

УДК 004.89

Д. А. Страбыкин

ЗАДАЧА ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА ЗАКЛЮЧЕНИЙ В ИСЧИСЛЕНИИ ПРЕДИКАТОВ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ УТВЕРЖДЕНИЙ

При построении интеллектуальных систем прогнозирования развития ситуаций в заданную фазу может быть использован дедуктивный логический вывод заключений с определением предшествующих утверждений. Дается содержательная и формальная постановки задачи логического вывода заключений в исчислении предикатов с определением предшествующих утверждений. Задача логического вывода заключается в определении последовательности множеств утверждений, первое из которых содержит заключение, последнее – только факты, остальные множества содержат утверждения, часть которых может быть фактами, а оставшиеся утверждения следуют из предшествующих утверждений. Рассматривается модификация метода логического вывода делением дизъюнктов для определения предшествующих заключению утверждений. Изменения вносятся в процедуры частичного и полного деления дизъюнктов, а также в процедуру вывода. При этом высокая степень параллелизма выполняемых вычислений сохраняется. Приводится пример логического вывода с использованием исчисления предикатов первого порядка.

Ключевые слова: дедуктивный логический вывод, исчисление предикатов, множество предшествующих заключению утверждений, логическое прогнозирование, интеллектуальные системы.

Разработка интеллектуальных систем (ИС) для различных областей применения способствует развитию и модификации известных методов моделирования рассуждений. Перспективным направлением науки, изучающим методы и алгоритмы моделирования рассуждений, является использование логики [1]. Представляет интерес создание ИС прогнозирования на основе логического вывода [2]. При построении ИС прогнозирования развития ситуаций в задан-

ную фазу возникает потребность в дедуктивном логическом выводе заключений с определением предшествующих утверждений [5]. При этом заданная фаза описывается выводимым заключением, а прогнозируемые предшествующие фазы – предшествующими заключению утверждениями.

Метод логического вывода заключений с определением предшествующих утверждений в исчислении высказываний представлен в работе [3]. Между тем использование для описания ситуаций в качестве формальной системы исчисления высказываний значительно сужает область практического применения разработанного метода. В связи с этим актуальной является задача разработки метода логического вывода заключений с определением предшествующих утверждений в исчислении предикатов, обладающем большими выразительными возможностями для описания развития ситуаций. В работе [4] предложен метод логического вывода заключений в исчислении предикатов с определением фактов, однако метод не позволяет определять утверждения, необходимые для вывода заключения, не являющиеся фактами, а представляющими собой логические следствия ранее полученных утверждений.

В статье дана содержательная и формальная постановки задачи логического вывода заключений в исчислении предикатов первого порядка с определением предшествующих утверждений. Рассмотрена модификация метода дедуктивного логического вывода делением дизъюнктов для определения предшествующих заключению утверждений.

Содержательная постановка задачи. Используется логическая модель знаний, в которой ситуации описываются формулами исчисления предикатов первого порядка. Простейшие утверждения (факты) о возникновении тех или иных событий, явлений (признаков, действий и т. д.) представляются предикатами, содержащими константы вместо переменных. Связи между утверждениями задаются правилами, содержащими более одно предиката. Факты и правила образуют множество исходных посылок для логического вывода заключе-

ния, в качестве которого в простейшем случае выступает предикат, описывающий прогнозируемую фазу развития ситуации.

Определение фазы, предшествующей прогнозируемой возможно с помощью обратного дедуктивного вывода. В этом случае для заключения находится множество предшествующих утверждений, из которых оно непосредственно следует. Множество полученных утверждений описывает фазу ситуации, предшествующую прогнозируемой. Одна часть этих утверждений может представлять собой факты, а другая – является утверждениями, для которых, в свою очередь, могут быть определены множества предшествующих утверждений. Процесс логического вывода завершается, когда на очередном шаге все полученные предшествующие утверждения оказываются фактами.

Таким образом, задача логического вывода заключается в определении последовательности множеств утверждений, первое из которых содержит заключение, последнее – только факты, остальные множества содержат утверждения, часть которых может быть фактами, а оставшиеся утверждения следуют из предшествующих утверждений.

Формальная постановка задачи. Задачу логического вывода заключений с определением предшествующих утверждений можно сформулировать следующим образом. Имеются исходные непротиворечивые посылки, заданные в виде множества дизъюнктов $M=\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$, причем каждый дизъюнкт содержит один положительный (не имеющий инверсии) литерал. Множество M включает подмножество M^F однолитеральных дизъюнктов – фактов. Также имеется заключение, представленное выводимым дизъюнктом d , который состоит из положительных литералов. Задача формулируется следующим образом:

1) установить выводимость заключения, представленного дизъюнктом d , из множества исходных посылок, заданных множеством дизъюнктов M ;

2) определить для выводимого заключения d семейство множеств утверждений $G^H=\{G_1, \dots, G_h, \dots, G_H\}$, в котором множество G_h ($h=1, \dots, H$) состоит из

утверждений (представленных положительными литералами), обеспечивающих с помощью множества посылок M^h ($M^h \subseteq M$) вывод утверждений множества G_{h-1} : $G_h, M^h \Rightarrow G_{h-1}$ и $G_0 = \{d\}$, при этом каждый литерал e множества G_h является либо следствием литералов множеств G_{h+1}, \dots, G_n , либо совпадает с одним из фактом f подмножества M^F после применения к ним унифицирующей подстановки λ ($\lambda e = \lambda f$, подстановка может быть пустой).

Задача вывода предшествующих заключению утверждений в исчислении предикатов может быть решена с помощью метода деления дизъюнктов после модификации используемых в нем процедур. Метод строится на основе процедур частичного и полного деления дизъюнктов, а также специальной процедуры вывода, которые получаются путем модификации аналогичных известных процедур [4].

Частичное деление дизъюнктов. Частичное деление дизъюнктов выполняется с помощью специальной процедуры образования остатков, которая является одной из основных процедур, используемых в методе деления дизъюнктов для логики предикатов. Процедура предполагает, что посылки и заключение представлены в виде дизъюнктов. Исходные выражения посылок и заключения в исчислении предикатов приводятся к требуемому виду с помощью специальных алгоритмов. Для описания процедуры образования остатков используются следующие обозначения.

$\omega = \langle b, d, r, q, n \rangle$ – процедура образования остатков, в которой:

b – остаток-делимое (дизъюнкт посылки), используемый для получения остатков;

d – остаток-делитель (дизъюнкт заключения), участвующий в образовании остатков;

r – частное – множество литералов, исключенных из дизъюнкта, выступавшего в качестве делимого при формировании остатка-делимого b (для дизъюнкта посылки $r=0$);

q – частный признак решения, имеющий три значения: «0» – получен хотя бы один нулевой остаток, «1» – все полученные остатки равны единице, «g» – получено более одного остатка неравного единице при отсутствии нулевых остатков;

$n = \{ \langle b_t, d_t, r_t \rangle, t=1, \dots, T \}$ – множество троек, состоящих из нового остатка-делимого b_t и соответствующего ему остатка-делителя d_t , а также множества литералов r_t , использованных при формировании остатка b_t в результате применения процедуры ω .

Для определения предшествующих заключению утверждений в известную процедуру частичного деления дизъюнктов вводится вычисление частных. Частное представляет собой множество литералов, исключенных из дизъюнкта, выступавшего в качестве делимого при формировании остатка-делимого.

Полное деление дизъюнктов. Полное деление дизъюнктов направлено на получение, так называемых, конечных остатков и формирование множества литералов, используемых в процессе логического вывода. Будем говорить, что остаток-делимое b является для остатка-делителя d конечным, если применение к нему процедуры $\omega = \langle b, d, q, n, r \rangle$ не порождает новых, отличных от единицы, остатков. Конечным может быть исходный остаток b или вновь полученный остаток b_t . При полном делении дизъюнктов в результирующее множество остатков включаются основные остатки, к которым относятся однолитеральные конечные остатки, а также конечные остатки с двумя и более литералами, не содержащими переменных.

Полное деление дизъюнктов выполняются с учетом фактов (однолитеральных исходных дизъюнктов) с помощью специальной процедуры.

$\Omega = \langle D, d, R, Q, N \rangle$ – процедура полного деления дизъюнкта посылки D на дизъюнкт d , в которой:

R – множество литералов, использованных для вывода дизъюнкта d (для дизъюнкта выводимого заключения $R = \emptyset$);

Q – признак решения, имеющий три значения: «0» – решение найдено, «1» – дизъюнкт D не имеет по дизъюнкту d остатков, отличных от единицы, «G» – получено множество конечных остатков;

$N = \{ \langle B_j, R_j \rangle, j=1, \dots, J \}$ – множество пар, состоящих из конечного остатка B_j и множества R_j литералов, использованных при его формировании. При $Q=0$ $N = \{ \langle 0, R' \rangle \}$, где множество R' состоит из литералов, использованных для вывода дизъюнкта d , и литералов, использованных при формировании нулевых остатков. При $Q=1$ $N = \{ \langle 1, \emptyset \rangle \}$.

Формирование множества остатков производится путем многократного применения ω -процедур и состоит из ряда шагов. На каждом шаге ω -процедуры применяются к имеющимся остаткам-делимым и остаткам-делителям, образуя новые остатки-делимые и новые остатки-делители, которые используются в качестве исходных данных на следующем шаге. Процесс заканчивается, когда на очередном шаге обнаруживается ω -процедура, в которой получены нулевые остатки ($q=0$), или во всех ω -процедурах данного шага будут сформированы признаки, свидетельствующие о получении конечных остатков ($q=1$).

Для определения предшествующих заключению утверждений в известную процедуру полного деления дизъюнктов вводится вычисление множества литералов, использованных для вывода дизъюнкта и множеств литералов, использованных при формировании конечных остатков.

Процедура вывода. Процедура позволяет сделать шаг вывода, преобразуя выводимый дизъюнкт во множество новых дизъюнктов, необходимых для продолжения вывода на следующем шаге.

$w = \langle M, d, f, o, p, m \rangle$ – процедура вывода, в которой:

$M = \{ D_1, D_2, \dots, D_i, \dots, D_I \}$ – множество исходных дизъюнктов;

$D_i = L_1^i \vee L_2^i \vee \dots \vee L_j^i \vee \dots \vee L_{J_i}^i$ – i -й исходный дизъюнкт, состоящий из ли-

тералов L_j^i ;

$d=L_1\vee L_2\vee\dots\vee L_k\vee\dots\vee L_K$ – выводимый дизъюнкт, состоящий из литералов L_k ;

$o=\langle c,C\rangle$ – пара множеств текущих остатков, состоящая из множеств остатков, образованных до выполнения (c) и после выполнения (C) процедуры;

p – признак окончания вывода, имеющий три значения: «0» – вывод завершен успешно, «1» – вывод завершен не удачно, «G» – требуется продолжение вывода для полученных выводимых секвенций;

f – множество литералов, использованных для вывода дизъюнкта d из дизъюнктов множества M (для дизъюнкта выводимого заключения это пустое множество);

$m=\{\langle d_g,R_g\rangle, g=1,\dots,G\}$ – множество пар: новый выводимый дизъюнкт d_g и соответствующее ему множество R_g литералов, использованных при его выводе. При $p=0$ $m=\{\langle 1,f'\rangle\}$, где дизъюнкт f' состоит из литералов, использованных для вывода дизъюнкта d , и литералов, использованных при формировании нулевых остатков. При $p=1$ $m=\{\langle 0,\emptyset\rangle\}$.

Процедура вывода использует в качестве субпроцедуры ранее рассмотренную Ω -процедуру формирования остатков. Процедура вывода отличается от известной процедуры тем, что определяет множество литералов, использованных для вывода дизъюнкта из множества дизъюнктов, а также тем, что формирует множество пар: новый выводимый дизъюнкт и соответствующее ему множество литералов, использованных при его выводе.

Метод вывода. Выводимое заключение представляется множеством дизъюнктов. Вывод методом деления дизъюнктов сводится к многократному применению w -процедур и состоит из ряда шагов. На каждом шаге вывода w -процедуры применяются к имеющимся выводимым и исходным дизъюнктам, образуя новые выводимые дизъюнкты, используемые на следующем шаге. Множества литералов, использованных для вывода дизъюнктов шага, объединяются во множество литералов предшествующих утверждений (G_h) и формируется семейство множеств утверждений $G^h=\{G_1,\dots,G_h\}$. Процесс вывода за-

канчивается, когда на очередном шаге обнаруживается дизъюнкт, для которого вывод не возможен ($p=1$), или для всех, выводимых на данном шаге дизъюнктов, будут сформированы признаки успешного завершения вывода ($p=0$). Особенностью метода является формирование семейства множеств литералов предшествующих утверждений.

Пример. Применение логического вывода заключений с определением предшествующих утверждений рассмотрим на примере (таблица) [4].

Исходные данные для логического вывода

Знания	Посылки / заключение	Дизъюнкты
Факты	1) руководит(Сергей,Борис)	$D_1=P(c,b)$
	2) руководит(Борис,Анна)	$D_2=P(b,a)$
	3) руководит(Анна,Евгений)	$D_3=P(a,e)$
Правила	4) руководит(x,y)→ →отчитывается(y,x)	$D_4=\neg P(x,y)\vee O(y,x)$
	5) руководит(z,u)& &отчитывается(s,u)→ →отчитывается(s,z)	$D_5=\neg P(z,u)\vee \neg O(s,u)\vee O(s,z)$
Заключение	б) «Евгений отчитывается перед Сергеем?»	$d=O(e,c)$

Логический вывод состоит из трех шагов и завершается успешно. На первом шаге формируется семейство множеств предшествующих утверждений $G^1=\{G_1\}$, где $G_1=\{P(c,b),O(e,b)\}$. На втором шаге семейство пополняется множеством $G_2=\{P(b,a),O(e,a)\}$: $G^2=\{G_1,G_2\}$. На третьем шаге семейство пополняется множеством $G_3=\{P(a,e)\}$: $G^3=\{G_1,G_2,G_3\}$. В результате получается следующее семейство множеств предшествующих заключению $O(e,c)$ утверждений $G^3=\{P(c,b),O(e,b)\},\{P(b,a),O(e,a)\},\{P(a,e)\}$. Логический вывод в исчислении предикатов может быть представлен схемой вывода. Схемы вывода в исчислении предикатов имеют две особенности: дуги графов помечаются литералами,

и вершинам графов сопоставляются исходные посылки, модифицированные унифицирующими подстановками. Схема логического вывода для рассмотренного примера приведена на рисунке, где $\lambda_1=\{c/z^1, b/u^1, e/s^1\}$, $\lambda_2=\{b/z^2, a/u^2, e/s^2\}$, $\lambda_3=\{e/x^3, a/y^3\}$ – унифицирующие подстановки.

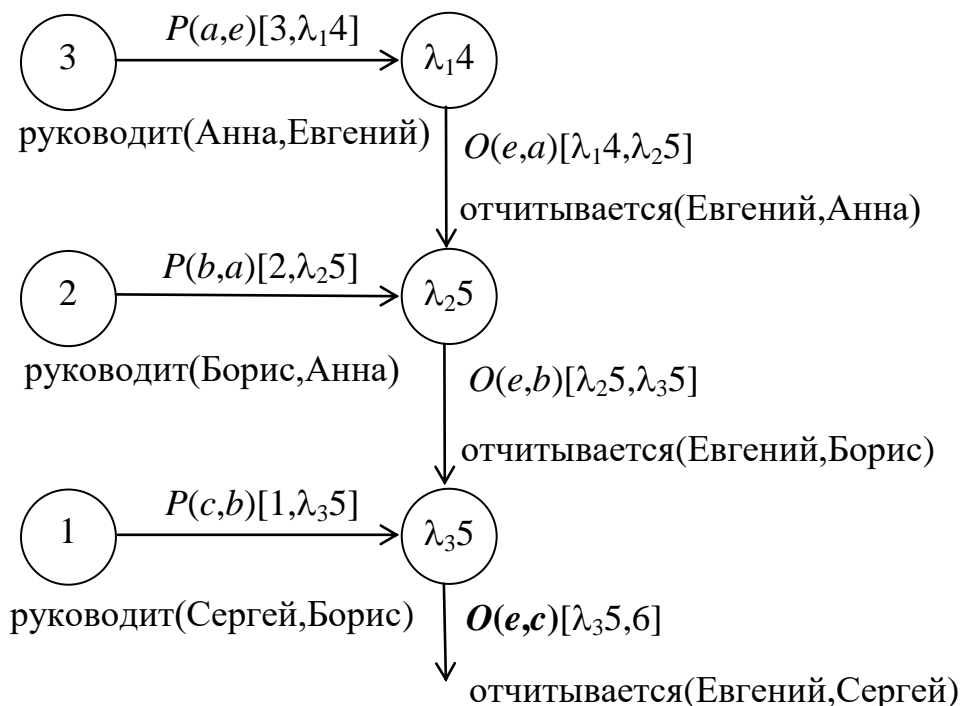


Схема логического вывода заключения «отчитывается (Евгений,Сергей)»

Рассмотренный метод вывода заключений в исчислении предикатов с определением предшествующих утверждений, первоначально ориентированный на логическое прогнозирование развития ситуаций, может применяться и в интеллектуальных системах другого назначения. Важным достоинством метода является высокая степень параллелизма выполняемых вычислений. Параллелизм вычислений проявляется на четырех уровнях: унификации литералов (частичное деление дизъюнктов); деления пар дизъюнктов (полное деление дизъюнктов); деления исходных дизъюнктов на выводимый дизъюнкт (процедура вывода); деления исходных дизъюнктов на все выводимые дизъюнкты (метод вывода). Многоуровневый параллелизм метода позволяет эффективно приме-

нять его при реализации интеллектуальных систем на современных высокопроизводительных параллельных вычислительных платформах.

Список литературы

1. Вагин В. Н., Головина Е. Ю., Загорянская А. А., Поспелов Д. А. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах. 2-е изд., испр. и доп. М.: Физматлит, 2008. 712 с.
2. Витяев Е. Е. Предсказание как вычисление // Философские науки. 2007. № 1 (32). С. 81–101.
3. Вожегов Д. В., Страбыкин Д. А. Метод логического вывода предшествующих заключению утверждений // Науч.-техн. вестник Поволжья. 2013. № 6. С. 208–214.
4. Вожегов Д. В., Страбыкин Д. А. Метод параллельного дедуктивного логического вывода заключений в исчислении предикатов с определением фактов // Науч.-техн. вестник Поволжья. 2016. № 5. С. 171–177.
5. Страбыкин Д. А. Логическое прогнозирование развития ситуаций в интеллектуальных системах на основе дедуктивного вывода. Киров: ВятГУ, 2014. 182 с.

СТРАБЫКИН Дмитрий Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электронных вычислительных машин, Вятский государственный университет. 610000, г. Киров, ул. Московская, 36.

E-mail: strabykin@vyatsu.ru