УДК 681.5

СИТУАЦИОННЫЕ КЛАССИФИКАТОРЫ СОСТОЯНИЙ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

ПОЛОНСКИЙ А.Д.

В рамках инвариантной алгебры ранговых предикатов решается задача синтеза ситуационных классификаторов с самообучением распознаванию отношений в условиях неопределенности, проявляемой в неполноте информации о состояниях объектов управления.

Введение

Математическую основу синтеза классификаторов состояний объектов управления (ОУ) в условиях неопределенности составляют методы теории обучения распознаванию образов [1, 2]. Современное состояние этой теории отражено в работах [3, 4].

Актуальность исследования. В условиях неопределенности, когда заданы лишь самые общие отличия между состояниями $s_1, ..., s_m$ ОУ, обучение распознаванию образов может быть сведено к идентификации ситуаций

$$R_k = \{u_{k_1} < u_{k_2} < ... < u_{k_n}\} \in U^n. \qquad (1)$$

Здесь $k_i, i = \overline{1, n}$, есть k-я перестановка целых чисел от 1 до n; U^n – n-я декартова степень множества U идентифицирующих переменных $u_i, i = \overline{1, n}$, под которыми понимаются независимые случайные аналоговые сигналы, наблюдаемые на выходах канала обратной связи.

Для классификации отношений (1) необходимо построить идентифицирующую систему, которая воспроизводит функции вида

$$z_k : U^n \to \begin{cases} 0 \mid U \notin R_k; \\ y_k \mid U \in R_k, \end{cases} \qquad (2)$$

где $y_k \in Y = \{y_1, ..., y_m\}$ – идентифицируемые переменные; $k = \overline{1, m}$.

В [1–4] отсутствуют методы воспроизведения функций (2). Использование инвариантной алгебры ранговых предикатов (ИАРП) [5, 6] представляется одним из наиболее простых подходов к решению задачи (2).

Цель и задачи исследования. Идентифицирующие системы, воспроизводящие функции (2), будем называть ситуационными классификаторами (СК). Цель работы – синтез СК с самообучением распознаванию отношений (1). В рамках ИАРП для достижения поставленной цели решены задачи аналитического конструирования, структурного и электрического синтеза СК.

1. Аналитическое конструирование СК

Предположим что метод воспроизведения функций вида (2) заранее не ограничивается, а рассматривается задача синтеза СК, обладающих как свойством инвариантности к распределению идентифицирующих переменных, так и свойством адаптивности к изменению состояний ОУ.

В основу решения рассматриваемой задачи положим ранговые предикаты [5] вида

$$\pi_{ij} = \pi(u_i, u_j) = \begin{cases} 1 \mid u_i = u^{(r_i = 2)} \in \{u_1, ..., u_n\}; \\ 0 \mid u_i = u^{(r_i = 1)} \in \{u_1, ..., u_n\}, \end{cases} \qquad (3)$$

где r_i – ранг (порядковый номер) идентифицирующего сигнала u_i в статистическом ряду

$$R_i^{(r)} = \{u^{(1)} < ... < u^{(r_i)} < ... < u^{(n)}\}. \qquad (4)$$

Здесь $u^{(r)}$ есть r-й по величине элемент множества $U = \{u_1, ..., u_n\}$; $r \in \{\overline{1, n}\}$.

Свойство инвариантности преобразования (3) состоит в том, что появление событий $\{\pi_{ij} = 0 \vee 1\}$ равновероятно независимо от функционального вида распределения идентифицирующих переменных u_i, u_j.

Ранговые предикаты распознают ранги идентифицирующих переменных по признаку, заданному отношением (4). Формально процедуру распознавания рангов можно представить в виде

$$r_i = \sum_{j=1}^{n} \pi_{ij}, i = \overline{1, n}. \qquad (5)$$

Случайная величина $u^{(r)}$ в (4) называется порядковой статистикой ранга r. Алгоритм вычисления порядковой статистики имеет вид

$$u^{(r)} = \sum_{i=1}^{n} u_i \delta(u_i - u^{(r)}), r = \overline{1, n}, \qquad (6)$$

где $\delta(x)$ – функция Дирака, равная нулю (единице) при $x \neq 0\ (x = 0)$.

Теорема [6]. *Ранги и порядковые статистики независимы:*

$$P\{\mathbf{r} \mid s_k\} = \frac{1}{n!}; \qquad (7)$$

$$g_r(u \mid s_k) = nC_{n-1}^{r-1}[F(u \mid s_k)]^{r-1} \times$$
$$\times [1 - F(u \mid s_k)]^{n-r} w(u \mid s_k). \qquad (8)$$

Здесь $P\{\mathbf{r} \mid s_k\}$ есть n-мерное распределение вероятностей рангового вектора $\mathbf{r} = (r_1, ..., r_n)$, если ОУ находится в состоянии s_k; $g_r(u \mid s_k)$ – одномерная плотность распределения вероятностей порядковой статистики ранга r при условии, что ОУ находится в состоянии s_k; $F(u \mid s_k)$ и $w(u \mid s_k)$ – одномерные интегральные и дифференциальные распределения состояний ОУ; $C_{n-1}^{r-1} = \dfrac{(n-1)!}{(r-1)!(n-r)!}$ – биномиальный коэффициент.

Из (7) следует, что ранги распределены равномерно независимо от вида и параметров распределения состояний ОУ. Это позволяет утверждать, что преобразования (5) обладают свойством инвариантности к распределению идентифицирующих переменных. Согласно (8) распределения порядковых статистик зависят от состояний ОУ. В этом проявляется свойство адаптивности преобразований (6).

В таблице отражены функции (2) при m=n!, n=3 и упорядочении ситуаций $R_k = R_k^{(r)}$ по ранговому признаку минимального $u^{(1)} = \min(u_1, u_2, u_3)\ (r = 1)$, медианного $u^{(2)} = \mathrm{med}(u_1, u_2, u_3)\ (r = 2)$ и максимального $u^{(3)} = \max(u_1, u_2, u_3)\ (r = 3)$ сигнала в кортеже (u_1, u_2, u_3) идентифицирующих переменных $u_i, i = \overline{1,3}$.

y_k	$R_k^{(1)}, r = 1$	$R_k^{(2)}, r = 2$	$R_k^{(3)}, r = 3$
y_1	$u_1 < u_2 < u_3$	$u_2 < u_1 < u_3$	$u_2 < u_3 < u_1$
y_2	$u_1 < u_3 < u_2$	$u_3 < u_1 < u_2$	$u_3 < u_2 < u_1$
y_3	$u_2 < u_1 < u_3$	$u_1 < u_2 < u_3$	$u_3 < u_1 < u_2$
y_4	$u_2 < u_3 < u_1$	$u_3 < u_2 < u_1$	$u_1 < u_3 < u_2$
y_5	$u_3 < u_1 < u_2$	$u_1 < u_3 < u_2$	$u_2 < u_1 < u_3$
y_6	$u_3 < u_2 < u_1$	$u_2 < u_3 < u_1$	$u_1 < u_2 < u_3$

В ИАРП функции, представленные таблицей, могут быть записаны в аналитическом виде:

$$\begin{cases} z_{11} = \pi_{21}\pi_{31}\pi_{32}y_1 = a_1^{(1)}y_1; \\ z_{12} = \pi_{21}\pi_{31}\pi_{23}y_2 = a_2^{(1)}y_2; \\ z_{21} = \pi_{12}\pi_{31}\pi_{32}y_3 = a_3^{(1)}y_3; \\ z_{22} = \pi_{12}\pi_{13}\pi_{23}y_4 = a_4^{(1)}y_4; \\ z_{31} = \pi_{21}\pi_{13}\pi_{32}y_5 = a_5^{(1)}y_5; \\ z_{32} = \pi_{12}\pi_{13}\pi_{23}y_6 = a_6^{(1)}y_6; \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} z_{11} = \pi_{12}\pi_{31}\pi_{32}y_1 = a_1^{(2)}y_1; \\ z_{12} = \pi_{21}\pi_{13}\pi_{23}y_2 = a_2^{(2)}y_2; \\ z_{21} = \pi_{21}\pi_{31}\pi_{32}y_3 = a_3^{(2)}y_3; \\ z_{22} = \pi_{12}\pi_{13}\pi_{23}y_4 = a_4^{(2)}y_4; \\ z_{31} = \pi_{21}\pi_{31}\pi_{23}y_5 = a_5^{(2)}y_5; \\ z_{32} = \pi_{12}\pi_{13}\pi_{32}y_6 = a_6^{(2)}y_6; \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases} z_{11} = \pi_{12}\pi_{13}\pi_{23}y_1 = a_1^{(3)}y_1; \\ z_{12} = \pi_{12}\pi_{13}\pi_{32}y_2 = a_2^{(3)}y_2; \\ z_{21} = \pi_{21}\pi_{31}\pi_{23}y_3 = a_3^{(3)}y_3; \\ z_{22} = \pi_{21}\pi_{31}\pi_{32}y_4 = a_4^{(3)}y_4; \\ z_{31} = \pi_{12}\pi_{31}\pi_{32}y_5 = a_5^{(3)}y_5; \\ z_{32} = \pi_{21}\pi_{31}\pi_{32}y_6 = a_6^{(3)}y_6. \end{cases} \tag{11}$$

Здесь $a_k^{(r)}$ есть весовые коэффициенты, порождаемые инвариантными преобразованиями (3).

Системы функций ИАРП (9)-(11) определяют алгоритмы аналитического конструирования СК с самообучением распознаванию отношений (1).

2. Структурный синтез СК

Алгоритмам (9)-(11) могут быть поставлены в соответствие коммутационные графы, которые обладают двумя особенностями. Во-первых, ранговые предикаты есть передачи соответствующих ветвей графа. Во-вторых, транзитные узлы при наличии у них двух и более входящих ветвей являются символами алгебраического сложения.

На рис. 1 представлен граф, соответствующий (9).

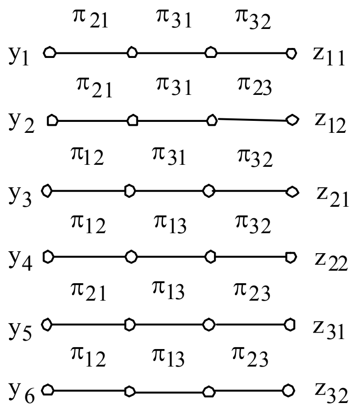

Рис.1.

При объединении в графе по рис. 1 выходных узлов $z_{11} = z_{12} = z_1$, $z_{21} = z_{22} = z_2$, $z_{31} = z_{32} = z_3$ и устранении избыточных ветвей получим трехвыводной граф, изображенный на рис. 2.

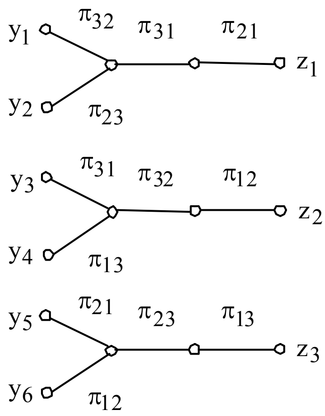

Рис. 2.

Коммутационный граф по рис. 1 является структурной схемой SC-модуля рангово-позиционной обработки аналоговых сигналов.

На рис. 3 приведено условное изображение SC-модуля, воспроизводящего одну из функций, представленных таблицей, $SC^{(r)}$-классификатор. Выходные сигналы схемы $SC^{(r)}$-классификатора определяются согласно (9)-(11) следующими выражениями:

$$\begin{cases} z_{11}=a_1^{(r)}y_1;\, z_{12}=a_2^{(r)}y_2;\, z_{21}=a_3^{(r)}y_3; \\ z_{22}=a_4^{(r)}y_4;\, z_{31}=a_5^{(r)}y_5;\, z_{32}=a_6^{(r)}y_6, \end{cases} \qquad (12)$$

где $\sum_{k=1}^{6} a_k^{(r)}=1;\ a_k^{(r)}\in\{0;1\};\ r=1,2,3$.

Согласно (12) схема по рис. 3 воспроизводит функцию ситуационного коммутирования с идентификацией отношения (1), которому соответствует сигнал $u^{(r)}\in\{u_1,u_2,u_3\}$ ранга $r\in\{1,2,3\}$. Идентификация осуществляется по двум информационным признакам: по адресу выхода, на котором появился коммутируемый сигнал $z_{ij}\neq 0$, и по уровню идентифицируемой переменной y_k.

При парном объединении смежных выходов схемы по рис. 3 получим $SOC^{(r)}$-классификатор (рис. 4), воспроизводящий ситуационно-порядковые функции

$$\begin{cases} z_1=a_1^{(r)}y_1+a_2^{(r)}y_2; \\ z_2=a_3^{(r)}y_3+a_4^{(r)}y_4; \\ z_3=a_5^{(r)}y_5+a_6^{(r)}y_6. \end{cases} \qquad (13)$$

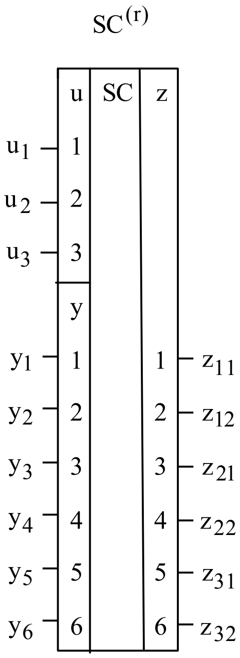

Рис. 3.

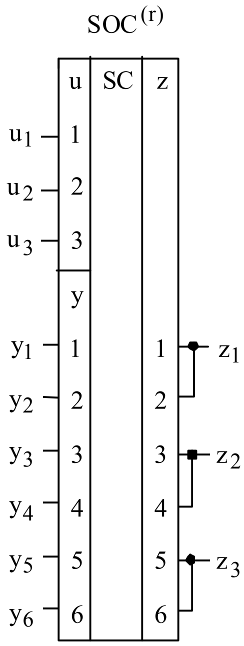

Рис. 4.

Из (13) следует, что в схеме $SOC^{(r)}$-классификатора переключение каналов осуществляется по адресному признаку сигнала $u^{(r)}$ ранга r в кортеже (u_1,u_2,u_3) идентифицирующих переменных. Поэтому схема по рис. 4 является адресным идентификатором сигнала $u^{(r)}\in\{u_1,u_2,u_3\}$.

3. Электрический синтез СК

Для воспроизведения функций (2) необходим соответствующий элементный базис. В качестве базиса может быть использован рангер [5,6], содержащий (рис. 5) последовательно соединенные компаратор CA и коммутатор SB. На рис. 6 показано обозначение рангера. Принцип его действия основан на управлении состоянием проводимости группы каналов $\underset{i}{k}\to\underset{i}{k},\ i=\overline{1,m}$, коммутатора. Если идентифицирующие сигналы u_i, u_j связаны отношением $R=\{u_i>u_j\}$ $(R=\{u_i<u_j\})$, то каналы с четными и нечетными номерами переводятся соответственно в состояние низкого (высокого) и высокого (низкого) выходного сопротивления. Выходные сигналы рангера определяются выражениями

$$z_k=\pi_{ij}y_k;\ z_{k+1}=(1-\pi_{ij})y_{k+1},\ k=\overline{1,m-1}.$$

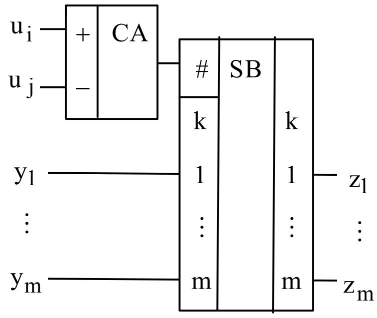

Рис. 5.

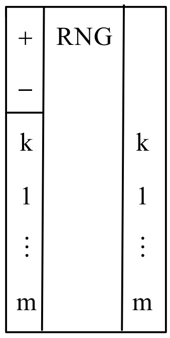

Рис. 6.

На рис. 7 приведена схема SC-модуля, синтезированная в базисе n рангеров RNG (n=3 для рис. 7).

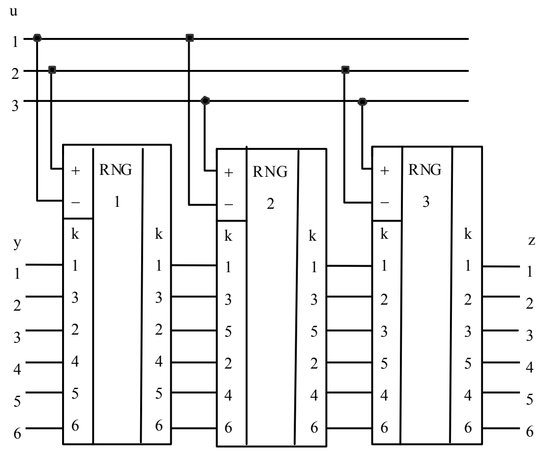

Рис. 7.

Настройка SC-модуля на воспроизведение функций (9)-(11) осуществляется коммутационным программированием согласно рис. 8.

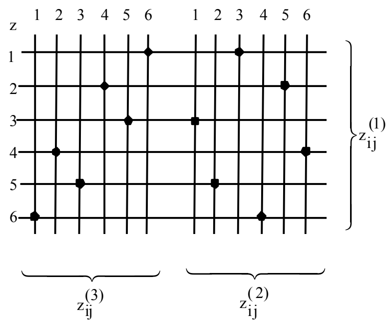

Рис. 8.

Аналогичным образом синтезируются SC-модули обработки четырех и более сигналов. В общем случае SC-модуль на n идентифицирующих переменных строится на 0,5n(n-1) последовательно соединенных по переключательным каналам рангерах, каждый из которых содержит один компаратор и n!-разрядный коммутатор.

Заключение

Предложенный подход позволяет путем коммутационного программирования воспроизводить полные классы ситуационных функций (2), порождаемых инвариантными преобразованиями (3).

Научная новизна: поставлена и решена задача синтеза СК с самообучением распознаванию состояний ОУ, заданных в виде отношений между наблюдаемыми случайными аналоговыми сигналами с произвольными распределениями мгновенных значений.

Сравнение с аналогом. По сравнению со схемными решениями, описанными в работе [7], рассмотренный подход обеспечивает более широкие функциональные возможности за счет воспроизведения полных классов инвариантных преобразований (2).

Практическая значимость. Наличие элементного базиса рангеров позволяет заменить широкую номенклатуру специализированных функциональных, логических, вычислительных, коммутационных, управляющих и измерительных преобразователей одним универсальным SC-модулем ситуационной обработки аналоговых сигналов.

Литература: 1. *Васильев В. И.* Распознающие системы. К.: Наук. думка, 1983. 424 с. **2.** *Плотников В. Н.* Речевой диалог в системах управления. М: Машиностроение, 1988. 224 с. **3.** *Руденко О.Г., Бодянский Е.В.* Основы теории искусственных нейронных сетей. Харьков: ТЕЛЕТЕХ, 2002. 317 с. **4.** *Бондарев В.Н., Аде Ф.Г.* Искусственный интеллект. Севастополь: Изд-во Сев НТУ, 2002. 615 с. **5.** *Полонский А.Д.* Инвариантная алгебра ранговых предикатов для синтеза классификаторов аналоговых сигналов // АСУ и приборы автоматики. 2003. Вып. 124. С. 99-106. **6.** *Полонский А.Д.* Синтез инвариантных классификаторов // Радиоэлектроника и информатика. 2003. Вып. 4. С. 51-55. **7.** *Шимбирев П. Н.* Гибридные непрерывно-логические устройства. М.: Энергоатомиздат, 1990. 174 с.

Поступила в редколлегию 10.09.2004

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Воробьев Г. С.

Полонский Александр Дмитриевич, канд. техн. наук, докторант кафедры искусственного интеллекта ХНУРЭ. Научные интересы: инвариантные системы. Адрес: Украина, 40001, Сумы, ул. Кирова-165, д. 140, кв. 41, тел. (0542) 627-950.

УДК 719.21

ЭВОЛЮЦИЯ СЛУЧАЙНЫХ ГРАФОВ В СИСТЕМЕ «МАЛЫХ МИРОВ»

ШЕРШЕНЬ В.Н.

Рассматриваются известные и новые методы исследования систем, поведение которых описывается в терминах графов (детерминированных и случайных). Предлагаются способы вычисления такой характеристики системы, как вероятность реализации путей между двумя произвольными узлами системы.

1. Актуальность исследования

В последнее время возрос интерес к исследованию сложных комплексных структур. С помощью таких структур описываются различные технические, информационные и биологические системы. Для моделирования таких систем используют случайные графы.

Наибольший интерес представляют разнообразные сети, которые описываются в терминах комплексных структур. Перечислим некоторые из них:

– сеть Internet — глобальная всемирная сеть, которая состоит из маршрутизаторов и компьютеров, соединенных между собой физическими и беспроводными линиями связи;

– WWW (World Wide Web — всемирная паутина) — собрание гипертекстовых, графических и прочих документов, доступных по всему миру через сеть Internet;

– «Единая энергосистема» — система из линий электропередач, охватывающая несколько государств (регионов), объединенных общими экономическими интересами;

– «Сеть ссылок» — множество источников, которые содержат информацию о работах в определенной области знаний

Не всегда удается для всех систем выбрать универсальные показатели, по которым можно было бы производить их синтез и сравнивать друг с другом. Важной характеристикой связей в указанных сетях является средняя длина пути — среднее число звеньев, соединяющих один адрес (вершину, узел, центр) с другим. В этой работе исследуются вероятности реализации путей между двумя произвольными узлами сети. При этом используется терминология случайных графов.

За последнее время были предложены различные подходы для решения поставленной задачи. Эти подходы во многом основываются на следующих понятиях: кластеризация; распределение порядка и «малые миры».

В большинстве случаев при решении таких задач применяются знания из области случайных графов. Опишем вкратце приведенные выше понятия.

Кластеризация — наиболее типичное свойство для социальных сетей: в любом социальном обществе образуются группы людей, в каждой из которых любой член группы знаком со всеми остальными членами этой же группы. Это свойство определяется коэффициентом кластеризации — отношением количества присутствующих в системе связей к максимально возможному числу связей, которые могут возникнуть:

$$C = \frac{2 \cdot E}{N \cdot (N-1)}.$$