | d_{Y_j}[\alpha_k^j]) = \begin{cases} 1, & \text{если } (\alpha_k^j | d_{Y_j}[\alpha_k^j]) \in {}^\pi Y_j, \\ 0, & \text{если } (\alpha_k^j | d_{Y_j}[\alpha_k^j]) \notin {}^\pi Y_j \end{cases} \quad (9)$$

с семантикой: «значение α_k^j j -й характеристики ОГП в данный момент наблюдается с показателем достоверности $d_{Y_j}[\alpha_k^j] \in D$, если значение характеристической функции $\chi_{Y_j} = 1$, и не наблюдается, если $\chi_{Y_j} = 0$ », где

${}^\pi Y_j = \{(\alpha_k^j | d_{Y_j}[\alpha_k^j])\}$ — нечеткое множество зарегистрированных значений j -го признака ОГП, а χ_{Y_j} — характеристическая функция множества ${}^\pi Y_j$;

$\pi k_1 \in Q_\pi$; $\beta \in S$; D — множество значений функции достоверности $d_M[\bullet]$.

Итак, выражения (7), (8) и (9) определяют множество πK_T терминальных π -квантов знаний в рассматриваемой A_π -задаче:

$$\pi K_T = \{\pi k_0 \gamma, \pi k_0 \alpha, \pi k_1 \beta\}. \quad (10)$$

Определение 5. Алгоритмические конструкции, получаемые из компонентов множества πK_T (10) путем конечного числа применений к ним П-оператора, $CON(\bullet)$ — оператора и $CON[\bullet]$ — оператора [1], называются разноуровневыми πk -знаниями, т.е. приближенными квантами знаний. Класс πk -знаний, образуемый по определению 5, назовем стандартным классом нечетких РАКЗ-моделей представления знаний, используемых для автоматизированного принятия *приближенных* решений.

Заметим, что на основе использования πK_T (10), П-оператора, $CON(\bullet)$ -оператора и $CON[\bullet]$ -оператора, определяются π -кванты 0-го, 1-го и 2-го уровней аналогично определениям в [1]. По аналогии с пространством четких МАКЗ-моделей ОГП [1] можно построить пространство *нечетких* РАКЗ-моделей ОГП вида

$${}^\pi X^n = {}^\pi X_1 \times {}^\pi X_2 \times \dots \times {}^\pi X_n \quad (11)$$

либо в квантовом виде:

$${}^{\pi}B^n = {}^{\pi}B_1 \times {}^{\pi}B_2 \times \dots \times {}^{\pi}B_n \quad (12)$$

для описания фактов и нечетких закономерностей.

Произвольный интервальный π -квант знаний 1-го уровня $\pi k_1 Y$ будем описывать согласно правилам Π_{π} в (1) векторной домензированной структурой, содержащей показатель достоверности $d_Y [\bullet]$ лишь той компоненты домена, которая отмечена символом «1».

При алгебраическом описании πk -знаний предикатными нечеткими РАКЗ-моделями (например, π -квант $\pi k_1 Y$) будем использовать конечный предикат в виде нечеткой элементарной конъюнкции (НЭК) нечетких выражений

$$x_j \in {}^{\pi}Z \subset {}^{\pi}X_j, \quad 1 \leq j \leq n \quad (13)$$

с семантикой: «признак x_j ОНР принимает значение из нечеткого подмножества ${}^{\pi}Z$ нечеткого множества ${}^{\pi}X_j$ ». Такой предикат истинен с заданным показателем достоверности $d_Z[\bullet]$ только на элементах соответствующего нечеткого интервала ${}^{\pi}I$ данного пространства нечетких РАКЗ-моделей ОНР.

Пример 1. Интервальный π -квант знаний 1-го уровня

$$\pi k_1 Y = \left[\begin{array}{c} \overbrace{0, \llbracket d_{X^1}[\alpha_2^1], 0, \llbracket d_{X^1}[\alpha_4^1], \llbracket d_{X^2}[\alpha_1^2], \llbracket d_{X^2}[\alpha_2^2], 0,}^{x_1} \\ \underbrace{\llbracket d_{X^3}[\alpha_1^3], 0, 0, \llbracket d_{X^4}[\alpha_1^4], \llbracket d_{X^4}[\alpha_2^4]}_{x_4} \\ \underbrace{\phantom{\llbracket d_{X^3}[\alpha_1^3], 0, 0, \llbracket d_{X^4}[\alpha_1^4], \llbracket d_{X^4}[\alpha_2^4]}}_{x_3} \end{array} \right] = \llbracket d_Y \quad (14)$$

с семантикой: «признак x_1 исследуемого ОНР принимает 2-е или 4-е значение из нечеткого множества ${}^{\pi}X^{(1)} = \{1, 2, 3, 4\}$ с соответствующими показателями достоверности $d_{X^{(1)}}[\alpha_2^1]$ и $d_{X^{(1)}}[\alpha_4^1]$; признак x_2 — 1-е и 2-е значения из ${}^{\pi}X^{(2)} = \{1, 2, 3\}$ с показателями достоверности $d_{X^{(2)}}[\alpha_1^2]$ и $d_{X^{(2)}}[\alpha_2^2]$; целевой признак x_3 определен однозначно 1-м значением из множества ${}^{\pi}X^{(3)} = \{1, 2, 3\}$ с достоверностью $d_{X^{(3)}}[\alpha_1^3]$; сведения о признаке x_4 неясны, так как наблюдаются 1-е или 2-е его значения из двух возможных ${}^{\pi}X^{(4)} = \{1, 2\}$ », описывает наблюдаемый факт с показателем достоверности π -кванта $\pi k_1 Y$, равным d_Y . Здесь d_Y есть значение функции достоверности всего π -кванта знаний, которое вычисляется по определенным правилам из Π_{π} (1) как степень достоверности некоторого следствия отно-

сительно *целевого* признака в зависимости от показателей достоверности значений нецелевых признаков. Как правило, во внутреннем (машинном) представлении вычисляемое значение d_Y достоверности заключения в π -кванте помещается в $(n+1)$ -м специальном пассивном домене, а j -й домен целевого признака перемещается на место n -го домена. Пусть, например, в π -кванте (14) *целевым* является признак x_3 (т.е. $x_n = x_3$). Тогда с очевидными упрощениями π -квант (14) в машинном представлении станет 5-ти доменным (5-й домен поименован $Y_{\text{вых}}$) и запишется так:

$$\pi k_1 Y = \left[\begin{array}{c} \overbrace{0, 2|d_{X^{(1)}}[2], 0, 4|d_{X^{(1)}}[4]}^{x_1} : \overbrace{1|d_{X^{(2)}}[1], 2|d_{X^{(2)}}[2], 0}^{x_2} : \\ \overbrace{1|d_{X^{(4)}}[1], 2|d_{X^{(4)}}[2]}^{x_4} : \overbrace{1|d_{X^{(3)}}[1], 0, 0}^{x_n = x_3} : \overbrace{1|d[Y]}^{Y_{\text{вых}}} \end{array} \right], \quad (15)$$

что является векторным представлением нечеткой РАКЗ-модели πk -знаний с видоизмененной семантикой: «ЕСЛИ ОПР обладает 2-м значением признака x_1 с показателем достоверности $d_{X^{(1)}}[2]$ ИЛИ 4-м значением с $d_{X^{(1)}}[4]$ И 1-м значением с $d_{X^{(2)}}[1]$, ИЛИ 2-м значением с $d_{X^{(2)}}[2]$ признака x_2 , И 1-м значением с $d_{X^{(4)}}[1]$, ИЛИ 2-м значением с $d_{X^{(4)}}[2]$ признака x_4 , то целевой признак x_3 будет иметь 1-е значение с $d_{X^{(3)}}[1]$, гарантируемое вычисленным по заданной схеме рассуждений заключительным показателем достоверности $d[Y]$ π -кванта знаний с именем Y ». Как видим, π -квант $\pi k_1 Y$ содержит логическую комбинацию посылок с показателями достоверности относительно значений признаков x_1, x_2, x_4 , от которых зависит вычисляемый показатель достоверности $d[Y]$ заключения относительно целевого признака $x_n = x_3$. Методика вычисления $d[Y]$ изложена в подразд. 2.4.

Легко видеть, что матричное представление нечетких РАКЗ-моделей πk -знаний 2-го уровня можно получить с помощью CON[*]-оператора [1], связывающего совокупность π -квантов 1-го уровня как частных логических свидетельств связкой ИЛИ, которая отражает независимость частных свидетельств младшего уровня.

Пример 2. Для описания нечетких импликативных закономерностей r -го ранга между признаками ОПР используются соответствующий *векторный* либо *матричный* π -кванты по методике в [1]. Так, запретный π -квант 1-го уровня $\pi k_1 \overline{Y_\omega}$, описывающий, например, нечеткую имплика-

тивную связь 3-го ранга между признаками x_1 , x_2 , и x_3 ОПР $\omega \in \Omega$, представляется нечеткой векторной РАКЗ-моделью вида

$$\pi k_1 \bar{Y}_\omega = \left[\frac{x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad Y_{\text{вых}}}{\|d_{X^{(1)}}[1]:0,3\|d_{X^{(1)}}[3]:0,0,0,0,5\|d_{X^{(2)}}[5]:0,2\|d_{X^{(3)}}[2]:0\|d[Y]} \right] \quad (16)$$

с семантикой: «не существует ОПР ω с достоверностью $d_{\bar{Y}}$, который, обладая 1-м значением с $d_{X^{(1)}}[1]$ ИЛИ 3-м значением с $d_{X^{(1)}}[3]$ признака x_1 И, обладая 5-м значением с $d_{X^{(2)}}[5]$ признака x_2 , не обладал бы 2-м значением с $d_{X^{(3)}}[2]$ целевого признака x_3 ». Показатель достоверности $d[\bar{Y}]$ π -кванта (16) также вычисляется по методике, изложенной в подразд. 2.4.

2.3. Предикатные РАКЗ-модели представления π -квантов знаний

С помощью алгебры конечных предикатов представим, например, π -квант (15), описывающий некоторый факт, нечеткой предикатной РАКЗ-моделью. Пусть $\pi k_1 Y$ (15) конъюнкт. Тогда ему соответствует НЭК вида

$$\pi k_1 Y = (x_1 \in \{\alpha_1^1 | d_{X^{(1)}}[\alpha_1^1], \alpha_4^1 | d_{X^{(1)}}[\alpha_4^1]\} \wedge \wedge (x_2 \in \{\alpha_1^2 | d_{X^{(2)}}[\alpha_1^2], \alpha_2^2 | d_{X^{(2)}}[\alpha_2^2]\} \wedge (x_3 \in \{\alpha_1^3 | d_{X^{(3)}}[\alpha_1^3]\})) \cdot \quad (17)$$

Заметим, что в (17) отсутствует компонента с признаком x_4 , поскольку соответствующее нечеткое подмножество значений

$${}^\pi Z_4 = X^{(4)} = \{\alpha_1^4 | d_{X^{(4)}}[\alpha_1^4], \alpha_2^4 | d_{X^{(4)}}[\alpha_2^4]\}.$$

Далее, НЭК (17) представим предикатным уравнением и получим π -квант в аналитическом виде

$$\pi k_1 Y = \left[((x_1 = \|d_{X^{(1)}}[1]) \vee (x_1 = 4 \|d_{X^{(1)}}[4])) \wedge \wedge ((x_2 = \|d_{X^{(2)}}[1]) \vee (x_2 = 2 \|d_{X^{(2)}}[2])) \wedge (x_3 = \|d_{X^{(3)}}[1]) \right] = \|d_Y \quad (18)$$

либо (с упрощением) в виде нечеткой предикатной РАКЗ-модели во внутреннем представлении:

$$\pi k_1 Y = [(x_1 = \|d_{X^{(1)}}[1], 4 \|d_{X^{(1)}}[4]) \bullet (x_2 = \|d_{X^{(2)}}[1], 2 \|d_{X^{(2)}}[2]) \bullet (x_3 = \|d_{X^{(3)}}[1])] = \|d_Y, \quad (19)$$

где символ « \bullet » означает конъюнкцию, а символ « \vee » — дизъюнкцию; символы $1|d_Y$ и $1|d[Y]$ указывают на истинность предиката с вычисленным показателем достоверности $d[Y]$ по методике, изложенной в подразд. 2.4.

Запретный π -квант (16) из примера 2, описывающий имплицативную связь 3-го ранга между признаками x_1, x_2, x_3 , представим эквивалентной четкой предикатной РАЗ-моделью во внутреннем представлении:

$$\pi k_1 \bar{Y}_\omega = \left[\begin{array}{l} (x_1 = 1|d_{X^{(1)}}[1], 3|d_{X^{(1)}}[3]) \bullet (x_2 = 5|d_{X^{(3)}}[5]) \rightarrow \\ \rightarrow \neg(x_3 = 2|d_{X^{(3)}}[2]) = 0|d[Y] \end{array} \right], \quad (20)$$

где символы $0|d[\bar{Y}]$ указывают на ложность предиката с вычисляемой достоверностью $d[\bar{Y}]$ π -кванта $\pi k_1 \bar{Y}_\omega$, по методике, рассмотренной в подразд. 2.4.

Таким образом, решение поставленной A_π -задачи завершено.

2.4. Методика алгоритмизации приближенных рассуждений : помощью π -квантов знаний

Под *приближенными рассуждениями* будем понимать цепочку алгоритмических действий, обеспечивающих формирование заключения и вычисления показателя достоверности π -кванта знаний на основании посылочной информации, содержащейся в его доменах. Следовательно, семантика приближенных рассуждений в произвольном π -кванте структурируется по схеме импликации:

$$\langle \text{доменная логическая комбинация посылок } E \rangle \rightarrow \langle \text{заключение } C \text{ в выходном домене} \rangle \quad (21)$$

согласно правилам из Π_π (1).

Предлагаемая методика сводится к указанию процедур алгоритмизации формирования заключения C и определения показателя достоверности $d[\bullet]$ π -кванта либо системы π -квантов различных уровней на основании содержимого их логической комбинации посылок E (21) с учетом заданных посылочных показателей достоверности и четырех ограничений.

Первое ограничение состоит в том, что мы рассматриваем показатель достоверности $d[E]$, принадлежащий интервалу $[-1, \dots, 0, \dots, +1]$, как грубое приближение к вероятности.

Второе ограничение состоит в том, что сложные схемы логических рассуждений строятся на основе комбинаций простых импликаций со связками «И», «ИЛИ», «НЕ» либо посредством множества независимых посы-

лок (как в матричном π -кванте 2-го уровня), поддерживающих одно или несколько заключений.

Третье ограничение заключается в определении показателя достоверности $d[Y]$ всего π -кванта знаний по формуле (правило комбинирования из Π_π)

$$d[Y] \equiv d[\text{заключения}] = d[\text{посылки}] \times d[\text{импликация}] = d[C] = d[E] \times d[\rightarrow]. \quad (22)$$

Четвертое ограничение: произвольный π -квант представляет собой динамическую порцию πk -знаний за счет его способности резервирования доменов и расширения по мощности, зависящей от числа доменов и их компонентов; при этом величина $d[Y]$ (22) π -кванта с именем Y зависит от его динамики.

Простейшей логической комбинацией является конъюнкция (И) между двумя элементарными свидетельствами с семантикой:

«ЕСЛИ (e_1 И e_2), ТО (C)» .

Здесь величину показателя достоверности посылки $d[e_1 \text{ И } e_2]$ примем равной величине достоверности *наименее надежной* из посылок, т.е.

$$d[e_1 \text{ И } e_2] = \min(d[e_1], d[e_2]). \quad (23)$$

Для логической комбинации дизъюнкции (ИЛИ) двух элементарных свидетельств с семантикой:

«ЕСЛИ (e_1 ИЛИ e_2), ТО (C)» (24)

принимая показатель достоверности посылки $d[e_1 \text{ ИЛИ } e_2]$, определяемый по формуле:

$$d[e_1 \text{ ИЛИ } e_2] = \max(d[e_1], d[e_2]). \quad (25)$$

Дизъюнкцию можно представить в виде двух или нескольких самостоятельных свидетельств, поддерживающих одно и то же заключение (что не всегда допустимо). Например, для дизъюнктивной комбинации рассуждений:

«ЕСЛИ (e_1 ИЛИ e_2 ИЛИ e_3), ТО (C)» считаем самостоятельными посылками e_1 , e_2 и e_3 , а показатель достоверности общего заключения $d[c]$ определим по формуле:

$$d[c] = d[e_1] + d[e_2] + d[e_3] - d[e_1] \cdot d[e_2] - \\ - d[e_1] \cdot d[e_3] - d[e_2] \cdot d[e_3] + d[e_1] \cdot d[e_2] \cdot d[e_3]. \quad (26)$$

Здравый смысл здесь состоит в том, что три показателя достоверности преобразуются в один, больший каждого в отдельности, но не превышающий 1. Пусть *заключение* π -кванта Z поддерживается множеством заключе-

ний π -квантов Y_1, Y_2, \dots, Y_N с соответствующими показателями достоверности (ПД): $d[Y_1], d[Y_2], \dots, d[Y_N]$. Тогда общий ПД $d[Z]$ π -кванта Z определяется формулой

$$d[Z] = d[Y_1] + \dots + d[Y_N] - d[Y_1] \cdot d[Y_2] - \dots - d[Y_1] \cdot d[Y_N] + \dots + (-1)^N d[Y_1] \cdot d[Y_2] \dots d[Y_N] = \sum_{i=1}^N d[Y(i)] - \sum_{i_1 < i_2} d[Y(i_1)] \cdot d[Y(i_2)] + \dots + (-1)^N d[Y(i_1)] \cdot d[Y(i_2)] \dots d[Y(i_N)]. \quad (27)$$

Заметим, что показатель достоверности (ПД) $d[\bullet]$ — это артефакт приближенных рассуждений на основе π к-знаний. Нет иного доказательства правомерности изложенного способа манипулирования семантикой π -квантов кроме того, что этот способ прост и соответствует здравому смыслу.

Напомним, что $d[\bullet] \in [-1, \dots, 0, \dots, +1]$. Следовательно, *во-первых*, в случаях отрицания атомарных посылок (т.е. посылок, которым предшествует связка «НЕ»), например, с семантикой: «ЕСЛИ (НЕ e) ТО (c)», для вычисления ПД $d[\bar{e}]$ используется простая формула

$$d[\bar{e}] = -d[e], \quad (28)$$

что соответствует вероятностной схеме

$$p(\text{НЕ } e) = -p(e).$$

Во-вторых, процедура получения композиции показателей достоверности в условиях поддержки двумя π -квантами Y_1 и Y_2 одного и того же заключения в π -кванте Z должна выполняться по следующим формулам:

$$\text{если } d[Y_1] > 0 \text{ и } d[Y_2] > 0, \text{ то} \\ d[Z] = d[Y_1] + d[Y_2] - d[Y_1] \cdot d[Y_2]; \quad (29)$$

$$\text{если } d[Y_1] < 0 \text{ и } d[Y_2] < 0, \text{ то} \\ d[Z] = d[Y_1] + d[Y_2] + d[Y_1] \cdot d[Y_2]; \quad (30)$$

если отрицателен какой-либо из ПД $d[Y_1]$ либо $d[Y_2]$, то

$$d[Z] = \frac{d[Y_1] + d[Y_2]}{1 - \min(\text{abs}(d[Y_1]), \text{abs}(d[Y_2]))}, \quad (31)$$

В частности, когда $d[Y_1] = +1$, а $d[Y_2] = -1$, то $d[Z] = 0$.

Легко заметить, что когда два π -кванта с небольшими показателями достоверности поддерживают одно заключение, то ПД $d[Z]$ заключения *возрастает*. Если же знаки не совпадают, то результат определяется небольшим ПД, но влияние его несколько ослабляется. И, наконец, *третье* дополнительное ограничение состоит в различении *обратимых* и *необратимых* заключений в соответствующих π -квантах. Если π -квант сохраняет свою правильную семантику, когда и посылка, и заключение отрицаются, то π -квант называется *обратимым* (*rev*) π -квантом. Если π -квант теряет смысл при отрицании посылки и заключения, то π -квант называется *необратимым* (*prev*) π -квантом. Если π -квант *обратимый*, то в рабочем состоянии он применим к любому ПД посылки. Если же π -квант *необратимый*, то он работает *только* при *положительных* значениях ПД посылки. В случае *отрицательного* значения ПД посылки *необратимый* π -квант применять нельзя, т.к. он противоречив и подлежит исключению из цепочки рассуждений.

3. Выводы

1. Сформулирована и решена A_π -задача формализации нечетких знаний (π -квантов), которые в частном случае при степени достоверности 1 вырождаются в четкие t -кванты (tk -знания), на базе векторно-матричного и предикатного представления новых РАКЗ-моделей, обеспечивающих эффективное векторное манипулирование декларативными и процедурными знаниями при выводе решений в условиях неопределенности.

2. Разработана методика алгоритмизации приближенных рассуждений для синтеза π -квантовых сетей вывода приближенных знаниеориентированных решений при недостатке данных.

Список литературы: 1. Сироджа И.Б. Математическое и программное обеспечение интеллектуальных компьютерных систем: Учеб. пособие. Харьков: ХАИ, 1992. 101 с. 2. Сироджа И.Б. Теория и новая информационная технология принятия производственных решений на основе инженерии знаний // Информатизация та нові технології. 1996. № 3. С. 6—10. 3. Сироджа И.Б., Петренко Т.Ю. Знаниеориентированная информационная технология поддержки принятия решений в малом и среднем бизнесе // Труды 3-й Международной науч.-практ. конф. «Информационные ресурсы: создание, интеграция и использование». 25 февр.—1 марта 1996 г. Гута Ивано-Франк. обл, с. 132—136. 4. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М.: Наука. 1981. 204 с.

Поступила в редколлегию 08.12.97



УДК 519.7

Н.А. ГВОЗДИНСКАЯ, З.В. ДУДАРЬ, Ю.П. ШАБАНОВ-КУШНАРЕНКО

О МАТЕМАТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ СМЫСЛА ТЕКСТОВ ЕСТЕСТВЕННОГО ЯЗЫКА

С изобретением паровой машины человечество в XVII столетии вступило в эпоху *первой научно-технической революции*, которая характеризуется интенсивным изучением физических процессов и созданием технических средств для их искусственного воспроизведения. С изобретением ЭВМ в середине текущего столетия началась *вторая научно-техническая революция* (первая же не прекратилась, она продолжается), которая характеризуется интенсивным изучением информационных процессов и созданием технических средств для их искусственного воспроизведения. Результатом первой научно-технической революции стала механизация физического труда людей, результатом второй — механизация умственного труда. Технические системы, механизующие умственный труд людей, получили название *систем искусственного интеллекта*. Они стали главным средством искусственного воспроизведения информационных процессов.

Термин “искусственный интеллект” не следует понимать слишком буквально: современные технические системы, обрабатывающие информацию, во многих отношениях уступают по своим интеллектуальным возможностям разуму человека. Важнейшим недостатком искусственного интеллекта, существенно ограничивающим сферу его практического использования, является неспособность машины понимать человеческую речь и, как следствие, невозможность смысловой обработки ею текстов естественного языка. Хотя все люди свободно владеют естественным языком, однако они не знают, как им это удастся, и потому не могут передать машине эту свою важнейшую интеллектуальную функцию. Успешное изучение механизма языка и его адекватное математическое описание, в особенности разработка эффективного метода формального описания смысла (значения) текстов, создали бы научную базу для освоения машиной естественного языка, и, в конечном итоге, привели бы к коренному усовершенствованию систем искусственного интеллекта.

Считается, что процесс понимания текстов естественного языка пока не поддается формализации. Язык характеризуется как “колдовское действо” [1, с.33]. Для эффективного проникновения в механизм языка нужен какой-то принципиально новый подход к его изучению, который видится в сравнении естественного языка с языком математики. Основанием к этому

служит предположение о существовании глубокой аналогии, близкого родства между этими двумя языками. Математический язык, в отличие от естественного, хорошо формализован, его механизм понятен. Он создавался не стихийно сам по себе, а целенаправленно отдельными людьми и поэтому весь на виду. Если гипотеза о наличии глубокой аналогии между этими двумя языками оправдается, тогда можно будет найти ответы на многие трудные вопросы, касающиеся механизма естественного языка, обращаясь за подсказкой к языку математики.

Приступая к изучению механизма языка, часто начинают с вопроса: “Что такое смысл предложения?”. И вопрос этот так и остается без ответа. Здесь мы попытаемся на него ответить, обращаясь за подсказкой к языку математики. Математические тексты, как и тексты естественного языка, состоят из предложений. Предложения, фигурирующие в математических текстах, называют высказываниями. Зададимся вопросом: “Что такое смысл высказывания?” Ответить на него нетрудно: как известно, *смыслом высказывания* является функция зависимости истинностной переменной от предметных переменных этого высказывания. Любое высказывание бывает либо истинным или ложным. Если высказывание истинно, то ему приписывают значение 1, называемое *истиной*; если ложно — то значение 0, называемое *ложью*. Образует множество $\Sigma = \{0, 1\}$, его элементы называются *логическими*. *Истинностной* называется переменная ξ , определенная на множестве Σ . Говорят, что переменная $\xi \in \Sigma$ принимает *истинностные значения* 0 и 1. В роли *предметных* могут выступать любые переменные, которые используются в математике и встречаются в ее текстах.

Рассмотрим, например, высказывание “ $x+y=z$ ” (а), где x, y, z — предметные переменные, под которыми в данном случае понимаются переменные, определенные на множестве $N = \{0, 1, 2, \dots\}$ всех неотрицательных целых чисел. В таком виде высказывание (а) ни истинно, ни ложно. Но если подставить в него вместо переменных x, y, z какие-нибудь их конкретные значения из множества N , то высказывание (а) обратится в истину или ложь. Пусть, к примеру, $x=2, y=3, z=5$. Тогда высказывание (а) обращается в *тавтологию* $2+3=5$, и говорят, что оно *истинно*. Если же принять $x=0, y=1, z=2$, то это же высказывание обратится в *противоречие* $0+1=2$, в этом случае говорят, что оно *ложно*. Мы видим, что высказывание (а) включает в себе некоторую функцию $\xi = f(x, y, z)$, отображающую множество N^3 в множество Σ . Функции с двоичными значениями, зависящие от произвольных аргументов, называются *функциями истинности* или *предикатами*. Итак, смыслом математического предложения (высказывания) является предикат $\xi = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$, представляющий собою зависимость истинно-

стной переменной ξ от предметных переменных x_1, x_2, \dots, x_m этого высказывания. Любое математическое утверждение представляет собой уравнение вида $f(x_1, x_2, \dots, x_m) = 1$, которое задает вполне определенное отношение, связывающее между собою предметные переменные x_1, x_2, \dots, x_m [2]. Важно отметить, что такая трактовка смысла высказывания в математике общепринята, никаких сомнений в ее правильности ни у кого не возникает. Математик рассматривает каждое высказывание как формулу, а любая формула, в чем он твердо убежден, всегда выражает какую-то функцию и ничего более. Именно для выражения функций и были придуманы формулы математиками. Высказывание же всегда выражает некоторую функцию с двоичными значениями, таким образом его смыслом (значением) служит вполне определенный предикат.

Мы рассмотрели, что представляет собой смысл математического предложения. Теперь, руководствуясь гипотезой о близком родстве естественного и математического языков, предположим, что такая трактовка смысла применима и к предложениям естественного языка (мы имеем в виду только повествовательные предложения). Иными словами, мы исходим из того, что смыслом каждого предложения естественного языка служит некоторый предикат. А если это так, то к каждому предложению естественного языка должно быть применимо понятие истинностной переменной с ее двумя значениями "истинно" и "ложно". Проверяем этот вывод на практике. Берем какое-нибудь предложение естественного языка, например "На столе лежит книга". Взятое само по себе, оно ни истинно, ни ложно. Но если его соотнести с какой-нибудь реальной ситуацией, то предложение, и в самом деле, становится истинным или ложным.

Справедливость последнего утверждения продемонстрируем следующим экспериментом. Исследователь, обращаясь к испытуемому, произносит предложение: "На столе лежит книга". В роли испытуемого может выступать любой человек, владеющий русским языком. В тот момент, когда исследователь произносит слово "стол", он указывает на некоторый предмет (назовем его первым); когда же проговаривает слово "книга", указывает на второй предмет. Предметы выбираются исследователем произвольно: они не обязательно должны быть столом и книгой. Исследователь просит испытуемого определить, соответствует содержание предложения фактическому положению дела или нет; иначе говоря, он предлагает ему установить, истинно или ложно в данной конкретной ситуации предъявленное предложение. Ясно, что если первый предмет есть стол, а второй — книга, и второй, к тому же, лежит на первом, то испытуемый даст положительный ответ; если же хотя бы одно из этих условий не выполняется (например, второй предмет — это тетрадь, или же — книга, но не лежащая на столе, а

стоящая в шкафу), тогда испытуемый ответит отрицательно. Итак, мы видим, что в данном вопросе гипотеза о близком родстве естественного и математического языков себя оправдывает: оказывается, что понятие истинностной переменной к предложениям естественного языка применимо, подобно тому как оно применимо к предложениям языка математического.

Движемся дальше. Если смыслом предложения естественного языка, действительно, служит предикат, то в предложениях должны присутствовать не только истинностные, но также и предметные переменные. Проверим, так ли это на самом деле. Берем предложение “На столе лежит книга”. Ищем в нем предметные переменные. Но их там нет! Что же делать? Отказаться от принятой нами гипотезы, а значит и от задачи математического описания смысла текстов естественного языка? Не будем торопиться с этим. Воспользуемся известным принципом: “Факты не подтвердили нашу гипотезу? Тем хуже для фактов!” Разберемся более тщательно, о чем говорят факты. Они свидетельствуют лишь о том, что предметных переменных нет в *тексте* предложения. Но текст предложения — это еще не само предложение, это — всего лишь его запись. Предложение характеризуется не только текстом, но и своим *смыслом*, оно выражает некоторую мысль. А мысль находится в уме человека. Есть ли гарантия того, что все детали смысловой стороны предложения выражены его текстом? Такой гарантии, конечно же, нет. Известно, что в текстах естественного языка очень широко используются сокращения (к ним относятся, например, эллипсис, анафора и омография). Математические выражения тоже пишутся в сокращенной форме [2]. Не исключено, что в тексте предложения предметные переменные просто, для краткости, опущены. А в мысли, выражаемой предложением, предметные переменные, быть может, и отыщутся.

Поищем предметные переменные в мысли, соответствующей предложению “На столе лежит книга”. Достаточно нацелить себя на решение такой задачи, и она сразу же решается: предметные переменные тот час же обнаруживаются сами собой. Фактически ими мы уже оперировали, когда рассматривали эксперимент на испытуемом. В нем исследователь указывал на два предмета, причем каждый из них он выбирал произвольно, т.е., на самом деле, там речь шла не только о предметах, но и о предметных переменных. Обозначим последние символами x и y . Когда исследователь указывает испытуемому конкретные предметы (например, какой-то стол и какую-то тетрадь), он приписывает переменным x и y определенные значения. Можно ли записать предложение в более развернутой форме так, чтобы в нем появились предметные переменные? Да, можно. И это совсем нетрудно сделать. Выглядеть теперь оно будет следующим образом: “Предмет x есть стол, предмет y есть книга, предмет y лежит на предмете

х". Очевидно, что в такой, более подробной, записи предложение выражает ту же самую мысль, что и его краткая исходная запись. Ясно, что каждый человек, устанавливающий, истинно или ложно некоторое предложение, для решения этой задачи будет вынужден обратиться к предметным переменным этого предложения и заместить их конкретными предметами из некоторой вполне определенной ситуации. Текст предложения естественного языка мы можем рассматривать как формулу (записанную, как мы только что убедились, в сокращенной форме), которая выражает некоторый предикат. По ней человек вычисляет истинностное значение предложения при заданных значениях его предметных переменных.

Итак, мы видим, что гипотеза о тесном родстве естественного и математического языков снова себя оправдала. С ее помощью мы обнаружили в предложении естественного языка не только истинностную переменную (о чем науке уже давно было известно), но также и не замеченные никем (если полагаться на выполненный нами анализ литературных источников) до сих пор предметные переменные. В результате подтвердилось предположение, что предложение естественного языка является, как и математическое высказывание, носителем некоторого предиката, представляющего собой зависимость истинностной переменной предложения от его предметных переменных. Этот предикат мы и примем в качестве формального эквивалента смысла предложения естественного языка. Резюмируя все, сказанное выше, мы приходим к выводу, что в непреступной стене, преграждавшей путь машине к освоению ею человеческого языка, теперь образовалась брешь. Заглянув в нее, мы видим, что в понятии смысла предложения естественного языка нет ничего таинственного: смысл каждого предложения представляется нам только предикатом, значения которого определяются значениями его предметных переменных. Мы видим, что предложения естественного языка, как и математические утверждения, в содержательном плане представляют собой отношения — и ничего сверх этого. Оговоримся, однако, что сделанный вывод — это пока не более, чем сугубо предварительное заключение, вынесенное на основании лишь беглого взгляда на открывшуюся новую безбрежную (как нам представляется) область исследований. Если наши предположения оправдаются, то в дальнейшем предстоит планомерное изучение смысла текстов естественного языка с целью его математического описания, направляемое гипотезой о наличии глубокой аналогии между естественным и математическим языками.

Утверждение о том, что смысл любого предложения естественного языка и текста, образованного из предложений, можно исчерпывающим образом формально выразить некоторым вполне определенным предикатом, порождает массу возражений и вопросов. С их рассмотрением мы и

начнем разработку семантической теории естественного языка. Одно из главных возражений состоит в следующем. Если каждое предложение имеет свой единственный смысловой предикат, то как могут существовать многозначные предложения, например предложение “Какой стол, такой и стул”, имеющее два смысловых значения? Ответ, в сущности, очень прост: многозначность предложения проистекает исключительно из-за того, что его текст записан в излишне сокращенной, а потому — и неполной, форме. Возьмем, к примеру, рассматривавшееся нами ранее математическое высказывание “ $x+y=z$ ” и “сократим” его, исключив из его записи знак $+$. В результате получим запись “ $x y=z$ ” с пропущенным знаком операции. Ее можно понимать по-разному: как прежнее высказывание, как “ $xy=z$ ” или “ $x-y=z$ ”, или еще каким-то иным. Математик никогда не согласится принять такую сокращенную запись за само высказывание. Он скажет, что запись высказывания многозначна из-за своей неполноты, поэтому невозможно установить точно, что это за высказывание. Можно лишь говорить о его возможных вариантах. Смысл высказывания можно будет определить однозначно лишь после уточнения его текста.

Представляется, что правильный подход к изучению проблемы многозначности смысла предложения естественного языка состоит в четком разграничении двух понятий: текста предложения и мысли (или мыслей), выражаемой им. Текст предложения может быть многозначным, но каждая из выражаемых им мыслей всегда единична. Иногда случается, что многозначность в текст предложения вводят преднамеренно, как в случае с вышеприведенной фразой. Это значит, что таким предложением хотят выразить одновременно несколько мыслей (в данном случае — две, в одной из них речь идет о мебели, в другой — о питании, из-за чего фраза приобретает юмористический оттенок). Мы обнаруживаем, что каждому предложению соответствует, вообще говоря, не одна мысль, а целое их множество (в частности, если предложение однозначно, то это множество будет одноэлементным, если противоречиво, то — пустым). Будем однозначные предложения и тексты в дальнейшем называть *высказываниями*, заимствуя этот термин из математики (каждое математическое высказывание однозначно). Примером естественно-языкового высказывания может служить использованное нами ранее предложение: “Предмет x есть стол, предмет y есть книга, предмет z лежит на предмете x ”. Предстоит большая работа по созданию методов поиска всех высказываний, охватываемых каждым конкретным предложением, и записи их смысла (единственного для каждого высказывания) на формальном языке.

Возьмем фразу “На столе лежит книга”. Она включает в себе много смысловых вариантов. Один из них мы уже рассмотрели ранее. Рассматри-

ваем другой вариант. Он отличается от первого тем, что теперь исследователь, предъявляя испытуемому ту же фразу, указывает ему только первый предмет. Если этот предмет не стол, то испытуемый отреагирует отрицательным ответом, а если стол, то посмотрит, лежит ли на нем хотя бы одна книга. Если *да*, он скажет, что высказывание истинно, а если *нет*, то — ложно. Полный смысловой перевод фразы теперь получается несколько иным: “Предмет x есть стол, и существует предмет y такой, что предмет y есть книга, и предмет y лежит на предмете x ”. Есть и третий вариант, когда исследователь указывает только на второй предмет. Полный смысл фразы в этом случае запишется в виде: “Предмет y есть книга, и существует предмет x , такой, что предмет x есть стол, и предмет y лежит на предмете x ”. Если же исследователь, предъявляя все ту же фразу, не указывает ни одного из предметов, тогда испытуемый будет вынужден обратиться к четвертому смысловому варианту: “Существуют предметы x и y такие, что предмет x есть стол, предмет y есть книга, и предмет y лежит на предмете x ”. Чтобы определить истинностное значение этого высказывания, испытуемый должен обзреть ситуацию, например, комнату, в которой проводится эксперимент (исследователь еще до начала опытов обязан четко очертить ситуацию, в которой будет действовать испытуемый), выявить все наличные в ней столы, и, если хотя бы на одном из них лежит, по крайней мере, одна книга, отреагировать положительным ответом, в противном случае — отрицательным. Итак, мы видим, что предложение “На столе лежит книга” содержит в себе четыре различных высказывания. Это предложение играет роль *неполной записи* для данных высказываний. Каждое из этих высказываний выражает единственную заключенную в нем мысль и представляет собой ее *полную запись*. Мы видим, что, кроме таких, известных в языкознании, причин многозначности предложения, как эллипсис, анафора и омография, есть и еще одна — отсутствие предметных переменных в тексте предложения.

Незаметно, как бы между прочим, мы научились записывать *естественно-языковые высказывания*, т.е. однозначные в смысловом отношении тексты естественного языка. Этого удалось достичь введением в текст предложения предметных переменных. Нам представляется, что это — существенное достижение. (Вопрос о том, является данное предложение высказыванием или нет, решается с помощью эксперимента на испытуемом. Если, отправляясь от предъявленного ему предложения, испытуемый своим поведением воспроизводит для любой конкретной ситуации единственный предикат, то такое предложение является высказыванием, если нет, то — не является). Но в том виде, в котором тексты высказываний нам удавалось до сих пор записывать, они обладают серьезным недостатком: им

еще очень далеко до полной формализации, поскольку записываются они все на том же естественном языке. Правда, в текстах высказываний появились вкрапления математической символики в виде предметных переменных. Такие тексты понимает человек, но не сможет понять машина (слово “понять” в данном случае означает: выразить смысловой предикат высказывания в виде чисто математической формулы без использования в ней каких бы то ни было естественно-языковых единиц).

Двигаться в направлении полной формализации записи высказывания можно, постепенно заменяя в ней элементы естественного языка на математические выражения. Процесс этот не может продолжаться бесконечно, рано или поздно он должен исчерпаться. И тогда мы получим полностью формализованную запись высказывания, которая будет доступна пониманию машины. Сейчас мы сделаем еще один шаг в этом направлении. Рассмотрим высказывание: “Предмет x есть стол, предмет y есть книга, предмет y лежит на предмете x ”. Оно легко расчленяется на три высказывания: “Предмет x есть стол”, “Предмет y есть книга”, “Предмет y лежит на предмете x ”. Каждое из этих высказываний имеет свой смысл, а значит, — и свой предикат. Обозначим предикат первого высказывания символом $\text{стол}(x)$, второго — $\text{книга}(y)$, третьего — $\text{лежит на}(y, x)$. Записи стол , книга , лежит на теперь выступают в роли имен каких-то предикатов, а каких именно мы еще не знаем. Ясно, что предикат исходного высказывания можно представить в виде конъюнкции этих трех предикатов. Смысл исходного высказывания теперь запишется в виде $\text{стол}(x) \wedge \text{книга}(y) \wedge \text{лежит на}(y, x)$. Хотя до полной формализации текста этого высказывания все еще далеко, тем не менее, некоторое продвижение вперед имеется. Последняя запись уже похожа на формулу: видно, что ею выражается какой-то предикат. Вместе с тем, она легко воспринимается и как само высказывание: по ней можно без труда восстановить исходный текст высказывания. Нелишне заметить, что запись высказывания в результате перехода к словам-предикатам существенно сократилась: теперь она стала лишь немного длиннее первоначальной фразы “На столе лежит книга”. Она, в отличие от последней записи, имеет единственный смысл. Полная формализация данного текста высказывания будет достигнута, если удастся избавиться в нем от словесного материала стол , книга и лежит на , заменив его математическими выражениями.

Но это не предел того, что можно легко сделать уже сейчас для формализации текста. Предикат $\text{лежит на}(y, x)$ можно подвергнуть дальнейшему расчленению. Введем предикат $\text{лежит}(y)$, понимаемый в смысле “Предмет y лежит”, и предикат $\text{на}(y, x)$, соответствующий высказыванию “Предмет y

расположен на предмете x ". Ясно, что предикаты **лежит** на(y, x) и **лежит**(y) \wedge на(y, x) совпадают. Допускает дальнейшее расщепление и предикат **лежит**(y). Его можно представить в виде конъюнкции предикатов **настоящее время**(y) и **лежать**(y). Первый предикат означает: "Предмет y наблюдается в текущий момент времени", второй — "Предмету y присуще состояние лежания" (безотносительно ко времени). Соединяя конъюнкцией все введенные предикаты, записываем рассматриваемое высказывание в виде: **стол**(x) \wedge **книга**(y) \wedge **настоящее время**(y) \wedge **лежать**(y) \wedge на(y, x). Двигаться дальше в анализе смысловой структуры данного высказывания мы пока не будем. Чтобы это осуществить, надо будет проникнуть в смысловую структуру слов "стол", "книга", "настоящее время", "лежать" и "на". Для этого можно обратиться к толковому словарю, выразив смысл каждого из этих слов с помощью приведенных в нем определений, в роли которых выступают словосочетания, составленные из других слов. Когда этот процесс оборвется, нужно собрать слова, оставшиеся невыраженными, и связать их друг с другом системой высказываний, воспринимаемых носителями естественного языка как истинные. Эта система высказываний выполняет роль аналога системы аксиом, определяющих первичные понятия математики. А в языке она абстрактно определяет смысл слов, которые не удастся выразить с помощью прямых определений через другие слова.

Список литературы: 1. *Звегинцев В.А.* Предложение и его отношение к языку и речи. — Изд-во Моск. ун-та, 1976. 305с. 2. *Бондаренко М.Ф., Дударь З.В., Шабанов-Кушнаренко Ю.П.* Отношения как предмет формульного описания // АСУ и приборы автоматки. Вып. 107. С. 94—103.

Поступила в редколлегию 16.12.97

УДК 519.687

В.А. ГРЕБИННИК, В.Н. ШЕВЕЛИН

ПРОГРАММНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Одним из наиболее приоритетных направлений в разработке программного обеспечения, относимого к классу «программ с элементами искусственного интеллекта», было и есть создание экспертных систем, ориентированных на работу в самых различных предметных областях. Обычно работа с ЭС представляет собой формирование запросов к ЭС в форме, доступной для восприятия ее блоком анализа запросов. Разработчики ЭС стремятся максимально приблизить язык запросов к естественному, точнее к тому его подмножеству, которое соответствует данной предметной области. Тем более, что такие подмножества отличаются достаточно высокой степенью формализации, что существенно упрощает анализ. Следует отметить, что независимо от конкретной предметной ориентации ЭС, начальные этапы анализа запросов, составленных на языке, близком к естественному, имеют много общего, так как основная задача на данном этапе — расшифровать структуру запроса и определить значения ключевых элементов языковой конструкции, посредством которой выражен запрос. Однако зачастую при разработке ЭС все ее компоненты, включая и блок анализа запросов, пишутся с нуля. Поэтому весьма важной и актуальной является задача создания программно-технологического комплекса (ТК) проектирования и реализации ЭС. Такие технологические комплексы существуют и называются генераторами ЭС [1]. Настройка генератора ЭС на конкретную ЭС осуществляется базой знаний (БЗ). При этом используется только одна модель представления знаний из логической, сетевой или фреймовой моделей [2]. Процесс создания ЭС с помощью таких генераторов весьма эффективен, но сама ЭС в большинстве случаев получается неэффективной, негибкой для модификации, а ее БЗ — трудной для построения. Такая ситуация возникает, на наш взгляд, из-за практически полного устранения процедурных элементов из процесса проектирования. Мы полагаем, что введение процедурных фрагментов в проектирование ЭС позволит повысить эффективность спроектированных ЭС, их гибкость, а использование нескольких моделей представления знаний будет содействовать этому процессу.

ТК проектирования и реализации ЭС (ТКПиРЭС) должен строиться из программных “заготовок” - компонентов, которые можно соединять между собой, настраивать изменением каких-либо декларативных и процедурных

элементов. Спроектированная с помощью ТК экспертная система должна обязательно транслироваться, и полученный модуль есть уже готовая к использованию ЭС. Продуктивность такого подхода подтверждена экспериментально, например существует система проектирования сложных программных систем Delphi фирмы Borland Int. [3].

Основными компонентами ТКПиРЭС являются механизмы анализа языковых конструкций, баз знаний, логического вывода, всевозможных интерфейсов. Возможно их соединение в любой комбинации. Мы структурировали знания на лингвистические, предметной области (области экспертизы), знания принятия решений. Каждой модели знаний соответствует своя компонента в ТКПиРЭС.

Как мы отметили выше, одной из основных компонент является "языковый процессор" (ЯП). Эта компонента состоит из других компонент и строится по тому же принципу, что и ТКПиРЭС. ЯП путем настройки становится транслятором некоторого конкретного языка. Повышению гибкости и эффективности процесса проектирования, способствует то, что ЯП не является жесткой программной заготовкой, настраиваемой только декларативными элементами, а позволяет использовать фрагменты процедурного подхода, жестко ограниченные структурными рамками, то есть процедуры являются компактными и локальными. Таким образом, разработка универсальной анализирующей системы, которую можно было бы настраивать на конкретный предметный язык, позволит сократить объем работы, сопутствующей разработке ЭС

До сих пор средства построения систем, ориентированных на анализ языковых конструкций, ограничивались в основном классом программ, именуемых «компиляторами компиляторов». Наибольшую известность получила программа Ласс, которая распространена в вузах как практическое пособие по изучению курсов «Проектирование трансляторов» и родственных ему. Она сочетает в себе простоту в использовании для человека, знакомого с программированием, и предоставляет средства, достаточные для описания несложных языков с высокой степенью формализации, таких как языки программирования. Однако для языков менее формализованных, с достаточно емкими базовыми словарями средств Ласс'а для разрешения конфликтов явно не хватает, в основном из-за трудностей в учете контекстной информации, важность которой возрастает со снижением формализации анализируемого языка. Кроме того, высокой остается доля работ, связанных с описанием семантики языка — система Ласс не предлагает для этих целей никаких средств, кроме кодирования ее на языке С. Поэтому необходимо выработать основные концепции такой организации ЯП, кото-

рая позволила бы с минимальными затратами создавать системы, анализирующие сложные слабо формализованные языки.

В классическом варианте построения ЯП анализ языковой конструкции делится на два этапа — лексический и синтаксический анализ [4]. Целесообразность такого подхода не вызывает сомнений, так как только лексический анализ не способен выделить необходимый для адекватного восприятия смысла языковой конструкции (ЯК) объем информации, а для проведения синтаксического анализа ЯК, принадлежащей сложному языку с большим количеством словоформ, нужна поистине гигантская база знаний.

Назначение лексического анализатора — выделить во входной языковой конструкции известные словоформы (лексемы) и установить значения некоторых атрибутов лексем. В качестве основы лексического анализатора требуется выбрать систему, которая будет сочетать в себе ряд качеств, определяющих простоту и эффективность ее использования:

- простоту расширения словаря лексем как за счет добавления одиночных лексем, так и за счет слияния имеющихся словарей лексем;
- возможность полной детерминизации процесса анализа до уровня синонимов, что позволит применять высокоэффективные беступиковые алгоритмы анализа;
- простота и компактность хранения словаря лексем;
- возможность оптимизации набора управляющих правил (продукций) с целью уменьшения необходимых объемов памяти и повышения скорости анализа.

Наиболее перспективен механизм лексического анализа — базовые сети переходов — при ближайшем рассмотрении могут интерпретироваться как реализация при помощи конечных автоматов (КА) расширенных регулярных выражений (РРВ). Учитывая простоту лексического анализа при применении алгоритма, моделирующего КА и наличие математического аппарата, позволяющего проводить слияние КА, детерминизировать и оптимизировать их, а также широкие возможности расширенных регулярных выражений при описании лексики, в качестве основы описания лексики используются РВ, а ее анализ базируется на КА. Кроме того, нами разрабатывается аппарат, основанный на ассоциативной привязке множества переходов к конкретной лексеме, что позволит использовать для описываемых языков словари очень большого объема.

Имеется возможность выделения части семантики на этапе лексического анализа, что может быть полезно для получения некоторой дополнительной информации о конкретном содержании лексемы (например, вычислении атрибутов). Для этого необходимо создание расширяемой библиотеки процедур с унифицированным интерфейсом, причем при описании лек-

стики любому переходу между состояниями КА может быть поставлена в соответствие любая из библиотечных процедур. Такой механизм лексического анализа будем именовать семантическим конечным распознавателем.

Для описания лексики языка необходимо выработать язык записи расширенных регулярных выражений, который включал бы в себя помимо средств описания РРВ некоторые дополнения, позволяющие управлять процессом формирования словаря лексем для данного языка, а также правилами вычисления атрибутов лексем. Кроме того, ориентируясь на концепцию дружелюбности интерфейса, необходимо предоставить пользователю, конструирующему ЯП, более наглядные средства для составления описаний лексем. Их целесообразно выполнить в виде надстроек, позволяющих формировать описание лексем, к примеру, путем заполнения полей в специальных диалоговых окнах, что избавит пользователя от необходимости вручную включать в файл описания лексики ключевые директивы и разделители. Более подробно требования к инструментальным средствам конструктора ЯП, касающиеся формирования словаря лексем, рассмотрим в соответствующем разделе.

Второй этап анализа языковой конструкции — синтаксический анализ. Синтаксический анализатор определяет структуру языковой конструкции, то есть наличие и тип смысловых связей между отдельными лексемами. Основные требования к синтаксическому анализатору схожи с требованиями к лексическому:

- желательное применение полностью детерминированных методов разбора, что позволит применять высокопроизводительные беступиковые алгоритмы анализа;
- возможность модификации синтаксических БЗ путем добавления единичных правил и слияния с существующими БЗ;
- простота и наглядность представления правил о синтаксисе.

Синтаксический анализ базируется на системе формального вывода, называемой грамматикой. Полный вывод в грамматике — это получение цепочек терминальных символов, исходя из аксиомы, с помощью продукций. Наиболее продуктивные методы вывода найдены для контекстно-свободных (КС) — грамматик. При конструировании грамматики, описывающей некоторый язык, с каждой продукцией может быть связан некий семантический эквивалент. Во первых, нетерминальный символ является формальным отражением некоторой сущности реального мира, которой оперирует язык и грамматика. Во вторых, с продукцией может быть связана некоторая процедура, выполняющая семантические преобразования. Процедура может быть выражена специальным действием, записываемым в фи-

гурных скобках, и который становится одним из символов цепочки α в (3). В этом случае грамматика записывается как

$$G=(VT, VN, VD, P, S), \quad (1)$$

где VD — алфавит символов действия;
 P — множество продукций вида $A \rightarrow \alpha$, где

$$\alpha \in (VT \cup VN \cup VD)^* \quad (2)$$

Грамматика (1) называется транслирующей грамматикой. Символы действия, являясь процедурами, должны иметь параметры-аргументы процедуры. В качестве таких аргументов используются атрибуты — специальные символы, приписываемые символу действия. Эти атрибуты получают свои значения от других атрибутов, приписанных к другим символам из цепочки α в (2). Так мы получаем атрибутные транслирующие грамматики, где каждому символу могут быть приписаны специальные переменные-атрибуты, обменивающиеся между собой значениями.

Будем считать, что результатом синтаксического анализа является синтаксическое атрибутное дерево языковой конструкции. Значение атрибутам присваивается путем обхода этого дерева по некоторым правилам, приписанным к каждой продукции. То есть продукция типа (5) состоит из собственно продукции и приписанных к ней правил присваивания значений атрибутам ее символов.

Часто атрибуты, которые получают свои значения снизу-вверх по синтаксическому дереву, называют синтезируемыми, а сверху вниз — наследуемыми. Имеются две основные стратегии вывода в грамматике: свертка и развертка соответственно — $w \Rightarrow^* S$, $S \Rightarrow^* w$. При развертке мы имеем значения наследуемых атрибутов на каждом шаге вывода, а при свертке — значения синтезируемых атрибутов.

Из существующего множества механизмов анализа после некоторого количества опытов по ряду причин была выбрана контекстно-свободная атрибутная транслирующая грамматика с расширенными средствами устранения недетерминизма. Для эффективного ведения анализа применяется метод разбора сверткой (снизу вверх). Применение этого метода позволит обойтись при анализе только синтезируемыми атрибутами, что само по себе снизит трудоемкость анализа из-за отсутствия необходимости дополнительного просмотра дерева вывода с целью вычислить значения некоторых атрибутов, а кроме того, при наличии средств однозначного выбора на каждом шаге применяемой продукции (расширенных средств устранения недетерминизма), позволит полностью детерминизировать процесс анализа.

Под расширенными средствами устранения недетерминизма подразумевается совокупность нестандартных средств, позволяющих обойти неизбежно возникающие при синтаксическом анализе достаточно сложного языка случаи недетерминизма. К ним относятся: дополнительные условия проверки применимости каждой продукции на основе атрибутивной информации; средства управления стратегией вывода (назначения приоритетов продукциям) в зависимости от контекстной информации; применение специального вида нетерминальных символов, именуемых условными символами.

Подробнее о сущности каждого из этих средств. Первые представляют собой ничто иное как условия, накладываемые на атрибуты символов, стоящих в правой части продукции. Данные условия вычисляются всякий раз, когда правая часть продукции полностью соответствует анализируемой строке. Невыполнение любого из таких условий запрещает применение данной продукции.

Например, мы определяем известное понятие многочлена продукцией

$$\langle \text{МНОГОЧЛЕН} \rangle \rightarrow \langle \text{ОДНОЧЛЕН} \rangle \langle \text{ОДНОЧЛЕН} \rangle | \langle \text{ОДНОЧЛЕН} \rangle \langle \text{МНОГОЧЛЕН} \rangle, \quad (3)$$

где $\langle \text{ОДНОЧЛЕН} \rangle \rightarrow \langle \text{ЗНАК} \rangle \langle \text{СПИСОК СОСТАВЛЯЮЩИХ} \rangle$
 $\langle \text{ЗНАК} \rangle \rightarrow + | - \quad (4)$

Продукция (3) должна существовать только в том случае, если выбранная компонента правой части первой альтернативы ОДНОЧЛЕН и МНОГОЧЛЕН из правой части второй альтернативы как строки символов начинаются с + или -. Чтобы удовлетворить это требование, сделаем продукции атрибутивными :

$$\begin{aligned} \langle \text{МНОГОЧЛЕН} \rangle a &\rightarrow \langle \text{ОДНОЧЛЕН} \rangle a_1 \langle \text{ОДНОЧЛЕН} \rangle a_2 \\ \langle \text{МНОГОЧЛЕН} \rangle a &\rightarrow \langle \text{ОДНОЧЛЕН} \rangle a_1 \langle \text{МНОГОЧЛЕН} \rangle a_2 \\ \langle \text{ОДНОЧЛЕН} \rangle a &\rightarrow \langle \text{ЗНАК} \rangle a_1 \langle \text{СПИСОК СОСТАВЛЯЮЩИХ} \rangle a_2 \end{aligned} \quad (5)$$

Припишем теперь каждой продукции из (5) правила присваивания значения атрибутов и правила существования продукций (там где они есть). При этом мы считаем, что значениями атрибутов являются строки из символов, представляющих собой запись компонентов одночлена и многочлена.

1. $\langle \text{МНОГОЧЛЕН} \rangle a \rightarrow \langle \text{ОДНОЧЛЕН} \rangle a_1 \langle \text{ОДНОЧЛЕН} \rangle a_2$
 $f: \text{if } a_2(1) = ' + ' \vee ' - ' \text{ then } f := \text{true else } f := \text{false}$
 $a \leftarrow \text{conc}(a_1, a_2)$
2. $\langle \text{МНОГОЧЛЕН} \rangle a \rightarrow \langle \text{ОДНОЧЛЕН} \rangle a_1$

- (6)
- <МНОГОЧЛЕН>a2
- f : if $a2(1) = ' + ' \vee ' - '$ then $f := \text{true}$ else $f := \text{false}$
- $a \leftarrow \text{conc}(a1, a2)$
3. <ОДНОЧЛЕН>a \rightarrow <ЗНАК> a1 <СПИСОК СОСТАВЛЯЮЩИХ>a2
- $a \leftarrow \text{conc}(a1, a2)$

Продукции 1, 2 из (9) имеют два правила. Первое устанавливает условия существования продукции (если $f = \text{true}$), второе присваивает значение атрибуту a как результат конкатенации двух строк, являющихся значениями атрибутов $a1$ и $a2$ соответственно.

Средства управления стратегией вывода присутствуют и в системе Jacc в виде назначения приоритетов правилам вывода, однако там они задаются константно, то есть значения этих приоритетов невозможно изменить в процессе анализа. Такой подход достаточен, если необходимо всего лишь установить приоритет выполнения арифметических операций, но для некоторых приложений он непригоден. Предлагается рассчитывать приоритеты продукции как функции от текущего контекста, что достигается введением дополнительных процедурных элементов. Естественно, что рассчитываться значения этих функций будут только для продукции, между которыми возник конфликт на очередном шаге вывода.

Условные символы представляют собой элемент анализа более высокой степени абстрактности, чем просто нетерминалы. Условный символ представляет собой шаблон для нетерминалов определенного класса и включается в дерево вывода в случае, если на данном шаге вывода нет достаточного количества информации для выбора конкретного нетерминала из этого класса. По сути дела он является «заглушкой» в дереве вывода, конкретное значение которой вычисляется при получении нужной контекстной информации (во время применения какой-либо другой продукции, в теле которой имеется соответствующее присваивание). Применение условных символов во многих случаях позволит избежать перебора в процессе анализа из-за недостаточно определенного контекста на конкретном шаге вывода.

Рассмотрим пример введения условных символов в продукции грамматики. В естественном языке имеются предложения типа

ПОДЛЕЖАЩЕЕ СКАЗУЕМОЕ ДОПОЛНЕНИЕ,

такие как

“Водитель ведет автобус”.

(7)

В некоторой грамматике мы без труда построим продукции :

<ПРЕДЛОЖЕНИЕ>->

<ПОДЛЕЖАЩЕЕ><СКАЗУЕМОЕ><ДОПОЛНЕНИЕ>

<ДОПОЛНЕНИЕ><СКАЗУЕМОЕ><ПОДЛЕЖАЩЕЕ>

$$\begin{aligned} \text{ПОДЛЕЖАЩЕЕ} &\rightarrow \langle \text{СУЩЕСТВИТЕЛЬНОЕ} \rangle t_1 \\ \langle \text{ДОПОЛНЕНИЕ} \rangle &\rightarrow \langle \text{СУЩЕСТВИТЕЛЬНОЕ} \rangle t_2 \end{aligned} \quad (8)$$

(11) должно иметь значение “Именительный падеж”, t_1 — любой падеж, кроме именительного. Вторая альтернатива продукции 1 в (8) выбрана с тем

$$\text{“Автобус ведет водитель”} \quad (9)$$

С помощью продукций (8) мы не сможем сделать анализ предложений (8) и (9), так как знания о падежах не четкие:

Водитель — именительный или винительный падеж, Автобус — именительный или винительный падеж.

Для устранения недетерминизма мы должны в продукцию (1) из (8) ввести некоторое решающее правило. Но и этого мало, если мы будем вести анализ сверткой. Продукции (2), (3) из (8) задают нам необратимую грамматику. И на этом шаге анализа введенное нами правило в продукции 1 мало чем может помочь. Здесь мы вводим условный символ X :

$$\begin{aligned} \langle \text{ПРЕДЛОЖЕНИЕ} \rangle &\rightarrow X t_1 \langle \text{СКАЗУЕМОЕ} \rangle q X t_2 \\ X t &\rightarrow \langle \text{СУЩЕСТВИТЕЛЬНОЕ} \rangle t_1 \end{aligned} \quad (10)$$

Снабдив (10) правилами будем иметь :

$\langle \text{ПРЕДЛОЖЕНИЕ} \rangle \rightarrow X t_1 \langle \text{СКАЗУЕМОЕ} \rangle q X t_2$
 f — для глагола “ведет” при одинаковых падежах t_1 и t_2 (именительный, винительный) в качестве подлежащего выбираем живое существо или автоматическое средство управления; в качестве дополнения — транспортное средство.

$$\begin{aligned} 2. X t &\rightarrow \langle \text{СУЩЕСТВИТЕЛЬНОЕ} \rangle t_1 \\ t &\rightarrow t_1 \end{aligned} \quad (11)$$

В результате введения условного символа нам удалось избежать недетерминизма, но за счет ведения правила, оперирующего семантическими значениями языковых конструкций.

Таким образом, продукция применяемой для синтаксического анализа грамматики будет иметь вид:

$$\langle \text{НЕТЕРМИНАЛ} \rangle \rightarrow \alpha,$$

где $\alpha \in (VT \cup VN \cup VD \cup V_{\text{усл}})^*$ и каждый символ может иметь атрибуты. С продукцией связаны правила :

- правила получения значений атрибутами;
- отношения между значениями атрибутов (дополнительные условия применимости продукции);
- правила получения значений условными символами}.

В левой части продукции расположен определяемый продукцией нетерминальный символ, правая часть разделена на три фрагмента: тело продукции (шаблон, определяющий принципиальную возможность применения данной продукции — последовательность терминальных, нетерминальных и условных символов, которая заменяется в строке вывода определяемым нетерминалом), транслирующую часть (символы действия представляют собой имена стандартных или определенных пользователем процедур, выполняемых при применении данной продукции) и пространство расчета атрибутов (здесь производится вычисление значений атрибутов, дополнительных условий, значений условных символов).

На значениях атрибутов остановимся подробнее. В качестве единственного формата данных для их хранения используется строковый тип, так как при помощи последовательности символов можно записать любую информацию. Требуемая гибкость при работе с атрибутами достигается использованием пополюемой пользователем библиотеки функций обработки строк.

В результате применяемая нами грамматика может быть описана указанием алфавитов терминальных, нетерминальных и условных символов, используемых в ее продукциях, перечнем продукций, описывающих правила синтаксиса языка и необязательным фрагментом управления стратегией вывода, определяющим приоритеты продукций в зависимости от контекстной информации.

Список литературы: 1. *Перспективы развития вычислительной техники: Справ. пособие* / Под ред. Ю.М.Смирнова. Кн.2. Интеллектуализация ЭВМ: Е.С.Кузин, А.И.Ройтман, И.Б. Фоминых, Г.Хахалин. М.: Высш. шк. 1989. 159 с. 2. *Представление и использование знаний* / Х.Уэно, Т.Кояма, Т.Окамото и др. М.: Мир, 1989. 220 с. 3. *Конопка Рэй. Искусство создания мощных программных компонент в Delphi* / Пер. с англ., К: НИПФ "Диасофт", 1996. 4. *Ахо А.В., Ульман Д.Д. Теория синтаксического анализа, перевода и компиляции.*: В 2-х т. / Пер. с англ. М.: Мир, 1978.

Поступила в редколлегию 23.10.97

М.С. КИПРИЧ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗНАНИЙ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМ

Среди современных методов и средств повышения эффективности обучения наиболее перспективным является использование в учебном процессе обучающих систем на базе ЭВМ [1,6,7]. Существующие обучающие системы чрезвычайно многообразны, что позволяет классифицировать по множеству различных признаков [6]. Отсутствие строго формализованного подхода к представлению знаний приводит к неполноте излагаемого материала и снижению адаптивности системы, и, как следствие, — к ее узкой специализации. Одно из решений этой проблемы — информационные модели предметной области в виде когнитивных концептуальных структур, что позволяет существенно повысить качество обучения благодаря мощным базам знаний (БЗ), отражающим реальные связи между объектами проблемной области [1,3,7].

Отсутствие строгих методов моделирования знаний ставит задачу разработки процедуры наполнения базы знаний обучающей системы и использования БЗ при обучении с введением дополнительных средств контроля. При построении обучающих систем необходимо учитывать психологические особенности организации человеческой памяти для лучшего усвоения материала, поэтому структура базы знаний должна отражать когнитивные особенности представления знаний, т.е. быть иерархической. Входными данными являются знания, которые необходимо формализовать для БЗ обучающей системы. Результат использования данной процедуры, — иерархическая БЗ интеллектуальной обучающей системы.

Когнитивный подход к моделированию обучения подразумевает разработку методов и моделей знаний, аналогичных имеющимся в человеческом восприятии [1]. Обучение — это сложный и многогранный процесс, который исследуют философы, психологи, педагоги, когнитологи. По мнению психологов для обучения важна способность человека анализировать окружающий мир и свою деятельность, воспринимая их как набор отдельных элементов и связей между ними [1, 2]; воспринимать и запоминать понятия об объектах окружающего мира, их свойствах (в первую очередь существенных, т.е. функциональных) и их взаимосвязях. Психологи считают, что понятийные знания — основа абстрактного мышления [2] (Под понятийными знаниями будем понимать "абстрактные образы классов объектов и связей между ними, в которых отра-

жаются наиболее существенные свойства этих классов объектов и связей реальной действительности” [3].)

Приобретение понятий и расстановка связей между ними называется когнитивным моделированием [1]. Обучаясь, человек строит концептуальную модель проблемной области. Исследование и разработка принципов моделирования произвольной предметной области показывают возможность, необходимость и достаточность моделирования системы понятий как основы базовой концептуальной модели предметной области любой дисциплины, в виде иерархической (в первую очередь родо-видовой) классификации понятий [2,3,4]. Классификации позволяют моделировать понятийные знания различных, в том числе слабоструктурированных, предметных областей, что дает возможность использовать классификации для эффективного представления знаний. Немаловажным аргументом в пользу применения классификаций для обучения основам любой дисциплины является то, что знания человека (по данным психологов) организованы иерархически, то есть такая модель знаний наиболее приемлема для человека.

Одним из методов обучения с использованием интеллектуальных обучающих систем с базами знаний, основанными на концептуальных классификационных сетевых структурах, является ознакомление обучаемого с классификациями, подготовленными и введенными в систему, а затем проведение контроля знаний обучаемого с помощью тех же классификаций с последующими индивидуальными и общими рекомендациями по продолжению обучения.

Можно выделить такие основные режимы работы обучающей системы:

1. Заполнение базы знаний экспертом-преподавателем. Необходимо определить, какими существенными свойствами обладают ее объекты и построить классификации всех объектов и их свойств учебной дисциплины. При этом следует учесть, что рассмотрение ситуационных свойств может привести к появлению “нестественности” в построении многоаспектной классификации.

2. Обучение и контроль усвоения учебного материала: ознакомление обучаемого с классификациями, заложенными в базу знаний обучающей системы с использованием нескольких ракурсов рассмотрения (подробнее об этом см. ниже). При контроле от обучаемого требуется воспроизведение знаний в виде фрагментов изученных классификаций, а “близость” между классификациями обучаемого и исходными классификациями определяет правильность усвоения информации.

Основными структурными элементами многоаспектных естественных классификаций будем считать понятия, их свойства (функциональные, т.к. построение естественных классификаций основывается на принципе функциональности объектов) и отношения “род-вид”, “объект-свойство”, “свойство-объект”. Эксперт-преподаватель наполняет базу знаний обучающей системы по

се структурным элементам: понятие; род понятия; свойства понятия; плоскости классификации понятия (или основания деления понятия на виды); виды понятия по каждому из оснований деления; видовое отличие понятия, причем сначала нужно указать предметную область, модель которой будет отражена в базе знаний.

На основании вышесказанного алгоритм наполнения базы знаний можно свести к определению последовательности заполнения элементов выбранной структуры знаний. Учитывая перечисленные проблемы, предложим такие этапы моделирования системы понятий:

- выделение в исследуемой предметной области понятий об объектах, понятий об отношениях между объектами, свойствах объектов и отношений и др.;
- построение взаимосвязанных классификаций понятий и определение способа представления составных понятий;
- составление полного описания элементов модели и механизма присоединения блока логического вывода, основанного на правилах отражения предметной области.

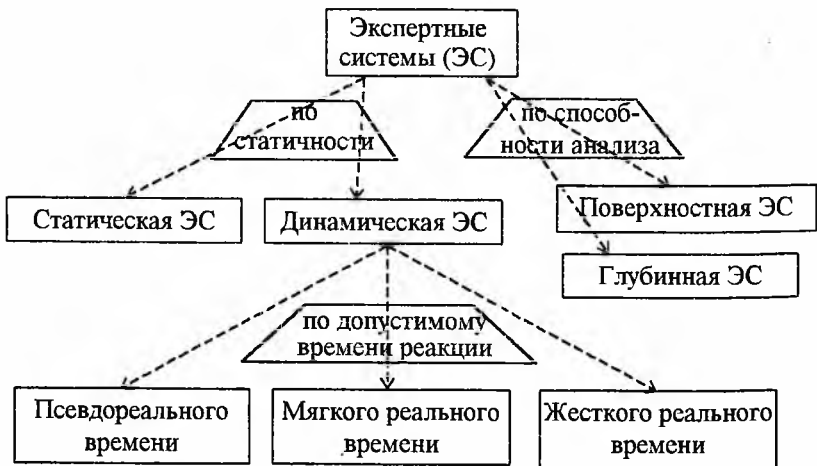
Подробно рассмотрим построение взаимосвязанных классификаций. Первый этап заключается во введении новых — исходных — понятий заданной области знаний с помощью указания их имен и определений [5]. Первым к исходным понятиям причисляется основное понятие, классификация которого занимает центр области знаний (дисциплины). Наименование этого понятия может совпадать с названием области знаний. Записывает понятия в класс исходных эксперт как в начале работы, так и по мере их появления в процессе работы как результат определения свойств классифицируемых понятий. Необходимо учесть, что исходным не является понятие, которое может быть получено из уже имеющихся. Например, при построении модели области “Экспертные системы”, исходным будет понятие “Экспертные системы”. Исходные понятия — вершины классификаций, связь между которыми устанавливается при пополнении базы знаний системы. Для фрагмента классификации “Экспертные системы” (ЭС) введем следующие понятия: “Статические ЭС”, “Динамические ЭС”. Далее выбираем текущее понятие (“Динамическая ЭС”) и определяем его свойства, которые могут отражать особенности внутренней структуры, особенности функционирования и т.д. Функциональным свойством для выбранного понятия является “работающая в динамической проблемной области, т.е. в динамической предметной области или решающая динамические задачи”.

Следующий шаг — это определение видов понятия (например, “Динамические ЭС”, которое можно назвать родовым понятием). “ЭС псевдо-реального времени”, “ЭС жесткого реального времени” и “ЭС мягкого реального времени” — виды понятия “Динамические ЭС”. Сначала необходимо четко

сформулировать основание деления понятия, а затем определять его разновидности на основании установленного принципа деления (плоскости классификации). В данном случае плоскостью классификации является деление “по допустимому времени реакции”.

Получены новые понятия — виды родового понятия. Теперь необходимо установить их видовые отличия, т.е. признаки, присущие классам объектов, отраженным в каждом из видов (или то, что отличает объекты, принадлежащие к данному классу, от объектов другого класса, полученных с использованием того же основания деления [3]). Определение видовых понятий создается с использованием рода и видового отличия (так получаем самые распространенные определения — через ближайший род и видовое отличие [5]). ЭС псевдореального времени — это динамическая ЭС (род понятия), в которой не устанавливается значение допустимого времени реакции на события (существенное свойство динамической ЭС) [8]. Далее выбираем понятие, которое становится текущим и определяем его виды и т.д. Отметим, что в процессе формулировки видовых отличий и свойств классифицируемых понятий может возникнуть необходимость связи их с другими понятиями, которые, в свою очередь, также могут быть раскрыты по указанному алгоритму.

Для построения взаимосвязанных многоаспектных классификаций необходимо выделить все возможные плоскости классифицирования исходного понятия и для каждой плоскости построить одноаспектную классификацию по алгоритму. Построим фрагмент классификации “Экспертные системы” с использованием лишь 2 плоскостей (всего их 11):



Составные понятия определяются путем указания родовых понятий по всем плоскостям. “Экспертная система SIMER+MIR” (единичное конкретное понятие) — поверхностная статическая ЭС прогнозирующего и диагностического типа.

Для построения взаимосвязанных классификаций необходимо учитывать природу проблемной области — является ли она областью естественного происхождения или областью так называемой “второй” природы, т.е. содержащей искусственно созданные области и принципы выделения существенных свойств. При построении классификаций понятий и их существенных свойств иерархии объектов (объектов-понятий и объектов-свойств) будут аналогичными, т.к. плоскости классификации будут общими. Полное описание элементов модели достигается введением (при наличии возможностей аппаратной поддержки для наглядности понимания) понятий, ассоциирующихся с имеющимися, в виде графических изображений или текстового описания. Механизм установления ассоциативных связей рассматриваться подробно не будет, т.к. задача данной работы — построение иерархической модели проблемной области.

Немаловажным является контроль корректности заполнения базы знаний, т.к. одна из основных проблем автоматизированного приобретения знаний — слабая структурированность большинства предметных областей. Разработчикам интеллектуальной системы необходимо найти способ вербализации интуитивных знаний человека, помочь эксперту структурировать свои знания, и в режиме диалога составить модель предметной области, по возможности точно отражающую его (эксперта) представления.

Сформулируем свойства структурных элементов и правила заполнения базы знаний интеллектуальной системы. Следует иметь в виду, что информативность модели прямо пропорциональна четкости формулировки правил ее построения. Так как исследуемая модель представления знаний основана на взаимосвязанных многоаспектных классификациях, выделим ее уровни (каждый последующий формируется путем объединения структур предыдущего на основе определенных правил): понятие и его вид; понятие и группа его видов, полученных в результате классифицирования по одному признаку (плоскость классификации); группа плоскостей классификации одного понятия; многоаспектная классификация одного понятия; сетевая модель знаний, в основе которой лежат взаимосвязанные многоаспектные классификации.

Преимущество такой системы заключается в возможности использования рекурсивного алгоритма: корректность каждого уровня определяется правильностью построения предыдущего и соблюдением условий построения данного. Таким образом, для того, чтобы модель предметной области в

базе знаний с максимальной точностью отражала реальные связи между объектами, при вводе каждого нового уровня классификации необходимо проверять его правильность с использованием следующих критериев: в одной плоскости классификации видовые различия понятий должны исключать друг друга; в одной плоскости классификации сумма объемов видов должна составлять объем рода, объемы видов не должны пересекаться; плоскость классификации должна быть четко определена и включать классификацию только по одному признаку. В этом состоит суть работы блока текущего контроля корректности заполнения базы знаний.

Обучение — ознакомление человека с взаимосвязанными классификациями. При этом обучаемый знакомится не только с набором понятий, но и с отношениями между понятиями. Перед ним постепенно в процессе обучения открывается основная классификация (изначально считаем ее полностью для него закрытой). Порядок отображения классификации может быть произвольным, т.е. определяться обучаемым. В конце обучения перед ним откроется полная классификация. При обучении система должна предоставить возможность ознакомления с моделью предметной области с использованием нескольких ракурсов рассмотрения. Система понятий представляема в следующих формах: в стандартной форме (текстовой), когда имеется полная информация о текущем понятии (род, определение, свойства, плоскости классификации, видовые понятия и их видовые отличия, а также взаимосвязи с другими понятиями); в виде понятийной классификации, что дает возможность охватить нисходящую структуру выбранного понятия, которую составляют плоскости классификации и видовые понятия низших уровней; в форме активного словаря, что способствует формированию представления о полном составе понятий предметной области, а также обеспечивает быстрый поиск информации о необходимых понятиях.

Обучение сопровождается текущим контролем усвоения учебного материала. Ориентируясь на введенные в процессе разработки метода контроля корректности заполнения базы знаний уровни, следует проверять: определения понятия (таким образом обеспечивается контроль знания рода и видового отличия); виды понятия по каждой из изученных плоскостей классификации; свойства понятия. Знание определения понятия является основополагающим, т.к. способствует пониманию смысла, заложенного в понятие. Наиболее целесообразно проведение контроля после изучения каждой из плоскостей классификации понятий, что не только обеспечит проверку знаний определений понятий, но и даст возможность закрепить знания о видовом составе родового понятия с учетом использованной плоскости классифицирования.

Исследования теоретических основ и принципов построения концептуальной модели предметной области показали возможность и достаточность моделирования системы понятий как основы базовой концептуальной модели предметной области любой дисциплины. В данной работе описана процедура представления знаний с использованием концептуальных классификационных структур для интеллектуальных обучающих систем. Представленный алгоритм (процедура) использовался при разработке обучающей системы по курсу "Базы данных, знаний и экспертные системы", пригоден он и для других систем, основанных на знаниях.

Список литературы: 1. *Сельдмяз И.Я.* Знания (Когнитология). Таллинн: Эстираамат, 1987. 129 с. 2. *Соловьева Е.А.* Теория понятийных знаний: Учеб. пособие. М.: УМК ВО, 1990. 80 с. 3. *Искусственный интеллект: В 3 кн. Кн.1.* Системы общения и экспертные системы: Справочник / Под ред. Э.В. Попова. М.: Радио и связь, 1990. 468 с. 4. *Шрейдер Ю.А., Шаров А.А.* Системы и модели. М.: Радио и связь, 1982. 152 с. 5. *Савельев А.Я., Новиков В.А., Лобанов Ю.И.* Подготовка информации для автоматизированных обучающих систем: Метод. пособие для преподавателей и студентов вузов / Под ред. А.Я. Савельева. М.: Высш. шк. 1986. 176 с. 6. *Обучающие машины, системы и комплексы: Справочник / Под общ. ред. д-ра техн. наук проф. А.Я. Савельева.* К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. 303 с. 7. *Гаврилова Т.А.* Состояние и перспективы разработки баз знаний интеллектуальных систем // *Новости искусственного интеллекта.* 1996. №1. 8. *Попов Э.В.* Экспертные системы: Решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 88 с. (Проблемы искусственного интеллекта).

Поступила в редколлегию 05.11.97

СОДЕРЖАНИЕ

<i>М.Ф. Бондаренко, В.А. Чикина</i> О методе математического описания морфологических отношений и их схемной реализации.	3
<i>Н.А. Гвоздинская, З.В. Дударь, С.А. Пославский, Ю.П. Шабанов-Кушнарченко</i> О логических матрицах.	12
<i>Н.Г. Аксак, О.Г. Руденко, А. Штефан</i> Рекуррентный проекционный алгоритм идентификации при коррелированных помехах.	23
<i>С.Н. Каллун</i> Изучение цветовой индукции на базе компьютера.	28
<i>Д.О. Колесников, С.В. Костюк, С.Ю. Шабанов-Кушнарченко</i> Метризирующий предикат в конечномерном арифметическом пространстве и формулировка его основных свойств.	34
<i>М.Ф. Бондаренко, Е.В. Журавок, В.А. Чикина</i> Аппаратный метод решения системы логических уравнений.	43
<i>И.Ю. Панферова</i> Применение принципа вспомогательных задач к оптимизационным задачам с явными ограничениями.	48
<i>Н.В. Белоус, А.П. Выродов, И.Ю. Шубин</i> О некоторых алгоритмах построения виртуальных пространств.	52
<i>В.А. Мусийченко, Н.П. Мустецов</i> Вычислительный метод обработки корреляции между симптомами в медицинских базах знаний.	60
<i>С.А. Пославский, В.А. Походенко, С.Ю. Шабанов-Кушнарченко</i> Компараторная идентификация конечномерных линейных процессов.	64
<i>С.Г. Удовенко</i> Программная фильтрация в контурах адаптивного управления.	70
<i>Ф. Хюбенталь, А. Штефан</i> Оценка влияния погрешностей в задании параметров помех на точность идентификации.	75
<i>И.И. Зима</i> Использование модели абсолютно черного тела для объяснения феноменов биофизического обмена информацией и энергией.	79
<i>И.Ю. Панферова</i> Интеллектуальные процедуры построения технологических структур организационно-технологических комплексов.	85
<i>Н.В. Кривич, С.А. Марьин</i> Использование отношений с параметрами в метасемантических моделях.	92
<i>В.А. Мусийченко</i> Метод стимулирования продуктивного мышления на основе нечетких ассоциаций в медицине.	97
<i>О.А. Нестеренко</i> Опыт создания прототипа интеллектуальной информационной системы для поддержки принятия решений в области промышленной экологии.	101
<i>А.А. Гордеев, С.А. Марьин, А.В. Ткачук, А.В. Цымбал</i> Эвристические методы оптимизации резервирования в системах распределения ресурсов.	107
<i>Т.Ю. Петренко</i> Моделирование π -квантовых сетей нечетких рассуждений для вывода решений в условиях неопределенности.	115
<i>В.П. Авраменко, И.Д. Калачев, В.В. Калачева</i> Интеллектуальные процедуры принятия решений в условиях неопределенности.	124
<i>Т.Ю. Петренко, И.Б. Сироджа</i> Квантовые модели нечетких знаний для принятия приближенных решений при недостатке данных.	129
<i>Н.А. Гвоздинская, З.В. Дударь, Ю.П. Шабанов-Кушнарченко</i> Математическое описание смысла текстов естественного языка.	141
<i>В.А. Гребенник, В.Н. Шевелин</i> Программно-технологический комплекс для построения экспертных систем различного назначения.	150
<i>М.С. Киприч</i> Моделирование знаний для компьютерных обучающих систем.	159

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
ПРОБЛЕМИ БІОНІКИ**
Випуск 48
Російською мовсю

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ
ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ**
Выпуск 48

Редактори: Т.Л. Мельникова
О.І. Шпильова

Виконавець комп'ютерної верстки О.Г. Стопченко

Підп. до друку з оригіналу-макету 06.04.98. Формат 60×84¹/₁₆.
Папір офсет. Умов. друк. арк. 10,4. Умов. фарбо-відб. 10,7.
Обл.-вид. арк. 8,8. Тираж 100 пр. Зам. № **377** Ціна договірна.

Харківський державний технічний університет радіоелектроніки (ХТУРЕ).
Україна, 310726 Харків, просп. Леніна, 14.

Оригінал-макет підготовлено і збірник надруковано у видавництві ХТУРЕ.
Україна, 310726 Харків, просп. Леніна, 14.

УДК 519.7

О методе математического описания морфологических отношений и их схемной реализации / М.Ф. Бондаренко, В.А. Чикина. // Проблемы бионики. 1998. Вып. 48. С. 3—11.

Рассматривается схемная реализация закономерностей, лежащих в основе процесса словоизменения, в виде морфологических отношений. На примере полных непритяжательных имен прилагательных русского языка излагается новый метод решения указанной задачи.

Табл. 3. Ил. 5. Библиогр.: 3 назв.

УДК 519.7

Про метод математичного опису морфологічних відношень та їх схемної реалізації / М.Ф. Бондаренко, В.О. Чікіна // Проблеми біоніки. 1998. Вип. 48. С. 3—11.

Розглянута схемна реалізація закономірностей, які полягають в основі процесу словозміни, у вигляді морфологічних відношень. На прикладі повних неприсвійних прикметників російської мови викладено новий метод рішення вказаної задачі.

Табл. 3. Іл. 5. Бібліогр.: 3 назв.

UDC 519.7

On a method of the mathematical description of morphological relations and their circuit realization / M. Bondarenko, V. Chikina. // Problemy Bioniki. 1998. No. 48. P. 3—11.

The circuit realization of laws underlying the process of word changes, expressed as the morphological relations, is considered. On an example of complete unpossessive adjectives of Russian the new method of solving the specified task is described.

3 tab. 5 fig. Ref.: 3 titles.

УДК 510.62

О логических матрицах / Н.А. Гвоздинская, З.В. Дударь, С.А. Пославский, Ю.П. Шабанов-Кушнаренко // Проблемы бионики. 1998. Вып. 48. С. 12—22.

Введено понятие логической матрицы и показано, что для нее выполняются аксиомы логического поля. Рассмотрены основные операции над логическими матрицами и правила их транспонирования. Доказано, что обращение существует только для ортогональных логических матриц. Рассмотрена связь между операциями транспонирования и обращения.

Библиогр.: 3 назв.

УДК 510.62

Про логічні матриці / Н.А. Гвоздінська, З.В. Дударь, С.О. Пославський, Ю.П. Шабанов-Кушнаренко // Проблеми біоніки. 1998. Вип. 48. С. 12—22.

Введено поняття логічної матриці та доказано, що для неї виконуються аксіоми логічного поля. Розглянуто основні операції над логічними матрицями та правила їх транспонування. Доведено, що обернення існує лише для ортогональних логічних матриць. Розглянуто зв'язок між операціями транспонування та обернення.

Бібліогр : 3 назв.

UDC 510.62

On logical matrices / N.A. Gvozdinska, Z.V. Dudar, S.A. Poslavsky, J.P. Shabanov-Kushnarenko // Problemy Bioniki. 1998. No. 48. P. 12—22.

The concept of logical matrix is introduced. It is shown that the axioms of logical field are true for these matrices. The basic operations over the logical matrices and the rules of transposition of them are considered. It is proved that the inversion exists only for the orthogonal logical matrices. The relation between the operations of transposition and of inversion is considered.

Ref.: 3 titles.

УДК 681.513

Рекуррентный проекционный алгоритм идентификации при коррелированных помехах / Н.Г. Аксак, О.Г. Руденко, А. Штефан // Проблемы бионики. 1998. Вып. 48 С. 23—27.

Рассматривается задача оценивания нестационарных параметров линейной регрессионной модели при наличии коррелированных помех. Получена рекуррентная процедура идентификации для случая, когда известна ковариационная матрица помех, что позволяет уменьшить дисперсию ошибок идентификации.

Библиогр.: 5 назв.

УДК 681.513

Рекуррентный проекционный алгоритм идентификации при коррелированных помехах / Н.Г. Аксак, О.Г. Руденко, А. Штефан // Проблемы бионики. 1998. Вып. 48. С. 23—27.

Розглянуто задачу оцінювання нестационарних параметрів лінійної регресійної моделі при наявності корельованих завад. Одержано рекуррентну процедуру ідентифікації для випадку, коли коваріаційна матриця завад відома, що дозволяє зменшити дисперсію помилок ідентифікації.

Бібліогр.: 5 назв.

UDC 681.513

A recursive projector algorithm of identification at correlation handicaps / N.G. Axak, O.G. Rudenko, A. Stephan // Problemy Bioniki. 1998. No. 48. P. 23—27.

An estimation problem of non-stationary parameters of a linear regression model is considered in the presence of correlation handicaps. A recursive procedure of identification is obtained, when the covariance matrix of handicaps is known. It enables one to lower the identification dispersion error.

Ref.: 5 titles.

УДК 519.7

Изучение цветовой индукции на базе компьютера / С. Н. Каплун // Проблемы бионики. 1998. Вып. 48. С. 28—33.

Описан высокоточный компьютерный колориметр для проведения колориметрических экспериментов по изучению явления цветовой индукции. Рассмотрены проблемы колориметрических измерений с помощью компьютера и способы их решения.

Ил. 1. Библиогр.: 1 назв.

УДК 519.7

Вивчення кольорової індукції на базі комп'ютера / С. М. Каплун // Проблемы бионики. 1998. Вып. 48. С. 28—33.

Описано високоякісний комп'ютерний колориметр для виконання колориметричних експериментів по вивченню явища кольорової індукції. Розглянуто проблеми колориметричних вимірювань за допомогою комп'ютера та засоби їх рішення.

Іл. 1. Бібліогр.: 1 назв.

UDC 519.7

Study of colour induction using the computer / S. N. Kaplun // Problemy Bioniki. 1998. No. 48. P. 28—33.

High precision computer colourmeter for colourmetering experiments on colour induction phenomenon is described. Problems of colourmetric measurements using the computer and ways of their solution are discussed.

1 fig. Ref.: 1 titles.

УДК 519.7

Метризирующий предикат в конечномерном арифметическом пространстве и формулировка его основных свойств / Д.О. Колесников, С.В. Костюк, С.Ю. Шабанов-Кушнаренко // Проблемы бионики. 1998. Вып. 48. С. 34—42.

Вводится понятие метризирующего предиката в арифметическом пространстве. Дается постановка задач структурной и параметрической метризации поля зрения человека, а также их пространственная, цветовая и техническая интерпретации. Формулируются основные свойства метризирующего предиката.

Ил.: 2. Библиогр.: 4 назв.

УДК 519.7

Метризующий предикат у скінченномірному арифметичному просторі та формулювання його основних властивостей / Д.О. Колесников, С.В. Костюк, С.Ю. Шабанов-Кушнаренко // Проблеми біоніки. 1998. Вип. 48. С. 34—42.

Віслюється поняття метризуючого предиката в арифметичному просторі. Надається постановка задач структурної та параметричної метризації поля зору людини, а також їх просторова, цвіткова та технічна інтерпретації. Формулюються основні властивості метризуючого предиката.

Ил.: 2. Библиогр.: 4 назв.

UDC 519.7

The metrizing predicate in the finite-dimensional arithmetical space and its principal characteristics / D. O. Kolesnikov, S.V. Kostuk, S.Yu. Shabanov-Kushnarenko // Problemy Bioniki. 1998 No. 48. P. 34—42.

The concept of a metrizing predicate is introduced in the arithmetical space. The formulation of problems of the structural and parametric metrization of the human field of sight is given with their spatial, colored and technical interpretations is given. The principal characteristics of the metrizing predicate are formulated.

Figs. 2. Refs: 4 titles.

УДК 519.7

Аппаратный метод решения системы логических уравнений / М.Ф. Бондаренко, Е.В. Журавок, В.А. Чикина // Проблемы бионики. 1998. Вып. 48. С. 43—47.

С целью расширения функциональных возможностей обратимых переключаемых цепей осуществлен синтез смешанных переключаемых цепей первого и второго рода с обнаружением ошибок. Разработан модуль цифровой обработки текстовой информации для аппаратного решения системы обратимых булевых уравнений.

Ил. 1. Библиогр.: 2 назв.

УДК 519.7

Апаратних засіб розв'язання систем логічних рівнянь / М.Ф. Бондаренко, О.В. Журавок, В.О. Чикина // Проблеми біоніки. 1998. Вип. 48. С. 43—47.

З метою поширення функціональних можливостей обернутих перемикаючих кіл здійснено синтез змішаних перемикаючих кіл першого та другого роду з відкриттям помилок. Розроблено модуль цифрової обробки текстової інформації для апаратного розв'язання системи обернутих булевих рівнянь.

Ил. 1. Библиогр.: 2 назв.

UDC 519.7

A hardware method for solving a system of logic equations / M. Bondarenko, E. Zhuravok, V. Chikina. // Problemy Bioniki. 1998. No. 48. P. 43—47.

With the purpose of expanding functional capabilities of convertible switching circuits the synthesis of the mixed switching circuits of the first and second kind with error detection is carried out. A module for digital processing the textual information for the hardware solution of convertible Boolean equations system is developed.

1 fig. Ref.: 2 titles.

УДК 681. 5. 01: 658. 5

Применение принципа вспомогательных задач к оптимизационным задачам с явными ограничениями / И.Ю. Панферова // Проблемы бионики. 1998. Вып. 48. С. 48—51.

Предлагается метод решения оптимизационных задач с явными ограничениями, основанный на использовании принципов вспомогательных задач и релаксаций.

Библиогр.: 2 назв.

УДК 681. 5. 01: 658. 5

Застосування принципу допоміжних задач до оптимізаційних задач з явними обмеженнями / І.Ю. Панфєрєва // Проблеми біоніки. 1998. Вип. 48. С. 48—51.

Запропоновано метод вирішення оптимізаційних задач з явними обмеженнями, який заснований на використанні принципів допоміжних задач та релаксацій.

Бібліогр.: 2 назв.

UDC 681. 5. 01: 658. 5

Application of auxiliary problems principle to optimization problems with explicit restrictions / I. Y. Pantiorova // Problemy Bioniki. 1998. No. 48. P. 48—51.

A method for solving optimization problems with explicit restrictions is suggested. The method is based on application of auxiliary problems.

Ref: 2 titles.

УДК 371.385:681.3

О некоторых алгоритмах построения виртуальных пространств / Н.В. Белоус, А.П. Выродов, И.Ю. Шубин // Проблемы бионики. 1998. Вып. 48. С. 52—59.

Приведен обзор различных способов построения виртуальных пространств, а также описан один из возможных методов создания системы конструирования виртуальных пространств — метод трассировки луча, который позволяет произвести процесс преобразования двухмерного представления пространства в трехмерное.

Ил. 2. Библиогр.: 3 назв.

УДК 371.385:681.3

Про деякі алгоритми побудови віртуальних просторів / Н.В. Білоус, О.П. Виродов, І.Ю. Шубін // Проблеми біоніки. 1998. Вип. 48. С. 52—59.

Наведено огляд різних засобів побудови віртуальних просторів, а також описано один з можливих методів створення системи конструювання трьохмірного простору — метод трасировки променя, який описує процес перетворення двумірного зображення простору у трьохмірне.

Іл. 2. Бібліогр. 3 назв.

UDC 371.385:681.3

On some algorithms of constructing virtual spaces/ N.V. Belous, A.P. Vyrodov, I.Y. Schubin // *Problemy Bioniki*. 1998. No. 48. P. 52—59.

The review of various ways of constructing virtual spaces, is given, a brief description of one of possible methods of creating a system of designing such spaces in real time — a method of ray casting is also described. The method enables one to transform the 2D representation into the 3D one.

5 fig. Ref.: 3 titles.

УДК 519.7

Вычислительный метод обработки корреляции между симптомами в медицинских базах знаний/ В.А. Мусийченко, Н.П. Мустецов // *Проблемы бионики*. 1998. Вып. 48. С. 60—63.

Неучёт корреляции между симптомами в медицинских базах знаний может привести к неточным результатам диагностики. Полный учёт корреляции затруднён ввиду сложности вычислений и не всегда оправдан. Существующие методы сводятся в основном к коррекции базы знаний её составителем. Предложен паллиативный метод автоматизированного уменьшения влияния корреляции на результаты диагностики.

Библиогр.: 4 назв.

УДК 519.7

Обчислювальний засіб обробки кореляції між симптомами в медичних базах знань/ В.А. Мусійченко, М.П. Мустецов // *Проблеми біоніки*. 1998. Вип. 48. С. 60—63.

Неврахування кореляції між симптомами у медичних базах знань може привести до помилок у діагностуванні. Обчислення кореляції у повному обсязі є складною обчислювальною процедурою і не завжди виправдане. Методи, що існують, у більшості зводяться до коригування бази знань її розробником. Запропоновано паліативний засіб автоматизованого зменшення впливу кореляції на результати діагностики.

Бібліогр.: 4 назв.

UDC 519.7

Method of automatic correction of diagnostics results distorted by correlation between symptoms / V.A. Musyichenko, N.P. Mustetsov // *Problemy Bionici*. 1998. No. 48. P. 60—63.

Neglect of correlation between symptoms in medical knowledge base may result in wrong diagnostics. Computing real correlation is too complicated and not always worth while. Most methods are based on manual correction of the knowledge base by its author. A palliative method of automatic correction of diagnostics results distorted by the correlation is regarded.

Refs: 4 titles.

УДК 510.62

Компаративная идентификация конечномерных линейных процессов / С.А. Пославский, В.А. Походенко, С.Ю. Шабанов-Кушнарченко // *Проблемы бионики*. 1998. Вып. 48. С. 64—69.

Введено понятие линейного предиката на конечномерном пространстве, установлен общий вид линейного предиката и найдена несократимая система его характеристических свойств. Полученные результаты использованы для математического описания цветового зрения человека.

Библиогр.: 3 назв.

УДК 510.62

Компаративна ідентифікація скінченномірних лінійних процесів / С.О. Пославський, В.О. Походенко, С.Ю. Шабанов-Кушнарченко // *Проблеми біоніки*. 1998. Вип. 48. С. 64—69.

Введено поняття лінійного предиката на скінченномірному просторі, встановлено загальний вигляд лінійного предиката і знайдено несокращувану систему його характеристичних властивостей. Одержані результати застосовано для математичного опису кольорового зору людини.

Бібліогр.: 3 назв.

UDC 510.62

The comparatory identification of the finite dimensional linear processes / S.A. Poslavsky, V.A. Pokhodenko, S.U. Shabanov-Kushnarenko // Problemy Bioniki. 1998. No. 48. P. 64—69.

A concept of a linear predicate is introduced on the finite-dimensional space, the general form of the linear predicate is established and an irreducible system of its characteristic properties is found. The results obtained are applied for a mathematical description of man's color vision.

Refs. 3 titles.

УДК 681.513.7

Программная фильтрация помех в контурах адаптивного управления / С.Г. Удовенко // Проблемы бионики. 1998. Вып. 48. С. 70—74.

Предлагается простой класс фильтров для идентификации и адаптивного управления. Идея состоит в реализации m -кратных измерений в течение периода квантования и аппроксимации получаемых данных с помощью фильтрующих зависимостей.

Ил.: 1. Библиогр.: 2 назв.

УДК 681.513.7

Програмне фільтрування завад в контурах адаптивного керування / С.Г. Удовенко // Проблеми біоники. 1998. Вип. 48. С. 70—74.

Пропонується простий клас фільтрів для ідентифікації та адаптивного керування. Ідея полягає в реалізації m -кратних вимірювань протягом періода керування та апроксимації одержаних даних за допомогою фільтруючих залежностей.

Іл.: 1. Библиогр.: 2 назви.

UDC 681.513.7

Program filtering disturbances for adaptive control circuits / S.G. Oudovenko // Problemy Bioniki. 1998. No. 48. P. 70—74.

A simple class of filters for identification and adaptive control is proposed. The idea is to carry out m measurements during the sampling interval and to approximate the evolution of the obtained data by the filtering relations.

1 fig. Ref.: 2 titles.

УДК 681.513

Оценка влияния погрешностей в задании параметров помех на точность идентификации. / Ф. Хюбенталь, А. Штефан // Проблемы бионики. 1998. Вып. 48. С. 75—78.

Анализируется влияние неточностей в задании априорной информации о статистических свойствах помех на точность получаемых оценок. Показано, что ошибка в задании дисперсионной матрицы коррелированной помехи приводит к увеличению дисперсии ошибок оценивания.

Библиогр.: 1 назв.

УДК 681.513

Оцінка впливу похибок в завданні параметрів завад на точність ідентифікації / Ф. Хюбенталь, А. Штефан // Проблеми біоники. 1998. Вип. 48. С. 75—78.

Аналізується вплив похибок в завданні априорної інформації о статистичних властивостях завад на точність одержаних оцінок. Показано, що помилка в завданні дисперсійної матриці корельованої завади призводить до збільшення дисперсії похибок оцінювання.

Библиогр.: 1 назв.

UDC 681.513

Estimation of influence of errors in the task of parameters of handicapes for accuracy of identification / F. Huebenthal, A. Stephan // *Problemy bioniki*. 1998. No. 48. P. 75—78.

Influence of discrepancies in the task a priori information on statistical properties of handicapes on accuracy of received estimations is analyzed in the article. Is shown, that the error in the task of a dispersion matrix of a correlation handicap brings to the increase of dispersion of estimation errors.

Ref.: 1 item.

УДК 621.371

Использование модели абсолютно черного тела для объяснения феноменов биофизического обмена информацией и энергией / И.И. Зима // *Проблемы бионики*. 1998. Вып. 48. С. 79—84.

Обсуждается идея об использовании модели абсолютно черного тела для подтверждения гипотезы об электромагнитной инфракрасной природе биофизического обмена информацией и энергией между живыми людьми.

Ил. 2. Библиогр.: 2 назв.

УДК 621.371

Використання моделі абсолютно чорного тіла для пояснення феноменів біофізичного обміну інформацією та енергією / І.І. Зима // *Проблеми біоніки*. 1998. Вип. 48. С. 79—84.

Обговорюється ідея щодо використання моделі абсолютно чорного тіла для підтвердження гіпотези про електромагнітну інфрачервону природу біофізичного обміну інформацією та енергією серед живих людей.

Іл. 2. Бібліогр.: 2 назв.

UDC 621.371

Employing the absolutely black body model for explanation of phenomena of biophysical exchange by information and energy / I.I. Zima // *Problemy Bioniki*. 1998. No. 48. P. 79—84.

The present article describes an idea about employing the absolutely black body modes for explanation of phenomena of biophysical contacts between people in infrared frequency band.

2 fig. Ref.: 2 titles.

УДК 681. 5. 01: 658. 5

Интеллектуальные процедуры построения иерархических структур систем управления организационно-технологическими комплексами / И.Ю. Панферова // *Проблемы бионики*. 1998. Вып. 48. С. 85—91.

Предлагается метод построения иерархических систем, позволяющий путем систематического применения известных методов декомпозиции синтезировать структуру системы управления многосвязными организационно-технологическими комплексами

Ил. 3 Библиогр.: 8 назв.

УДК 681. 5. 01: 658. 5

Интеллектуальні процедури побудови ієрархічних структур організаційно-технологічних комплексів / І.Ю. Панферова // *Проблеми біоніки*. 1998. Вип. 48. С. 85—91.

Запропонований метод побудови ієрархічних систем, які дозволяють шляхом систематичного вживання відомих методів декомпозиції синтезувати структуру системи управління багатозв'язними організаційно-технологічними комплексами

Іл. 3 Бібліогр.: 8 назв.

UDC 681.5.01:658.5

Intellectual procedures of building hierarchical structures of control system for organizational-technological complexes / I. Y. Panferova // Problemy Bioniki. 1998. No. 48. P. 85—91.

A method of building of hierarchical systems, which allows by way of systematic application of the known decomposition methods, to synthesize a system structure to control multivariable organizational-technological complexes.

3 fig. Ref: 8 titles.

УДК 007.681.518.2

Использование отношений с параметрами в метасемантических моделях / Н.В. Кривич, С. А. Мар'ин // Проблемы бионики. 1998. Вып. 48. С. 92—96.

Предложено расширение метасемантической модели механизмом работы с параметрами. Введено понятие отношения с параметрами. Введение отношений с параметрами в метасемантическую модель представления знаний не нарушило ее целостности, однородности представления данных и знаний на всех уровнях и универсальности, в то же время значительно расширило круг проблем, для описания которых удобно применять именно метасемантическую модель.

Ил. 1. Библиогр.: 5 назв.

УДК 007.681.518.2

Використання відношень з параметрами у метасемантичних моделях / Н.В. Кривич, С. О. Мар'їн // Проблеми біоніки. 1998. Вип. 48. С. 92—96.

Запропоновано розширення метасемантичної моделі механізмом роботи з параметрами. Введено до вжитку поняття відношення з параметрами. Введення відношень з параметрами у метасемантичну модель представлення знань не порушило її цілісності, однотипності представлення даних та знань на усіх рівнях та її універсальності, у той же час значно розширило коло проблем, які зручно описувати метасемантичною моделлю.

Іл. 1. Бібліогр.: 5 назв.

UDC 007.681.518.2

Using of parametric relations in the metasemantic models / N. Krivich, S. Mariyn // Problemy Bioniki. No. 48. P. 92—96.

An expansion of the metasemantic model with a parameter operating mechanism is proposed in this work. A concept of a parametric relation is introduced. The parametric relation into a metasemantic model has not destroyed the safeness of data and knowledge representation at all levels and its universality. On the other hand such an expansion has enhanced a range of problems which are adequately described by the metasemantic model.

1 fig. Ref.: 5 titles.

УДК 519.7

Метод стимулювання продуктивного мислення на основі нечітких асоціацій в медицині / В. А. Мусійченко // Проблеми бионики. 1998. Вып. 48. С. 97—100.

Предложен метод стимулирования продуктивного мышления. Главная особенность метода состоит в использовании интеллектуальной системы как комбинации экспертной и информационно-поисковой для поддержки насыщенной информационной среды пользователя, поиска ассоциируемой информации и формирования градиента этой среды в соответствии с решаемой задачей. Метод рассматривается на примере медицинской диагностики.

Ил. 1. Библиогр.: 8 назв.

УДК 519.7

Метод стимулювання продуктивного мислення з використанням нечітких асоціацій на прикладі медицини / В.А. Мусійченко // Проблеми біоніки. 1998. Вип. 48. С. 97—100.

Запропоновано метод стимулювання продуктивного мислення. Головна особливість методу полягає у використанні інтелектуальної системи як поєднання експертної та інформаційно-пошукової з метою підтримки насиченого інформаційного оточення користувача, пошуку асоційованої інформації та формування градієнта цього оточення згідно проблеми, що вирішується. Метод розглянуто на прикладі медичної діагностики.

Лл.: 1. Бібліогр.: 8 назв.

UDC 519.7

Method of productive thinking stimulations using fuzzy associations in medicine / V.A. Musiychenko // Problemy Bioniki. 1998. No. 48. P. 97—100.

A method of productive thinking stimulation is suggested. The main feature of the method is using an intelligent system as a combination of expert system and information retrieval system to support a rich information environment of the user, to retrieve associations and to form a gradient of the environment according to the task to be solved. It is considered on an example of medical diagnostics.

Figs:1. Refs: 8 titles.

УДК 519.81; 504.05:62/69

Опыт создания прототипа интеллектуальной информационной системы для поддержки принятия решений в области промышленной экологии / О. А. Нестеренко // Проблемы бионики. 1998. Вип. 48. С. 101—106.

Изложены теоретические и практические результаты, полученные в процессе работы по созданию прототипа системы поддержки принятия решения в области, связанной с выбором для внедрения на промышленном предприятии природоохранного мероприятия. Предложено использовать интеллектуальную технологию экспертной оценки и поддержки принятия решений; описаны некоторые особенности работы со слабоформализованной областью промышленной экологии.

Библиогр.: 6 назв.

УДК 519.81; 504.05:62/69

Досвід створення прототипу інтелектуальної інформаційної системи для підтримки прийняття рішень в галузі промислової екології / О.О. Нестеренко // Проблеми біоніки. 1998. Вип. 48. С. 101—106.

Викладені теоретичні та практичні результати, які було отримано в процесі роботи по створенню прототипу системи підтримки прийняття рішень в галузі, пов'язаній з вибором природоохоронних заходів. Запропоновано використовувати інтелектуальну технологію експертної оцінки та підтримки прийняття рішень; описані деякі особливості роботи із слабоформалізуємою галуззю промислової екології.

Бібліогр.: 6 назв.

UDC 519.81; 504.05:62/69

An attempt to create a prototype of intelligent information decision system in the area of industrial ecology / O.A. Nesterenko // Problemy Bioniki. 1998. No. 48. P. 101—106.

The theoretical and practical results were got in the process of work upon creating a prototype of a decision system in the area of industrial ecology are described. The prototype decision system is intended to take decisions for implementing environment-protecting measures at an industrial enterprise. The author has proposed to use an intelligent technology of expert estimation and support of decision making. Some peculiarities of the work with industrial ecology ill-formalised field are described.

Refs: 6 titles.

УДК 007.681.518.2

Эвристические методы оптимизации резервирования в системах распределения ресурсов / А.А. Гордеев, С.А. Марьин, С.А. Ткачук, А.В. Цымбал // Проблемы бионики. 1998. Вып. 48. С. 107—114.

Рассмотрена проблема оптимизации резервирования в системах распределения ресурсов. Разработан метод решения задачи оптимального распределения ресурсов с минимизацией потерь и другими критериями, позволяющий избежать исчерпывающего перебора вариантов. Рассмотрены вопросы программной реализации указанного метода, а также возможность его применения для разработки различных программных систем распределения ресурсов. Рассмотрено также использование указанного метода для разработки системы автоматизированного управления ресурсами гостиницы "Hotello-2".

Ил. 4. Библиогр.: 2 назв.

УДК 007.681.518.2

Евристичні методи оптимізації резервування у системах розподілення ресурсів / О.О. Гордєєв, С.О. Мар'їн, А.В. Ткачук, О.В. Цимбал // Проблеми біоніки. 1998. Вип. 48. С. 107—114.

Розглянуто проблему оптимізації резервування у системах розподілення ресурсів. Розроблено метод розв'язання задачі оптимального розподілення ресурсів з мінімізацією витрат та іншими критеріями. Запропонований метод дозволяє уникнути повного перегляду варіантів. Розглянуто питання програмної реалізації вказаного методу, а також можливість застосування його для розробки різноманітних програмних систем розподілення ресурсів. Розглянуто також використання вказаного методу для розробки системи автоматизованого керування ресурсами готелю "Hotello-2".

Ил. 4. Библиогр.: 2 назв.

UDC 007.681.518.2

Heuristic methods of reserve optimization in resource distribution systems / A.A. Gordeev, S.A. Maryin, A.V. Tkachuk, A.V. Tsybal // Problemy Bioniki. 1998. No. 48. P. 107—114.

In this paper the task of reserve optimization in resource distribution systems is considered. A method of solving the problem of optimal resource distribution with loss minimization and other criteria is elaborated. The proposed method allows avoiding exhaustive search of cases. The issues of program realization of this method are considered. This method can be applied for elaboration of various software systems of resource distribution. Utilization of the proposed method for an elaboration of automated resource control system "Hotello-2" is also considered.

4 fig. Ref.: 2 titles.

УДК 681.324

Моделирование π -квантовых сетей нечетких рассуждений для вывода решений в условиях неопределенности / Т.Ю. Петренко // Проблемы бионики. 1998. Вып. 48. С. 115—123.

В статье развиваются результаты предыдущей работы автора, помещенной в настоящем сборнике и освещающей сущность предложенного РАКЗ-метода компьютерного манипулирования точными знаниями (πk -знаниями) и нечеткими (πk -знаниями). Поставлена и решена задача автоматического квантования (структурирования) входной информации в классе πk -, πk -знаний, на основе использования которой синтезирована модель π -квантовой сети нечетких рассуждений (π -КСНР) для вывода решений в условиях неопределенности. Построенная π -КСНР для определенной проблемной области может выполнять роль «машины вывода» с собственной базой знаний в экспертной системе целевого назначения.

Библиогр.: 2 назв.

УДК 681.324

Моделювання π -квантових мереж нечітких міркувань для виводу рішень в умовах невизначеності / Т.Ю. Петренко // Проблеми біоніки. 1998. Вип. 48. С. 115—123.

У статті розвиваються результати попередньої роботи автора, яка розміщена в цьому ж збірнику та висвітлює суть запропонованого РАКЗ-методу комп'ютерного маніпулювання точними знаннями (*tk*-знаннями) та нечіткими (*pk*-знаннями). Поставлено і розв'язано задачу автоматичного квантування (структурування) вхідної інформації в класі *tk*-, *pk*-знань, на основі використання якої синтезовано модель π -квантової мережі нечітких міркувань (π -КМНМ) для виводу рішень в умовах невизначеності. Побудована для визначеної проблемної галузі π -КМНМ здатна виконувати роль «машини виводу» з власною базою знань в експертній системі цільового призначення.

Бібліогр.: 2 назв.

UDC 681.324

Modeling π -quantum nets of unprecise reasoning for solutions conclusion under uncertain conditions / T.Yu. Petrenko // Problemy Bioniki. 1998. No. 48. P. 115—123.

The results of preceding author's article are developed. The author clarifies the essence of the proposed DAQK-method of computing precise knowledge (*tk*-knowledge) and fussy (*pk*-knowledge). Last article was placed in this issue of «Bionic problem».

The problem of input information automatic quantification (structurization) in classes of *tk*-, *pk*-knowledge has been formalized and solved. On this basic π -knowledge net of fussy reasoning model (π -KNUR) was synthesized for drawing conclusion under uncertain conditions. Constructed for solving of particular problem, π -KNUR may operate as a conclusion-machine with own knowledge base in expert object-oriented system.

Ref.: 2 titles.

УДК 681.5.015

Интеллектуальные процедуры принятия решений в условиях неопределенности / В.П. Авраменко, И.Д. Калачев, В.В. Калачева // Проблеми біоніки, 1998. вип. 48. С. 124—128.

Предложены интеллектуальные (регуляризованные, эвристические, слабоформализованные) процедуры принятия решений, ориентированные на конкретный вид неопределенностей, возникающих при функционировании организационно-технических систем управления.

Библиогр. 4 назв.

УДК 681.5.015

Интеллектуальні процедури прийняття рішень в умовах невизначеності / В.П. Авраменко, І.Д. Калачов, В.В. Калачова // Проблеми біоніки, 1998. Вип. 48. С. 124—128.

Запропоновані інтелектуальні (регуляризовані, евристичні, слабоформалізовані) процедури прийняття рішень, орієнтовані на конкретний вид невизначеності організаційно-технічного керування.

Бібліогр. 4 назв.

UDC 681.5.015

Intellectual procedures of decision making under uncertain conditions / V.P. Avramenko, I.D. Kalachov, V.V. Kalachova // Problemy Bioniki. 1998. No. 48. P. 124—128.

This article is about intellectual (regularization, heuristic, weakformal) procedures of receiver decision-making, intended for organizational technological control systems.

Ref.: 4 titles.

УДК 681.324

Квантовые модели нечетких знаний для принятия приближенных решений при недостатке данных / Т.Ю. Петренко, И.Б. Сироджа // Проблемы бионики. 1998. Вып. 48. С. 129—140.

Сформирована и решена задача формализации нечетких знаний (π -квантов), которые в частном случае при степени их достоверности, равной 1, вырождаются в точные модели знаний (t -кванты), разработанные и опубликованные авторами ранее. Предложен метод равноуровневых алгоритмических квантов знаний (РАКЗ-метод) для синтеза РАКЗ-моделей, имитирующих человеческое принятие решений в условиях неопределенности.

Разработана методика алгоритмизации нечетких рассуждений для синтеза π -квантовых сетей вывода приближенных знаниеориентированных решений при недостатке данных.

Библиогр.: 4 назв.

УДК 681.324

Квантові моделі нечітких знань для прийняття рішень при недостатці даних / Т.Ю. Петренко, І.Б. Сироджа // Проблеми біоники. 1998. Вип. 48. С. 129—140.

Сформульовано і розв'язано задачу формалізації нечітких знань (π -квантів), які в окремому випадку ступені їх достовірності, що дорівнює 1, впадають у точні моделі знань (t -кванти), розроблені і опубліковані авторами раніше. Запропоновано метод рівнорівневих алгоритмічних квантів знань (РАКЗ-метод) для синтезу РАКЗ-моделей, що імітують прийняття рішень людиною в умовах невизначеності.

Розроблено методіку алгоритмізації нечітких міркувань для синтезу π -квантових мереж виводу наближених знанняорієнтованих рішень при недостатці даних.

Бібліогр.: 4 назв.

UDC 681.324

Quantum models of unprecise knowledge for taking approximated decisions in lack of data / T.Yu. Petrenko, I.B. Sirodza // Problemy Bioniki. 1998. No. 48. P. 129—140.

The problem of formalization unprecise knowledge (π -quanta) is solved. In particular, when certainty degree is equal to 1, unprecise knowledge transforms into precise knowledge models (t -quanta). T -quanta have been designed and published by the authors earlier. On the basis of development of the proposed method of different-level algorithmic quanta of knowledge (DAQK-method) vector-matrix and predicate representation has been produced imitating man's acts at drawing conclusion under uncertain conditions.

Unprecise reasoning algorithmization method has been designed for the synthesis of π -quantum nets of approximated knowledge-oriented conclusion in lack of data

Ref.: 4 titles

УДК 519.7

Математическое описание смысла текстов естественного языка / Н.А. Гвоздинская, З.В. Дударь, Ю.П. Шабанов-Кушнарченко // Проблемы бионики. 1998. Вып. 48. С. 141—149

Смысл текстов формализуется на основе аналогии между естественным языком и языками математики. Показано, что в текстах естественного языка неявно присутствуют предметные переменные. Вводится понятие смыслового предиката, предложена экспериментальная процедура его определения. Проанализированы причины и виды смысловой многозначности текста.

Библиогр.: 2 назв.

УДК 519.7

Математичний опис смислу текстів природної мови / Н.А. Гвоздинська, З.В. Дударь, Ю.П. Шабанов-Кущнаренко // Проблеми біоніки. 1998. Вип. 48. С. 141—149.

Смисл текстів формалізується на основі аналогії між природною мовою і мовами математики. Показано, що в текстах природної мови неявно присутні предметні змінні. Вводиться поняття смислового предиката, запропоновано експериментальну процедуру його визначення. Проаналізовано причини і види смислової багатозначності тексту.

Бібліогр.: 2 назви.

UDC 519.7

On mathematical description of sense of natural-language texts / N.A. Gvozdinska, Z.V. Dudar, J.P. Shabanov-Kushnarenko // Problemy Bioniki. 1998. No. 48. P. 141—149.

The sense of the texts is formalized on the basis of the analogy between the natural language and mathematical languages. It is shown that in natural-language texts object variables are implicitly present. The notion of a sense predicate is introduced, an experimental procedure is suggested for its determination. Causes for and classes of the text polysemy are analyzed.

Refs: 2 titles.

УДК 519.687

Программно-технологический комплекс для построения экспертных систем различного назначения / В.А. Гребинник, В.Н. Шевелин // Проблеми біоніки. 1998. Вип. 48. С. 150—158.

Рассматривается проблема построения экспертных систем различного назначения на основе программно-технического комплекса, проблемы построения различных составляющих экспертных систем и их взаимодействия. Детально рассмотрено построение анализатора запросов к экспертной системе на языке близком к естественному и подход к ее решению с использованием языкового процессора.

Библиогр.: 4 назв.

УДК 519.687

Програмно-технологічний комплекс для побудови експертних систем різного призначення / В.А. Гребинник, В.Н. Шевелін // Проблеми біоніки. 1998. Вип. 48. С. 150—158.

Разглядається проблема побудови експертних систем різного призначення на основі програмно-технологічного комплексу, проблеми побудови різних складових частин експертних систем та їх взаємодії. Детально розглянуто розробку аналізатора запитів до експертної системи мовою, що є близькою до природної, та підхід до її розв'язання з використанням мовного процесору.

Бібліогр.: 4 назв.

UDC 519.687

Software development toolkit for multi-purpose expert systems building / V.A. Grebinnik, V.N. Shevelin // Problemy bioniki. 1998. No. 48. P. 150—158.

This work considers problems of multi-purpose expert systems building using software development toolkit, problems of expert systems components building and its interaction. This work in detail considers problems of expert system requirements analyzer building for natural-like input language and its decision using language processor.

Ref.: 4 items.

УДК 371.315.7, 681.513.6

Моделирование знаний для компьютерных обучающих систем / М.С. Киприч // Проблемы бионики. 1998. Вып. 48. С. 159—165.

В статье рассмотрены вопросы алгоритмизации процесса приобретения знаний на слабоформализуемых этапах концептуального моделирования проблемных областей. Представленный алгоритм, который сейчас используется при проектировании системы, обучающей основам дисциплины на примере курса "Экспертные системы", можно ввиду отсутствия разработанных строгих методов формализации считать попыткой создания методики формализации слабоструктурированных проблемных областей, особенностью которой является общая бионическая направленность работы, в которой использовались данные когнитологии, психологии.

Библиогр.: 8 назв.

УДК 371.315.7; 681.513.6

Моделивання знань для комп'ютерних систем навчання / М.С. Кіпріч // Проблеми біоніки. 1998. Вип. 48. С. 159—165.

У статті розглянуто питання алгоритмізації процесу набуття знань на слабоформалізуємих етапах концептуального моделювання проблемних галузей. Запропонований алгоритм, який зараз використовують при проектуванні системи, що навчає основам дисципліни на прикладі курсу "Експертні системи", можна через відсутність розроблених точних методів формалізації слабоструктурованих проблемних галузей, вважати спробою формалізації слабоструктурованих проблемних галузей, особливістю якої є загальна біонічна спрямованість роботи, де було використано дані когнітології, психології.

Бібліогр.: 8 назв

UDC 371.315.7, 681.513.6

Tuition system knowledge modelling / M.S. Kiprich // Problemy Bioniki. 1998. No. 48. P. 159—165.

The article presents some aspects of algorithmization of knowledge acquisition process at the weakly formalized stages of domain conceptual modeling. The algorithm is currently used for developing a system teaching subject fundamentals (a course on expert systems taken as the example). It can be considered (because of the lack of any strict formalization methods) as an attempt of creating formalization techniques for ill-structured domains characterized by the general bionic trend of the work which used data supplied by cognitive science and psychology.

Refs: 8 titles

АВТОРЫ ВЫПУСКА

1. *Авраменко Валерий Петрович*, д-р техн. наук, профессор, Харьковский государственный технический университет радиозлектроники (ХТУРЭ).
2. *Аксак Наталья Григорьевна*, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, ХТУРЭ.
3. *Белоус Наталья Валентиновна*, канд. техн. наук, доцент ХТУРЭ.
4. *Бондаренко Михаил Федорович*, д-р техн. наук, профессор, академик АН ВШ, ректор, ХТУРЭ
5. *Выродов Александр Петрович*, студент, ХТУРЭ.
6. *Гвоздинская Наталья Анатольевна*, аспирантка, ХТУРЭ.
7. *Гордеев Александр Александрович*, студент, ХТУРЭ.
8. *Гребинник Василий Анатольевич*, инженер, ХТУРЭ.
9. *Дударь Зоя Владимировна*, канд. техн. наук, доцент, ХТУРЭ.
10. *Журавок Елена Владимировна*, мл. науч. сотрудник, ХТУРЭ.
11. *Зима Иван Иванович*, д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник, Харьковский военный университет.
12. *Калачев Игорь Дмитриевич*, инженер, ХТУРЭ.
13. *Калачева Вероника Валерьевна*, лаборант, ХТУРЭ.
14. *Каплун Сергей Николаевич*, мл. науч. сотрудник, ХТУРЭ.
15. *Киррич Мария Сергеевна*, аспирантка, ХТУРЭ.
16. *Колесников Дмитрий Олегович*, аспирант, ХТУРЭ.
17. *Костюк Светлана Витальевна*, аспирантка, ХТУРЭ.
18. *Кривич Наталья Викторовна*, мл. науч. сотрудник, ХТУРЭ.
19. *Марьин Сергей Александрович*, аспирант, ХТУРЭ.
20. *Мусийченко Ваоим Анатольевич*, мл. науч. сотрудник, ХТУРЭ.
21. *Мустецов Николай Петрович*, канд. техн. наук, доцент, ХТУРЭ.
22. *Настеренко Оксана Алексеевна*, стажер-исследователь, ХТУРЭ.
23. *Панферова Ирина Юрьевна*, ассистент, ХТУРЭ.
24. *Петренко Тарас Юрьевич*, начальник сектора отдела ВТ, Авиационный научно-технический комплекс, г. Киев.
25. *Пославский Сергей Александрович*, канд. физ.-мат. наук, доцент, Харьковский государственный университет.
26. *Походенко Виталина Алексеевна*, аспирантка, ХТУРЭ.
27. *Руденко Олег Григорьевич*, д-р техн. наук, профессор, ХТУРЭ.
28. *Сироджа Игорь Борисович*, д-р техн. наук, профессор, Харьковский авиационный университет.
29. *Ткачук Андрей Владимирович*, аспирант, ХТУРЭ.
30. *Удовенко Сергей Григорьевич*, канд. техн. наук, доцент, ХТУРЭ.
31. *Хюбенталь Франк*, руководитель фирмы Dr. Stephan & Partner System and Softroasehans, Германия.
32. *Цымбал Алексей Валентинович*, мл. науч. сотрудник, ХТУРЭ.
33. *Чикина Валентина Алексеевна*, канд. техн. наук, ведущий науч. сотрудник, ХТУРЭ.
34. *Шабанов-Кушнарченко Сергей Юрьевич* д-р техн. наук, ведущий науч. сотрудник, ХТУРЭ.
35. *Шабанов-Кушнарченко Юрий Петрович*, заслуженный деятель науки и техники Украины, д-р техн. наук, профессор, ХТУРЭ.
36. *Шевелин Виталий Николаевич*, инженер, ХТУРЭ.
37. *Штефан Андреас*, доктор-инженер, руководитель фирмы Dr. Stephan & Partner System and Softroasehans, Германия.
38. *Шубин Игорь Юрьевич*, канд. техн. наук, доцент, ХТУРЭ.