

Зарецкий Дмитрий Сергеевич

Московский Энергетический Институт (Технический Университет).

E-mail: zardim@yandex.ru.

143992, г. Балашиха, Московская область, мкр. Заря, ул. Садовая, 8, корп. 3, кв. 10.

Тел.: +79165788560.

Кафедра прикладной математики; студент.

Vagin Vadim Nikolaevich

Moscow Power Engineering Institute (Technical University).

E-mail: vagin@appmat.ru.

47/3 ap. 137, Lenina Street, Krasnogorsk, Moscow Region, 143400, Russia.

Phone: +79152399103.

The Department of Applied Mathematics; Professor.

Zaretsky Dmitry Sergeevich

Moscow Power Engineering Institute (Technical University).

E-mail: zardim@yandex.ru.

8/3, ap. 10, Sadovaya Street, building estate Zarya, Balashiha, Moscow Region, 143992, Russia.

Phone: +79165788560.

The Department of Applied Mathematics; Student.

УДК 519.816.

С.М. Ковалев, С.А. Кулькин, В.А. Терновой

**ФОРМИРОВАНИЕ ТЕМПОРАЛЬНЫХ СЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ
ГРАФОВЫХ ПОКРЫТИЙ***

Рассматривается подход к формированию минимальных темпоральных пирамидальных сетей (ТМПС) в базах данных временных рядов. ТМПС является сетевой моделью, в структуре которой объединены образы всех сценариев, предшествующих вхождению символа q во временной ряд (ВР) S . Изложены алгоритмы формирования ТМПС, использующие ряд количественных характеристик, отражающих потенциальную полезность применения той или иной группы темпоральных отношений в качестве обобщающих или детализирующих признаков.

Растущая пирамидальная сеть; временной ряд; темпоральные правила; база данных; сетевая модель.

S.M. Kovalev, S.A. Kulkin, V.A. Ternovoy

**FORMATION TEMPORAL NETWORK MODELS ON THE BASIS OF GRAPH
COVERINGS**

In article the approach to formation minimal temporal pyramidal networks (TMPN) in databases of time numbers is considered. TMPN is network model in which structure images of all scenarios previous occurrence of a symbol q in a time number (TN) S are united. The algorithms of formation TMPN using a number of quantitative characteristics, reflecting potential utility of application of this or that group temporal relations as generalising or detailing signs are stated.

Growing pyramidal network; time number; temporal rules; Database; Network model.

Эффективным инструментом формирования обобщенных описаний данных, имеющих темпоральные особенности и представляемые в виде временных рядов (ВР) $S = (s(t_1), s(t_2), \dots, s(t_n))$, являются темпоральные сетевые модели (ТМПС) [3].

* Работа выполнена при поддержке РФФИ: (гранты № 10-01-00058, № 10-07-00158).

ТМПС представляет собой вариант РПС [1], формируемой на основе темпоральных данных [2,4], в структуре которой объединены обобщенные образы всех типовых темпоральных паттернов, содержащихся в данных. Темпоральный паттерн в базе данных ВР представляется темпоральной логической формулой, переменными которой являются темпорально-метрические отношения $\varphi_i = g\tau^k(t_i)$, определяемые относительно текущего момента времени t_i следующим образом:

$$g\tau^k \Leftrightarrow (\exists g = s(t_j) \in S) (j - i = k). \quad (1)$$

Отношение (1) имеет смысл выражения “В предшествовании к тактов появился g”.

Темпоральная формула Φ имеет вид выражения:

$$\Phi = (\&\varphi_{i_j}) \& \neg(\&\varphi_{i_k}) \& \dots \& \neg(\&\varphi_{i_p}), \quad (2)$$

где $\varphi_{i_j}, \varphi_{i_k}, \varphi_{i_p}$ – темпоральные отношения типа (1).

Темпоральная формула (2) включает в себя две группы отношений, характеризующих два класса обобщающих и детализирующих признаков представляемого ею темпорального образа, относительно целевого символа q . Конъюнктивная группа $\&\varphi_{i_j}$ характеризует обобщающие свойства темпорального образа, а инверсные конъюнкты $\neg(\&\varphi_{i_k}), \dots, \neg(\&\varphi_{i_p})$, выступают в качестве детализирующих признаков, описывающих отличительные свойства “чужих” темпоральных образов, попадающих в зону влияния обобщающих признаков.

Модель ТМПС определяется для заданного ВР S и целевого символа $q \in S$, относительно которого формируется темпоральный образ.

Пусть S – ВР и $q = s(t_i)$ – произвольный символ ВР, относящийся к некоторому моменту времени t_i . Для символа $q = s(t_i)$ выпишем l предшествующих ему символов $g = s(t_{i-1}), p = s(t_{i-2}), \dots, h = s(t_{i-l})$. Тогда вектор (g, p, \dots, h) описывает временной сценарий, предшествующий вхождению символа q во ВР S в момент t_i , который представим множеством

$$e_i = e(s(t_i)) = \{g\tau^j(t_i) / g = s(t_{i-j}) \ j = 1, \dots, l\}.$$

называемым (l, t_i) -окном ВР относительно символа $s(t_i)$.

Обозначим через $E = \{e_i / i = l, l+1, \dots, n\}$ множество всех l -окон ВР S и разобьем его на два подмножества положительных E^+ и отрицательных E^- примеров:

$$E^+ = \{e(s(t_i)) \in S / s(t_i) = q\} \quad E^- = \{e(s(t_i)) / s(t_i) \neq q\}.$$

Модель ТМПС представляется в виде сетевого ациклического графа $H = \langle X, \Gamma \rangle$, содержащего три слоя вершин $X = T \cup G \cup D$. Слой T соответствует входному множеству первичных признаков $\varphi_{i_j} = g\tau^k$, слой G – множеству обобщающих признаков, а слой D – множеству детализирующих признаков. Отображение Γ задает структуру межслойных связей таким образом, что вершины входного

слоя Т связаны исходящими дугами с вершинами второго и третьего слоя, образуя соответственно конъюнктивные группы обобщающих и детализирующих признаков формируемых в ТМПС темпоральных образов описаний. Вершины второго (обобщающего) слоя своими дугами заходят в вершины третьего (детализирующего) слоя, устанавливая связь между обобщающими и детализирующими признаками.

Формирование ТМПС осуществляется на основе анализа ряда количественных характеристик, отражающих потенциальную полезность использования той или иной группы темпоральных отношений в качестве обобщающих или детализирующих признаков. Для обобщающих признаков наиболее ценной характеристикой в контексте формирования минимальной ТМПС является частота их встречаемости в примерах формируемого класса описаний. Однако слишком частое вхождение обобщающего признака в примеры описаний может вызывать эффект “переобобщения”, когда в область описания признака попадают отрицательные примеры, характеризующие темпоральные образы, предшествующие другим символам $g \neq q$. Для компенсации этого эффекта потребуется включение в описание образов дополнительных исключаяющих признаков, что в конечном итоге приводит к ухудшению интерпретационных свойств ТМП. В связи со сказанным, при формировании обобщенных признаков желательно использовать такие сочетания отношений, которые, с одной стороны, присутствуют в как можно большем числе положительных примеров описаний формируемого образа, а, с другой стороны, как можно реже встречаются среди отрицательных примеров. Такому компромиссу отвечает следующий критерий:

$$K(\&\varphi_j) = \frac{|E^+(\&\varphi_j)|}{|E^+|} \cdot \left(1 - \frac{|E^-(\&\varphi_j)|}{|E^-|}\right), \quad (3)$$

где $\&\varphi_j = s(t_{j_1})\tau^{j_1} \& s(t_{j_2})\tau^{j_2} \& \dots \& s(t_{j_m})\tau^{j_m}$ – конъюнктивная группа темпоральных отношений, соответствующая обобщающему признаку g ;
 $E^+(\&\varphi_j) = \{e \in E^+ / \varphi_j \in e\}$, $E^-(\&\varphi_j) = \{e \in E^- / \varphi_j \in e\}$.

Другой важной характеристикой обобщающего признака в контексте интерпретационной пригодности ТМП является общее число переменных, используемых при описании признака в antecedенте ТМП, а также глубина представляемого им темпорального образа, определяющая временной интервал, в пределах которого выявляется корреляция между символами. Общее число переменных определяется числом отношений, входящих в обобщающий признак, которое может быть уменьшено за счет дополнительных темпоральных обобщений с привлечением интервально-метрического отношения $g\tau_n^k$, Семантика данного отношения определяется на основании формулы:

$$g\tau_n^k \Leftrightarrow (g\tau^k) \& (g\tau^{k-1}) \& \dots \& (g\tau^{k-n}) \quad (4)$$

и имеет смысл выражения “В предшествовании k тактов в течение n тактов наблюдался g ”.

Уменьшение глубины формируемых темпоральных образов предполагает использование в описаниях темпоральных отношений $g\tau^k$ с минимальными значениями темпорального индекса k . С этой целью при выборе кандидатов в группы обобщающих признаков приоритет отдается отношениям с минимальными значениями темпоральных индексов.

Алгоритм формирования оптимального множества признаков для обобщающего слоя ТМПС базируется на ряде эвристик, основанных на анализе выше приведенных количественных характеристик обобщающих признаков. Он представляет собой итерационную процедуру, на каждой итерации которой формируется текущая группа темпоральных отношений, являющаяся минимальным покрытием подмножества положительных примеров с учетом критерия (3).

Детализирующие признаки описывают те подобласти признаковых пространств, покрываемые обобщающими признаками, в которые из-за эффекта переобобщения попали примеры “чужих” описаний. Поэтому для каждого обобщающего признака, покрывающего зону “чужих” примеров, формируется свое подмножество детализирующих признаков, позволяющих исключить эти примеры из обобщенного описания.

Пусть g – обобщающий признак (вершина ТМПС ($g \in G$)), $E^-(g) = \{e^- \in E^- / T(g) \subseteq e\}$ – множество отрицательных примеров относительно g , $E^+(g) = \{e^+ \in E^+ / T(g) \subseteq e\}$ – множество положительных примеров относительно g . В силу отсекающего условия () для любого i -го отрицательного примера $e_i^- \in E^-(g)$ должен найтись детализирующий признак d (вершина $d \in \Gamma(g)$), который своим признаковым множеством $T(d)$ включается в e_i^- и не включается ни в один из положительных примеров $e^+ \in E^+(g)$. Это требование удовлетворяется тогда и только тогда, когда для каждого из положительных примеров $e_j^+ \in E^+(g)$ в детализирующем признаке d найдется отношение φ_{ij} , входящее в e_i^- и не входящее в e_j^+ , т.е. принадлежащее разности множеств $e_i^- - e_j^+ = e_i^- / e_j^+$. Данному условию отвечает следующий дизъюнкт:

$$(\varphi_{i_1} \vee \varphi_{i_2} \vee \dots \vee \varphi_{i_n}) = \bigvee_k \varphi_{i_k}, \quad (5)$$

где $\varphi_{i_k} \in e_i^- - e_j^+$.

Условие (5) должно выполняться для всех положительных примеров $e_j^+ \in E^+(g)$, чему отвечает конъюнкт:

$$(\varphi_{i_1} \vee \varphi_{i_2} \vee \dots \vee \varphi_{i_n}) \& (\varphi_{i_{21}} \vee \varphi_{i_{22}} \vee \dots \vee \varphi_{i_{2m}}) \& \dots \& (\varphi_{i_{r1}} \vee \varphi_{i_{r2}} \vee \dots \vee \varphi_{i_{rp}}) \quad (6)$$

Очевидно, что любая из импликант выражения (7) удовлетворяет отсекающему условию (6) относительно отрицательного примера e_i^- , а, следовательно, может быть использована в качестве детализирующего признака для i -го отрицательного примера e_i^- . Раскрыв скобки в (6) и используя закон поглощения, получаем выражение, характеризующее множество всех минимальных импликант, соответствующих минимальным детализирующим признакам (признакам, с минимальным числом входящих в них отношений):

$$(\varphi_{i_{11}} \cdot \varphi_{i_{21}} \cdot \dots \cdot \varphi_{i_{r_1}}) \vee \dots \vee (\varphi_{i_{1j}} \cdot \varphi_{i_{2j}} \cdot \dots \cdot \varphi_{i_{r_n}}) \vee \dots \vee (\varphi_{i_{1n}} \cdot \varphi_{i_{2n}} \cdot \dots \cdot \varphi_{i_{r_p}}).$$

Для удобства далее для обозначения логических операций конъюнкции и дизъюнкции будем иногда использовать знаки арифметических операций “ \cdot ” и “ \vee ”. Перепишем последнее выражение в виде:

$$J_{i_1} \vee J_{i_2} \vee \dots \vee J_{i_n}, \quad (7)$$

где $J_{i_j} = \varphi_{i_{j1}} \cdot \varphi_{i_{j2}} \cdot \dots \cdot \varphi_{i_{jn}}$ – j -я импликанта выражения (7).

Составив аналогичные выражения для всех отрицательных примеров и взяв их конъюнкцию приходим к выражению, характеризующему полное множество детализирующих признаков для исходного обобщающего признака g :

$$(J_{1_1} \vee J_{1_2} \vee \dots \vee J_{1_n}) \cdot (J_{2_1} \vee J_{2_2} \vee \dots \vee J_{2_m}) \cdot \dots \cdot (J_{z_1} \vee J_{z_2} \vee \dots \vee J_{z_p}), \quad (8)$$

где z – количество отрицательных примеров в $E^-(g)$.

Раскрыв скобки в (8) и используя закон поглощения, приходим к выражению, характеризующему минимальные подмножества детализирующих признаков:

$$(J_{1_1} \cdot J_{2_i} \cdot \dots \cdot J_{z_i}) \vee (J_{1_j} \cdot J_{2_j} \cdot \dots \cdot J_{z_j}) \vee \dots \vee (J_{1_k} \cdot J_{2_k} \cdot \dots \cdot J_{z_k}). \quad (9)$$

Понятно, что оптимальному набору детализирующих признаков в зависимости от выбранного критерия интерпретационной пригодности в (9) отвечает один из конъюнктов, содержащий, например, минимальное число входящих в него импликант либо минимальное число всех входящих в него отношений, либо конъюнкт, содержащий отношения с минимальными темпоральными индексами. Естественно, возможны также и различные комбинации выше приведенных критериев.

Выше приведенные рассуждения положены в основу алгоритма формирования оптимальных множеств детализирующих признаков. Исходные данные для алгоритма представляются в виде прямоугольной матрицы M_d , строки которой соответствуют темпоральным отношениям $\varphi = g\tau^k$. Столбцы матрицы объединены в z групп, соответствующих отрицательным примерам e^- , каждая из которых содержит по m столбцов, соответствующих положительным примерам. На пересечении n -й строки и j -го столбца i -й группы проставляется 1, если n -й признак входит в подмножество $e_i^- - e_j^+$. Таким образом, матрица M_d получена путем объединения z матриц, соответствующих отрицательным примерам. Каждая из подматриц матрицы M_d содержит данные для формирования группы отношений, описывающих детализирующий признак для соответствующего отрицательного примера. Алгоритм формирования детализирующих признаков сводится к процедуре поиска оптимального строкового покрытия m объединенных матриц.

Поиск покрытий является np -полной проблемой, однако, в настоящее время в теории оптимизации разработаны весьма эффективные полиномиальные алгоритмы решения задач о покрытиях, приводящие в большинстве случаев к строго оптимальным решениям. В основу предлагаемого метода положена известный вариант “жадного” алгоритма, хорошо зарекомендовавший себя во многих практических приложениях, модифицированный под условия рассматриваемой задачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гладун В.П.* Планирование решений / В.П. Гладун. – Киев: Наукова думка, 1987. – 168 с.
2. *Ковалев С.М.* Гибридные коннекционистские модели извлечения темпоральных знаний в информационных базах данных // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. научн. тр. V Международной научно-практической конференции. Т1. – М.: Физматлит, 2009. – С. 30-41.
3. *Ковалев С.М.* Формирование темпоральных баз знаний на основе аппарата растущих пирамидальных сетей // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. научн. тр. III Международного научно-практического семинара. – М.: Физматлит, 2005. – С. 351-357.
4. *Bernshtein L.S., Kovalev S.M. and Muravskii A.V.* Models of Representation of Fuzzy Temporal Knowledge in Databases of Temporal. Series ISSN 1064 2307, Journal of Computer and Systems Sciences International, 2009. – Vol. 48, №. 4. – P. 625-636. © Pleiades Publishing, Ltd., 2009. Original Russian Text © L.S. Bernshtein, S.M. Kovalev, A.V. Muravskii, 2009, published in Izvestiya Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravleniya, 2009. – №. 4. – P. 130-141.
5. *Курейчик В.В., Курейчик В.М., Ковалев С.М.* Опточечеткие системы // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск "Интеллектуальные САПР". – 2009. – № 4 (93). – С. 99-106.

Ковалев Сергей Михайлович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного ополчения, 2.
E-mail: dcmdon@rgups.ru.
Тел.: 88632726302.
Кафедра автоматике и телемеханики; профессор.

Кулькин Станислав Александрович

Кафедра автоматике и телемеханики; инженер.

Терновой Владимир Александрович

Кафедра автоматика и телемеханики; аспирант.

Kovalev Sergey Mihailovich

Rostov State Transport Univesity (RSTU).
E-mail: dcmdon@rgups.ru.
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia.
Phone: +78632726302.
The Departament of Automatics and Telemechanics; Professor.

Kulkin Stanislav Alexandrovich

The Departament of Automatics and Telemechanics; Engineer.

Ternovoy Vladimir Alexandrovich

The Departament of Automatics and Telemechanics; Postgraduate Student.

УДК 685.518.5

В.А. Зеленцов

**МНОГОАГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ УПРАВЛЕНИИ
ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ***

Предложена многоагентная интерпретация задачи двухуровневого управления эксплуатацией сложных систем. Разработаны многокритериальные модели принятия решений агента-координатора на верхнем уровне и агентов-исполнителей на нижнем уровне, а также условия согласования решений агентов. Показано, что согласование решений достигается при использовании определенной процедуры информационного обмена между агентами,

* Работа выполнена при поддержке: РФФИ (гранты № 10-07-00311, № 10-07-90407).