

УДК 004.83

ФОРМИРОВАНИЕ ОПИСАНИЙ ВЕТВЕЙ НА СХЕМЕ ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА СЛЕДСТВИЙ

Симонов А.И., Страбыкин Д.А.*ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», Киров, e-mail: asimonov215@gmail.com*

В работе предлагается метод, решающий задачу формирования описаний (выделения) ветвей на схеме логического вывода следствий. При этом описание схемы логического вывода может быть представлено в исчислении высказываний или в исчислении предикатов. Схема логического вывода следствий получается как дополнительный результат выполнения методов дедуктивного вывода следствий и вывода следствий при не полностью определенной базе знаний. Схема вывода представляет собой ориентированный граф, наглядно объясняющий пользователю ход вывода. Предложенный метод может быть использован при разработке интеллектуальных систем логического прогнозирования развития ситуаций для формирования описаний траекторий развития ситуации (долгосрочных прогнозов) из текущей фазы (состояния). В статье представлены: описание схем логического вывода следствий, полученных в результате выполнения дедуктивного вывода следствий и вывода следствий при не полностью определенной базе знаний (в исчислении высказываний и в исчислении предикатов первого порядка); определение ветви и процесса ветвления на схеме вывода; постановка задачи формирования описаний (выделения) ветвей на схеме вывода следствий; описания процедур выбора предшествующих литералов, расширения ветви, выбора последующих литералов, удлинения ветви; описание метода. Работа метода иллюстрируется на примерах в исчислении высказываний и в исчислении предикатов (подробное решение приводится в отдельной статье, указанной в списке литературы).

Ключевые слова: вывод следствий, описания ветвей, схема логического вывода, исчисление высказываний, исчисление предикатов, деление дизъюнктов

FORMATION THE DESCRIPTIONS OF BRANCHES ON THE INFERENCE SCHEME OF CONSEQUENCES

Simonov A.I., Strabykin D.A.*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Vyatka State University», Kirov, e-mail: asimonov215@gmail.com*

In the article propose a method that solves the problem of forming descriptions of branches on the scheme of logical inference of consequences. The description of the scheme of logical inference can be presented in the propositional calculus or in the predicate calculus. The scheme of consequences inference obtained as an additional result of the execution of the deductive consequences inference method and the consequences inference method in case of an incomplete knowledge base. The scheme of inference is a directed graph that clearly explains inference process to the user. The proposed method can be used in the development of intelligent systems of logical prediction of the development of situations for the formation of descriptions of the paths of the development of the situation (long-term predictions) from the current phase (state). The article contains: descriptions of the schemes of consequences inference obtained as a result of the execution of the deductive consequences inference method and the consequences inference method in case of an incomplete knowledge base (in the propositional calculus and in the first-order predicate calculus); definition of the branch and the branching process on the scheme of inference; formulation of the problem of forming descriptions of branches on the scheme of consequences inference; descriptions of the procedures of selecting previous literals, expansion the branch, selecting following literals, extension the branch; description of the method. The work of the method is illustrated by examples in the propositional calculus and in the predicate calculus (detailed solution is given in a separate article in the references).

Keywords: consequences inference, descriptions of branches, scheme of logical inference, propositional calculus, predicate calculus, division of clauses

В настоящее время разработаны и используются методы, реализующие различные виды логического вывода, в числе которых дедуктивный вывод (проверка выводимости заключения из базы знаний (БЗ)), абдуктивный вывод (пополнение БЗ фактами, необходимыми для вывода заключений), индуктивный вывод (добавление в БЗ общих правил) [1–4]. Одним из особых видов вывода является вывод логических следствий [5], позволяющий получать дедуктивные или абдуктивные (обеспечиваемые дополнительными фактами) следствия из новых фактов при заданном наборе исходных посылок.

Успешный логический вывод следствий часто сопровождается дополнительным результатом в виде схемы логического вывода, наглядно объясняющей пользователю порядок следования утверждений из исходных посылок. Схема вывода представляет собой ориентированный граф, вершины которого соответствуют секвенциям (посылкам), использованным при выводе, а дуги помечаются литералами этих секвенций. Описание такой схемы может быть сформировано в процессе логического вывода в виде множества литералов с параметрами. Например, по описанию $O = \{ \{A[15, 1], B[16, 1], M[17, 7], P[5, 7]\}, \{C[1, 3], D[2, 3], M[7, 11]\}, \{E[3, 4], I[11, 13]\},$

$\{L[4, 6]\}$, $\{R[6, 9], R[6, 10]\}$, $\{U[9, 12], S[8, 12], W[10, 13]\}$, $\{X[12, 14]\}$, $\{Y[13, +], Z[14, +]\}$ может быть построена схема логического вывода следствий, приведенная на рисунке.

Формальное описание схемы вывода следствий

Формальное описание схемы вывода записано от вида вывода следствий и используемого исчисления (высказываний (ИВ) или предикатов (ИП)) для представления знаний. Все исходные секвенции нумеруются, образуя множество номеров секвенций N . Обозначим через A множество различных имен литералов, используемых в секвенциях. В ИП вершинам графа сопоставляются секвенции, модифицированные унифицирующими подстановками $\lambda \in \Lambda$, где Λ – множество унифицирующих подстановок, использованных в процессе логического вывода. При этом вершина графа помечается идентификатором λ_j , состоящим из унифицирующей подстановки λ_j и номера модифицированной секвенции $j \in N$. Тогда описание схемы вывода можно представить в виде множества литералов для каждого варианта задачи:

- 1) дедуктивный вывод следствий:
 - а) $S_D = \{L[j, k], L[j, +]\}$ (ИВ);
 - б) $S'_D = \{L[\lambda_j, \lambda_k], L[\lambda_j, +]\}$ (ИП);
- 2) вывод следствий при не полностью определенной БЗ:
 - а) $S_A = \{L[j, k], L[j, +], L[+, k]\}$ (ИВ);
 - б) $S'_A = \{L[\lambda_j, \lambda_k], L[\lambda_j, +], L[+, \lambda_k]\}$ (ИП).

Здесь j – номер секвенции, из вершины которой на схеме выходит, а k – номер секвенции, в вершину которой входит дуга, помеченная литералом L ($L \in A, j, k \in N$); «+» – символ вспомогательной переменной, определенной на множестве номеров секвенций N ; $L[j, +]$, $L[\lambda_j, +]$ – конечные следствия; $L[+, k]$, $L[+, \lambda_k]$ – дополнительные факты; $\lambda_j, \lambda_k \in \Lambda$. По номеру исходной секвенции однозначно определяются литералы, помечающие входящие и выходящие дуги вершины этой секвенции на схеме. В описании схемы используются только положительные (без инверсии) литералы, а пустые унифицирующие подстановки в идентификаторах вершин опускаются.

Ветвь на схеме логического вывода следствий

Основу ветви составляет последовательность литералов, которыми помечены дуги, соединяющие вершины схемы вывода. При этом правый номер каждого (за исключением последнего) литерала совпадает с левым номером следующего после него литерала, любой литерал может иметь дополнительные связи с другими литералами (не входящими в основу ветви), когда несколько

литералов имеют одинаковые правые и различные левые номера. В общем случае ветвь можно представить в виде дерева, корнем которого является вершина с входящей дугой, помеченной последним литералом ветви.

Ветвление – это порождение двух и более ветвей, начинающихся с литералов, которые имеют одинаковые левые и различные правые номера (сами литералы могут быть одинаковыми). Две и более последовательности литералов, не имеющих друг с другом одинаковых номеров, представляют независимые ветви на схеме, которая делится на подсхемы, не имеющие общих вершин. Например, по приведенному выше описанию может быть сформировано две ветви: $b^1 = \{M[17, 7], N[7, 11], P[5, 7], I[11, 13], Y[13, +], W[10, 13], R[6, 10], L[4, 6], E[3, 4], C[1, 3], D[2, 3], A[15, 1], B[16, 1]\}$, $b^2 = \{A[15, 1], C[1, 3], B[16, 1], E[3, 4], D[2, 3], L[4, 6], R[6, 9], U[9, 12], X[12, 14], S[8, 12], Z[14, +]\}$.

Задача выделения ветвей

Из заданного нового набора фактов с помощью исходных посылок может выводиться не одно конечное следствие, причем некоторые конечные следствия могут выводиться не единственным образом. В таком случае схема логического вывода следствий содержит несколько ветвей, описывающих вывод. В связи с этим возникает задача выделения ветвей в схеме логического вывода следствий.

Задача может быть сформулирована следующим образом. Задано семейство множеств литералов, описывающих схему логического вывода следствий из множества новых фактов m^F : $O = \{g_1, \dots, g_h, \dots, g_H, s^+\}$, где g_h – множество литералов, полученное при формировании описания схемы на h -м шаге вывода; s^+ – множество конечных следствий, из которых не выводятся новые следствия. Определить семейство множеств литералов $B' = \{b^1, \dots, b^k, \dots, b^K\}$, состоящее из множеств литералов b^k , описывающих K ветвей логического вывода следствий.

Представление описания схемы в виде семейства множеств O позволяет упростить процесс выделения ветвей. Схема вывода следствий также может быть описана множеством литералов $S = g_1 \cup \dots \cup g_H \cup s^+$.

Процедуры формирования описаний ветвей

Процесс формирования описаний ветвей строится на основе следующих процедур: выбора предшествующих литералов; расширения ветви; выбора последующих литералов; удлинения ветви. Рассмотрим выделенные процедуры более подробно.

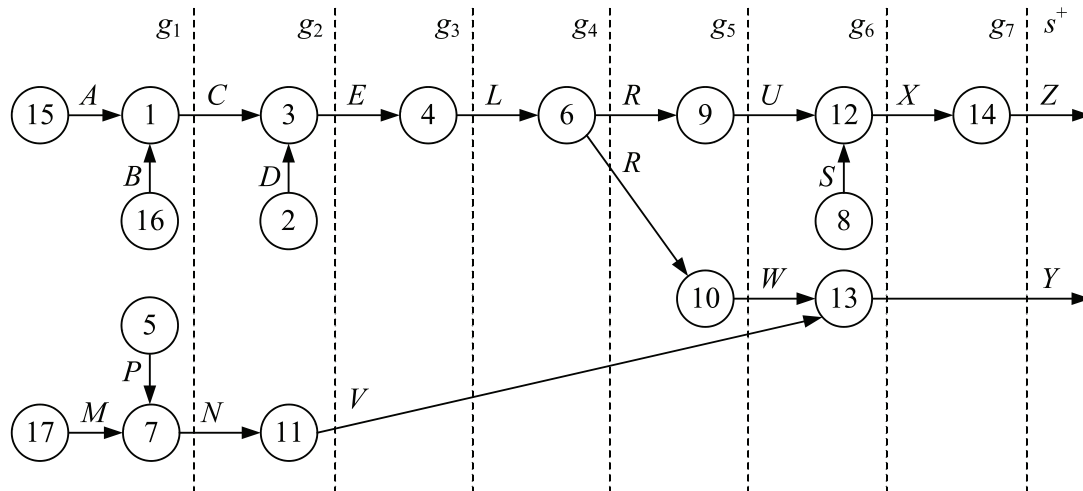


Схема логического вывода следствий: $g_1, \dots, g_7$ – множества литералов, полученные при формировании описания схемы вывода; s^+ – множество конечных следствий, из которых не выводятся новые следствия

Процедура выбора предшествующих литералов. Процедура выбора предшествующих литералов имеет следующий вид: $v = \langle L, S, q^v, m^v \rangle$, где L – текущий литерал с параметрами; S – описание схемы вывода; q^v – признак успешности процедуры («0» – нет предшествующих литералов, «1» – есть предшествующие литералы); m^v – новое множество текущих литералов.

В процедуре выполняются следующие действия. Проверяется левый параметр текущего литерала, если он является символом вспомогательной переменной «+», то принимается $m^v = \emptyset$, $q^v = 0$. Иначе из множества литералов схемы вывода S выбираются и включаются во множество литералов m^v литералы: а) $L^*[y, j]$ (для ИВ) такие, что правый параметр равен левому параметру текущего литерала $L[j, x]$; б) $L^*[y, \lambda_m j]$ (для ИП) такие, что $\lambda_m \subseteq \lambda$ левого параметра текущего литерала $L[\lambda_j, x]$ (здесь x, y – произвольные параметры, λ_j, λ_m – унифицирующие подстановки). В случае если таких литералов нет, то принимается $m^v = \emptyset$, $q^v = 0$, иначе $q^v = 1$.

Процедура расширения ветви. Процедура расширения ветви имеет следующий вид:

$$w = \langle m^v, S, b^*, b' \rangle,$$

где $m^v = \{L_1, \dots, L_r, \dots, L_T\}$ – множество текущих литералов с параметрами; S – описание схемы вывода; b^* – описание (множество литералов) расширяемой ветви; b' – описание ветви после расширения.

Расширение ветви вывода представляет собой серию шагов, на каждом из которых параллельно выполняются процедуры выбора предшествующих литералов. Выбираемые этими процедурами литералы пополня-

ют на каждом шаге формируемое описание ветви вывода. Процесс заканчивается, когда на очередном шаге все множества выбираемых литералов оказываются пустыми.

Введем следующие обозначения: h – номер шага по расширению ветви; b_h^w – описание ветви, полученное на h -м шаге; Q_h^w – общий признак окончания расширения ветви («0» – процесс завершается, «1» – продолжается). Тогда описание процедуры с использованием индексной функции $i(h)$ [6] может быть представлено в следующем виде.

1. *Определение начальных значений:*

$$h = 1, b_0^w = b^*, i(1) = t, t = 1, \dots, T,$$

где T – число текущих литералов.

2. *Выполнение процедур.*

А) На первом шаге ($h = 1$) для каждого текущего литерала L_t выполняется процедура выбора предшествующих литералов:

$$v_t = \langle L_t, S, q_t^v, m_t^v \rangle,$$

где $t = 1, \dots, T$.

В результате формируются множества новых текущих литералов m_t^v для следующего шага и осуществляется переход к п. 3 (пункту 3).

Б) На втором и последующих шагах ($h > 1$) для множеств текущих литералов $m_{i(h-1)}^v$, полученных в процедурах предыдущего шага (характеризуемых признаками $q_{i(h-1)}^v = 1$), выполняются следующие процедуры выбора предшествующих литералов:

$$v_{i(h)} = \langle L_{i(h)}, S, q_{i(h)}^v, m_{i(h)}^v \rangle,$$

где $i(h) = i(h-1).t_{i(h-1)}, t_{i(h-1)} = 1, \dots, T_{i(h-1)}$.

3. *Формирование ветви.* Производится пополнение описания ветви литералами, полученными в процедурах выбора литералов:

$$b_h^w = b_{h-1}^w \cup \bigcup_{a=1}^A m_{i(h)}^v,$$

где $i(h) = i(h-1).t_{i(h-1)}$, $a = t_{i(h-1)}$, $A = T_{i(h-1)}$.

4. *Проверка общего признака окончания расширения ветви.* Производится определение и проверка общего признака окончания расширения ветви.

$$Q_h^w = \bigvee_{a=1}^A q_{i(h)}^v,$$

где $i(h) = i(h-1).t_{i(h-1)}$, $a = t_{i(h-1)}$, $A = T_{i(h-1)}$.

Если $Q_h^w = 1$, то $h = h + 1$, выполняется п. 2.Б.

5. *Фиксация результата выполнения процедуры:* $b' = b_h^w$.

Процедура выбора последующих литералов. Процедура выбора последующих литералов имеет вид:

$$u = \langle L, S, q^u, m^u \rangle,$$

где L – текущий литерал с параметрами; S – описание схемы вывода; q^u – признак успешности процедуры («0» – нет последующих литералов, «1» – есть последующие литералы); m^u – новое множество текущих литералов.

В процедуре выполняются следующие действия. Проверяется правый параметр текущего литерала, если он является символом вспомогательной переменной «+», то принимается $m^u = \emptyset$, $q^u = 0$. Иначе из множества литералов схемы вывода S выбираются и включаются во множество литералов m^u литералы: а) $L'[k, z]$ (для ИВ) такие, что левый параметр равен правому параметру текущего литерала $L[x, k]$; б) $L'[\lambda_n k, z]$ (для ИП) такие, что $\lambda_n \supseteq \lambda$, правого параметра текущего литерала $L[x, \lambda k]$ (здесь x, z – произвольные параметры, λ_n, λ – унифицирующие подстановки). В случае если таких литералов нет, то принимается $m^u = \emptyset$, $q^u = 0$, иначе – $q^u = 1$.

Процедура удлинения ветви. Процедура удлинения ветви имеет следующий вид:

$$U = \langle L, b, S, p, N \rangle,$$

где L – текущий литерал с параметрами; b – описание исходной ветви вывода; S – описание схемы вывода; p – признак успешности процедуры («0» – удлинение ветви невозможно, «1» – ветвь успешно продлена); N – множество, содержащее тройки «новый текущий литерал – описание соответствующей ему ветви – описание соответствующей ему схемы вывода» (при $p = 1$), или – «описание сформированной ветви» (при $p = 0$).

Процедура включает в себя расширение ветви и добавляет в описание ветви лите-

рал, следующий после текущего. В общем случае вариантов удлинения ветви несколько, и они порождают множество новых ветвей. Описание процедуры может быть представлено в следующем виде.

1. *Выполняется процедура* $v = \langle L, S, q^v, m^v \rangle$. Если $q^v = 0$, то принимается $b' = b$ и выполняется п. 3, иначе – $b' = b \cup m^v$.

2. *Выполняется процедура* $w = \langle m^v, S, b', b' \rangle$.

3. *Выполняется процедура* $u = \langle L, S, q^u, m^u \rangle$.

4. *Производится установка признака p и фиксация множества N .* Принимается $p = q^u$. Если $p = 1$, то $N = \{ \langle L_1, b_1, S_1 \rangle, \dots, \langle L_u, b_u, S_u \rangle, \dots, \langle L_v, b_v, S_v \rangle \}$, где $L \in m^u$, $b_u = b' \cup \{L_u\}$, $S_u = S - b_u$, иначе $N = \{b^u\}$.

Рассмотренные процедуры позволяют построить метод формирования описаний ветвей.

Метод формирования описаний ветвей

Формирование описаний ветвей вывода представляет собой серию шагов, на каждом из которых параллельно выполняются процедуры U для каждого текущего литерала, соответствующих ему описаний исходной ветви и схемы вывода. Выбираемые этими процедурами литералы пополняют на каждом шаге формируемые описания ветвей вывода. При этом любая процедура U может породить несколько новых ветвей, для каждой из которых на следующем шаге будет выполняться своя процедура U . Процесс заканчивается, когда на очередном шаге все процедуры U завершаются неудачно (ни одна из ветвей не может быть продлена).

Введем следующие обозначения: h – номер шага по формированию ветвей; B^h – семейство множеств описаний ветвей, сформированных на h -м шаге; P_h – общий признак окончания формирования ветвей («0» – процесс завершается, «1» – продолжается). Тогда описание метода может быть представлено в следующем виде.

Из описания схемы логического вывода следствий, представленного семейством множеств O , выбирается множество литералов g_1 , полученное на первом шаге вывода. Из g_1 выбираются литералы $L_i[x, k_i]$ (для ИВ), $L_i[x, \lambda k_i]$ (для ИП) с различными правыми номерами параметров k_i (здесь x – произвольный параметр, λ – произвольная унифицирующая подстановка). Если g_1 содержит несколько литералов с одинаковыми k_i , то выбор одного из них может осуществляться по первому литералу с таким номером в порядке перечисления элементов множества.

1. *Определение начальных значений:*

$$h = 1, B^0 = \emptyset, m = \{L_1, \dots, L_p, \dots, L_T\}, \\ N = \{ \langle L_1, b_1, S_1 \rangle, \dots, \langle L_p, b_p, S_p \rangle, \dots, \langle L_T, b_T, S_T \rangle \}, \\ b_i = \{L_i\}, S_i = S - b_i, i(1) = t, t = 1, \dots, T,$$

где T – исходное число текущих литералов.

2. *Выполнение процедур удлинения ветвей.* Для каждой тройки множества N или множеств $N_{i(h)}$, полученных в процедурах предыдущего шага (характеризуемых признаками $p_{i(h)} = 1$), выполняется процедура удлинения ветви:

$$U_{i(h)} = \langle L_{i(h)}, b_{i(h)}, S_{i(h)}, p_{i(h)}, N_{i(h)} \rangle,$$

где $i(h) = i(h-1).t_{i(h-1)}, t_{i(h-1)} = 1, \dots, T_{i(h-1)}$.

3. *Фиксация сформированных ветвей.* Все описания сформированных ветвей $b'_{i(h)}$ добавляются в полученное на предыдущем шаге семейство множеств сформированных ветвей B^{h-1} . Если в B^{h-1} уже имеется идентичное по содержанию описание ветви, то новое описание не добавляется. В результате семейство множеств B^h содержит только уникальные описания сформированных ветвей.

$$B^h = B^{h-1} \cup \bigcup_F \{b'_{i(h)}\},$$

где $i(h) \in F$, F – множество индексов признаков $p_{i(h)} = 0$.

4. *Проверка общего признака окончания формирования ветвей.* Производится определение и проверка общего признака окончания формирования ветвей.

$$P_h = \bigvee_{a=1}^A p_{i(h)},$$

где $i(h) = i(h-1).t_{i(h-1)}, a = t_{i(h-1)}, A = T_{i(h-1)}$.

Если $P_h = 1$, то $h = h + 1$, выполняется п. 2.

5. *Фиксация результата выполнения метода.* Выделенные в схеме вывода ветви фиксируются в семействе множеств описаний ветвей $B' = \{b^1, \dots, b^k, \dots, b^K\}$.

Применение метода подробно рассмотрено на примерах (ИБ, ИП) в работе [6].

Заключение

Предложенный метод решает задачу формирования описаний (выделения) ветвей из описания схемы вывода следствий,

полученного с помощью методов дедуктивного вывода следствий и вывода следствий при не полностью определенной БЗ. При этом описание схемы вывода может быть представлено в исчислении высказываний или в исчислении предикатов. Метод отличается от известных использованием специальных процедур: выбора предшествующих литералов; расширения ветви; выбора последующих литералов; удлинения ветви. Метод обладает параллелизмом на уровне U процедур (удлинение каждой ветви) и v процедур (при расширении ветви), что позволяет более эффективно применять его при реализации интеллектуальных систем на современных параллельных вычислительных платформах.

Описания ветвей, сформированные в результате выполнения метода, могут быть использованы в качестве описаний траекторий в задаче логического прогнозирования развития ситуаций из заданной фазы.

Список литературы

1. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / В.Н. Вагин, Е.Ю. Головина, А.А. Загорянская, М.В. Фомина; под ред. В.Н. Вагина, Д.А. Поспелова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 712 с.
2. Финн В.К. Индуктивные методы Д.С. Милля в системах искусственного интеллекта. Часть I / В.К. Финн // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2010. – № 3. – С. 3–21.
3. Вагин В.Н. Методы абдуктивного вывода в задачах планирования работы в сложных объектах / В.Н. Вагин, К.Ю. Хотимчук // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2010. – № 5. – С. 95–113.
4. Вагин В.Н. Методы индуктивного вывода и аргументации в современных интеллектуальных системах поддержки принятия решений / В.Н. Вагин, О.Л. Моросин, М.В. Фомина // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2016. – № 1. – С. 86–103.
5. Долженкова М.Л. Задача абдуктивного вывода следствий / М.Л. Долженкова, Д.А. Страбыкин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 1. – С. 74–77.
6. Simonov A.I. Formation the Descriptions of Branches on the Inference Scheme of Consequences (Examples). DOI: 10.5281/zenodo.843774.