

Математическая логика и логическое программирование

mk.cs.msu.ru → Лекционные курсы → Математическая логика и логическое программирование (3-й поток)

Вопрос 4

Логическое программирование
Декларативная семантика и операционная семантика,
соотношение между ними
Стандартная стратегия
выполнения логических программ.

Лектор:
Подымов Владислав Васильевич
E-mail:
valdus@yandex.ru

Логическая парадигма программирования

В логической парадигме программирования:

- ▶ Программа — это набор логических формул, представляющих собой совокупность знаний о понятиях задачи / описание необходимых и достаточных свойств результата / определение результата
- ▶ Правильный результат — это следствие программы как набора формул
- ▶ В основной (декларативной) семантике не говорится, **как** вычислять (извлекать) логические следствия, говорится только **что** является основанием для извлечения следствий

Несколько известных языков программирования с преобладающей логической парадигмой: Prolog, Datalog, Planner, Mercury, Gödel, ...

Основная математическая вычислительная модель этой парадигмы:
логический вывод (логические исчисления)

ХЛП: синтаксис

Хорновская логическая программа (ХЛП) сигнатуры σ логики предикатов — это конечная последовательность программных утверждений, каждое из которых представляет собой факт или правило

Факт имеет вид « A_i », где A — атом логики предикатов

Правило имеет вид « $A \leftarrow B_1, \dots, B_k$ », где:

- ▶ $k \geq 1$
- ▶ A — **заголовок**: атом логики предикатов
- ▶ B_1, \dots, B_k — **тело**: последовательность атомов логики предикатов, разделённых запятой

Запрос к ХЛП (или, по-другому, целевое утверждение, или просто цель) имеет вид « $?C_1, \dots, C_k$ », где

- ▶ $k \geq 0$, и для случая $k = 0$ запрос принято записывать так: \square
- ▶ C_1, \dots, C_k — **тело**

ХЛП: синтаксис

Иными словами, ХЛП и запрос к ней задаются следующей БНФ:

<i>ХЛП</i>	::=	<i>утверждение</i> <i>ХЛП</i>
<i>утверждение</i>	::=	<i>факт</i> <i>правило</i>
<i>факт</i>	::=	<i>атом</i> ;
<i>правило</i>	::=	<i>заголовок</i> ← <i>тело</i> ;
<i>заголовок</i>	::=	<i>атом</i>
<i>тело</i>	::=	<i>атом</i> <i>атом</i> , <i>тело</i>
<i>запрос</i>	::=	□ ? <i>тело</i>

Для технического единообразия будем считать, что факт — это правило с пустым телом:

$$\langle\langle A \rangle\rangle = \langle\langle A \leftarrow ; \rangle\rangle$$

Каждый атом в теле запроса (цели) принято также называть **подцелью**

Переменные, содержащиеся в запросе (цели), принято называть **целевыми**

ХЛП: синтаксис

Если захотите транслировать ХЛП и запрос в язык Prolog, то для этого достаточно сделать следующее:

1. Заменить все «;» на «.», «←» на «:-», «?» на «?-» и добавить «.» в конце запроса
 - ▶ В курсе оставим синтаксис ХЛП как есть, чтобы не изменять сложившуюся математику ради одного конкретного языка программирования
2. Начинать все переменные с прописной (большой) буквы, а остальные идентификаторы — со строчной (маленькой)
 - ▶ Будем стараться придерживаться такого написания в курсе, дополнительно различая категории символов шрифтами: X — переменная, \mathbf{a} — константа или функциональный символ, p — предикатный символ

ХЛП: декларативная семантика

Почти каждому элементу ξ синтаксиса ХЛП можно естественным образом сопоставить формулу логики предикатов Φ_ξ :

Элемент	общий вид ξ	формула Φ_ξ
Факт	A ;	$\forall \dots A$
Тело	B_1, \dots, B_k	$B_1 \& \dots \& B_k$
Правило	$A \leftarrow \beta$	$\forall \dots (\Phi_\beta \rightarrow A)$
Запрос	$?\gamma$	Φ_γ

Здесь $\forall \dots \varphi(\tilde{x}^n)$ означает $\forall \tilde{x}^n \varphi(\tilde{x}^n)$

Хорновской логической программе $\mathcal{P} = (\mathcal{R}_1 \dots \mathcal{R}_m)$ сопоставим систему формул $S_{\mathcal{P}} = \{\Phi_{\mathcal{R}_1}, \dots, \Phi_{\mathcal{R}_m}\}$

ХЛП: декларативная семантика

Содержательно, декларативная (**основная**) семантика ХЛП \mathcal{P} и запроса \mathcal{Q} к ней устроена так:

- ▶ Программа — это база имеющихся заведомо верных знаний
 - ▶ Правило « $A \leftarrow [B_1, \dots, B_k];$ » — это утверждение о том, что для любых значений переменных утверждение A верно [если для тех же значений верны все утверждения B_1, \dots, B_k]
- ▶ Запрос к программе — это входные данные, определяющие вопрос об имеющихся знаниях, на который требуется ответить, записав ответ в целевые переменные (*как запрос к базе данных*)
 - ▶ Запрос « $?C_1, \dots, C_m$ » отвечает вопросу «для каких значений целевых переменных становятся одновременно верными все утверждения C_1, \dots, C_m ?»
- ▶ **Правильный ответ** на запрос к программе — это значения целевых переменных \mathcal{Q} , при которых этот запрос как формула **следует** из программы как формулы

ХЛП: декларативная семантика

Формально, центральное понятие декларативной семантики — это **правильный ответ**, и это понятие определяется так

$\text{Var}_Q = \text{Var}_{\Phi_Q}$ — множество всех переменных запроса Q

Ответ на запрос Q — это подстановка θ , такая что $\text{Dom}_\theta \subseteq \text{Var}_Q$

Правильный ответ на запрос Q к программе \mathcal{P} — это ответ θ на запрос Q , для которого выполнено соотношение

$$S_{\mathcal{P}} \models \forall \dots (\Phi_Q \theta)$$

ХЛП: декларативная семантика

Для технической простоты далее будем считать, что импликация

$$B_1 \& \dots \& B_k \rightarrow A \text{ —}$$

это форма записи дизъюнкта-правила

$$\neg B_1 \vee \dots \vee \neg B_k \vee A,$$

а отрицание конъюнкции

$$\neg(C_1 \& \dots \& C_m) \text{ —}$$

это форма записи дизъюнкта-запроса

$$\neg C_1 \vee \dots \vee \neg C_m$$

Тогда

- ▶ Формула $\Phi_{\mathcal{R}}$ для любого правила \mathcal{R} — это дизъюнкт-правило
- ▶ Система формул $S_{\mathcal{P}}$ — это система дизъюнктов
- ▶ Формула $\neg\Phi_{\mathcal{Q}}$ для любого запроса \mathcal{Q} — это дизъюнкт-запрос

ХЛП: декларативная семантика

Результаты $\mathcal{R}\theta$, $\mathcal{Q}\theta$ применения подстановки θ соответственно к правилу $\mathcal{R} = A \leftarrow B_1, \dots, B_k$ и к запросу $\mathcal{Q} = ?C_1, \dots, C_m$ определим так:

$$\mathcal{R}\theta = A\theta \leftarrow B_1\theta, \dots, B_k\theta;$$

$$\mathcal{Q}\theta = ?C_1\theta, \dots, C_m\theta$$

$\text{Var}_{\mathcal{R}}$ и $\text{Var}_{\mathcal{Q}}$ — так обозначим все переменные, содержащиеся в правиле \mathcal{R} и в запросе \mathcal{Q}

Терминология, относящаяся к применению подстановок к выражениям (вариант, пример, основной пример, основное правило, основной запрос), без изменений переносится с дизъюнктов на правила и запросы

Утверждение. Правило \mathcal{R}' является вариантом (примером) [основным примером] правила $\mathcal{R} \Leftrightarrow$ дизъюнкт $\Phi_{\mathcal{R}'}$ является вариантом (примером) [основным примером] дизъюнкта $\Phi_{\mathcal{R}}$ согласно той же подстановке

Утверждение. Запрос \mathcal{Q}' является вариантом (примером) [основным примером] запроса $\mathcal{Q} \Leftrightarrow$ дизъюнкт $\neg\Phi_{\mathcal{Q}'}$ является вариантом (примером) [основным примером] дизъюнкта $\neg\Phi_{\mathcal{Q}}$ согласно той же подстановке

Правило SLD-резолюции

Пусть

- ▶ $Q = ?C_1, \dots, C_{i-1}, C_i, C_{i+1}, \dots, C_m$ — запрос
- ▶ $R = A \leftarrow B_1, \dots, B_k$; — правило ХЛП, такое что $\text{Var}_R \cap \text{Var}_Q = \emptyset$
- ▶ $\theta \in \text{НОУ}(C_i, A)$

Тогда запрос

$$Q' = (?C_1, \dots, C_{i-1}, B_1, \dots, B_k, C_{i+1}, \dots, C_m)\theta$$

называется **SLD-резольвентой** запроса Q и правила R для подцели C_i и унификатора θ

То, что Q' — SLD-резольвента Q и R как написано выше, будем обозначать записями

$$Q \xrightarrow{R, i, \theta} Q' \quad \text{и} \quad \begin{array}{c} Q \\ R \end{array} \xrightarrow{i, \theta} Q'$$

SLD-резольтивные вычисления

(Частичным) SLD-резольтивным вычислением программы \mathcal{P} , порождённым запросом Q , называется последовательность запросов (конечная или бесконечная) вида

$$Q_1 \xrightarrow{\mathcal{R}_1, k_1, \theta_1} Q_2 \xrightarrow{\mathcal{R}_2, k_2, \theta_2} \dots ,$$

где:

- ▶ $Q_1 = Q$
- ▶ \mathcal{R}_i, k_i и $\theta_i, i \in \{1, 2, \dots\}$ — соответственно вариант какого-либо правила из \mathcal{P} , номер подцели и унификатор для резольвенты Q_{i+1}

По умолчанию в примерах будем использовать вариант \mathcal{R}' правила \mathcal{R} , в котором ко всем переменным правила добавлены штрихи

Вычисление будем называть

- ▶ **успешным**, если оно конечно и оканчивается запросом \square
- ▶ **тупиковым**, если оно конечно, неуспешно и не может быть продолжено до более длинного вычисления

SLD-резольтивные вычисления

Для подстановки θ и множества переменных V записью $\theta|_V$ обозначим проекцию подстановки θ на множество V , то есть подстановку, устроенную так:

- ▶ Если $y \in V$, то $\theta|_V(y) = \theta(y)$
- ▶ Иначе $\theta|_V(y) = y$

Результатом конечного вычисления

$$Q_1 \xrightarrow{\mathcal{R}_1, k_1, \theta_1} \dots \xrightarrow{\mathcal{R}_{n-1}, k_{n-1}, \theta_{n-1}} Q_n$$

будем называть подстановку $\theta_1 \dots \theta_{n-1}|_{\text{Var}_{Q_1}}$

Ответ на запрос Q к программе \mathcal{P} будем называть **SLD-резольтивно вычислимым** (или просто **SLD-вычислимым**), если существует успешное SLD-резольтивное вычисление, результатом которого является этот ответ

SLD-резольтивные вычисления

Теорема (о корректности операционной семантики ХЛП)

Для любой ХЛП \mathcal{P} и любого запроса Q верно следующее: любой SLD-вычисляемый ответ на Q к \mathcal{P} является правильным ответом на Q к \mathcal{P}

Теорема (о полноте операционной семантики ХЛП)

Для любых программы \mathcal{P} и запроса Q любой правильный ответ на запрос Q к \mathcal{P} является частным случаем хотя бы одного SLD-вычисляемого ответа на запрос Q к \mathcal{P}

Соотношение между семантиками ХЛП

Для ХЛП были введены две семантики:

▶ Декларативная:

- ▶ программа и запрос — это формулы
- ▶ правильный ответ — это такой, для которого запрос логически следует из программы

▶ Операционная:

- ▶ шаг вычисления — это построение SLD-резольвенты
- ▶ SLD-вычислимый ответ — это такой, который можно получить при помощи последовательности таких шагов

С одной стороны, **операционная семантика** может расцениваться как «чисто техническое» дополнение к декларативной, в котором говорится, как именно на компьютере вычисляются правильные ответы

С другой стороны, так как вычисление программы на компьютере — это важно и неизбежно, то хотелось бы иметь более «интуитивно ясное» понимание происходящего

Соотношение между семантиками ХЛП

Запрос «? C_1, \dots, C_k » — это:

- ▶ Согласно **декларативной семантике**: обращённый к программе вопрос «для каких значений целевых переменных утверждения C_1, \dots, C_k обязательно верны, если считать верным всё то, что записано в программе?»
- ▶ Согласно **операционной семантике**: список задач, записанных в виде атомов, общий ответ к которым нас интересует

Факт « A ;» — это:

- ▶ Согласно **декларативной семантике**: утверждение о том, что A безусловно верно (*для любых значений используемых переменных*)
- ▶ Согласно **операционной семантике**: тривиальный способ решения задачи A , в котором сразу выдаётся ответ
 - ▶ Правило SLD-резолюции — это объявление об успешном решении задачи A с записью ответа в унификатор

Соотношение между семантиками ХЛП

Правило « $A \leftarrow B_1, \dots, B_k$ » для $k \geq 1$ — это:

- ▶ Согласно **декларативной семантике**: утверждение о том, что если верны все утверждения B_1, \dots, B_k , то верно и A
- ▶ Согласно **операционной семантике**: запись способа решения задачи A , согласно которому следует решить (под)задачи B_1, \dots, B_k и скомбинировать ответ к A из ответов к этим подзадачам
 - ▶ Правило SLD-резолюции — переход к решению подзадач с записью способа комбинирования ответов в унификатор

ХЛП \mathcal{P} — это:

- ▶ Согласно **декларативной семантике**: база знаний, посчитанных правильными, существенными и достаточными для ответов на интересующие вопросы
- ▶ Согласно **операционной семантике**: запись всевозможных способов решения (достаточного набора решений) интересующих задач и всех возникающих подзадач

Соотношение между семантиками ХЛП

С точки зрения **декларативной семантики**, порядок записи утверждений в программе и атомов в телах правил и запросов неважны:

- ▶ Конъюнкция коммутативна (можно переставлять атомы в телах без изменения смысла формул)
- ▶ Множество — это неупорядоченная совокупность элементов

С точки зрения **операционной семантики**, резонно предположение, что порядок записи утверждений и атомов в телах может быть важен:

- ▶ **Зависят ли результат вычисления от выбора конкретных способов решения подзадач?**
 - ▶ *Очевидно, что да:* ранее уже были примеры вычислений, порождённых одним и тем же запросом к одной и той же программе, но приводящих к разным ответам или вовсе не приводящих к ответу
- ▶ **Зависит ли результат вычисления от выбора порядка решения подзадач?**
 - ▶ *А это не так очевидно*

Сильная полнота операционной семантики

Правило выбора подцели — это отображение \mathfrak{R} , сопоставляющее каждому неуспешному вычислению \mathfrak{G} номер подцели $\mathfrak{R}(\mathfrak{Q})$ его последнего запроса

\mathfrak{R} -вычисление — это SLD-резольтивное вычисление, в котором для каждого префикса $\mathfrak{G} \rightarrow \mathfrak{Q}$ резольвента \mathfrak{Q} строится для $\mathfrak{R}(\mathfrak{G})$ -й подцели

Результаты \mathfrak{R} -вычислений называются **\mathfrak{R} -вычислимыми ответами**

Теорема (о сильной полноте операционной семантики ХЛП). Для любого правила выбора подцели \mathfrak{R} и любого правильного ответа θ существует \mathfrak{R} -вычисляемый ответ, являющийся обобщением θ

Стандартное правило выбора подцели

Согласно теореме о сильной полноте операционной семантики ХЛП, независимо от того, какое именно используется правило выбора подцели \mathfrak{R} , всегда есть возможность, придерживаясь правила \mathfrak{R} , получить всевозможные SLD-вычислимые ответы

Чтобы упростить анализ и использование ХЛП, как на практике, так и в теории зачастую используется **стандартное правило выбора подцели**: в каждом запросе всегда выбирается первая (самая левая) подцель

В изображении способа получения SLD-резольвенты $Q_1 \xrightarrow{\mathcal{R}, 1, \theta} Q_2$ согласно стандартному правилу номер подцели (1) будет опускаться:

$$Q_1 \xrightarrow{\mathcal{R}, \theta} Q_2$$

Деревья SLD-резолютивных вычислений ХЛП

Способ выбора правил программы при построении SLD-резолютивных вычислений существенно влияет на то, какой именно результат будет получен (и будет ли получен хоть какой-нибудь результат)

Этот факт нетруден для осознания:

- ▶ Правило — это описание одного из способов решения рассматриваемой задачи
- ▶ Бывают как успешные, так и неуспешные способы решения задач
 - ▶ Например, если заданный элемент списка располагается только в голове, то искать его в хвосте — заведомый неуспех
- ▶ Задачу можно успешно решать по-разному, получая разные ответы
 - ▶ Например, если в ответе требуется произвольный элемент списка, то можно выдать голову списка, или голову его хвоста, или голову хвоста его хвоста, ...

Чтобы умело рассуждать о способах выбора правил и соответствующих возможностях получать ответы, объединим всевозможные SLD-резолютивные вычисления программ в единую удобную структуру

Деревья SLD-резолютивных вычислений ХЛП

Дерево SLD-резолютивных вычислений для запроса Q к программе \mathcal{P} , построенное по правилу выбора подцели \mathfrak{R} , — это размеченное корневое ориентированное (возможно, бесконечное) дерево $T_{\mathcal{P}, Q}^{\mathfrak{R}}$, устроенное так:

1. Каждая вершина помечена запросом
2. Корень помечен запросом Q
3. Дуги имеют вид $Q_1 \xrightarrow{\mathcal{R}, k, \theta} Q_2$ и отвечают всем способам построения SLD-резольвенты Q_1 и \mathcal{R} для подцели $\mathfrak{R}(k)$ и унификатора θ (с точностью до переименования)
4. Дуги упорядочены согласно порядку записи правил в \mathcal{P}
5. Листьями являются запросы, у которых нет ни одной SLD-резольвенты с вариантами правил из \mathcal{P} (в том числе \square)

Дерево вычислений для запроса Q к программе \mathcal{P} , построенное по стандартному правилу выбора подцели, будет обозначаться так: $T_{\mathcal{P}, Q}$

Порядок дуг дерева в иллюстрациях — слева направо

Стратегии вычисления ХЛП

Деревья вычислений бывают разные:

- ▶ Конечные и бесконечные
- ▶ С конечным и с бесконечным числом ветвей
- ▶ Всюду успешные и с тупиками
- ▶ Содержащие один ответ, или много ответов, или ни одного ответа

Каждая ветвь в дереве $T_{Q,P}^{\mathfrak{R}}$ отвечает SLD-резольютивному вычислению программы \mathcal{P} для запроса Q согласно правилу \mathfrak{R} , и в дереве перечислены все такие вычисления

Значит, перебор всех таких вычислений можно устроить как **обход** дерева $T_{Q,P}^{\mathfrak{R}}$

Стратегии вычисления ХЛП

Стратегия вычисления ХЛП состоит из

- ▶ правила выбора подцели и
- ▶ способа обхода дерева вычислений

Стратегия вычисления с правилом выбора подцели \mathfrak{R} называется **полной**, для любого запроса Q к любой программе \mathcal{P} она позволяет построить (перечислить) все успешные \mathfrak{R} -вычисления \mathcal{P} для запроса Q

Деревом SLD-резольтивных вычислений для запроса Q к программе \mathcal{P} , **построенным согласно заданной стратегии вычисления**, будем называть фрагмент дерева SLD-резольтивных вычислений для Q , \mathcal{P} и правила выбора подцели из стратегии, состоящий из всех вершин, посещаемых при обходе, и всех соединяющих их дуг

Стратегии вычисления ХЛП

Два основных вида обходов деревьев вычислений ХЛП:

- ▶ **Обход в ширину:** вершины дерева обходятся поярусно по неубыванию удалённости от корня
 - ▶ Это можно представить как перебор всех вычислений по возрастанию длины
- ▶ **Обход в глубину:** при обходе из вершины сначала последовательно по порядку обходятся вершины по исходящим дугам, и по окончании обхода выполняется возврат в предыдущую вершину
 - ▶ Это можно представить себе как последовательные попытки достроить (одно) рассматриваемое вычисление до более длинного пошагово всеми возможными способами по порядку правил

Стратегии вычисления ХЛП

Стратегия обхода в ширину полна:

- ▶ Из каждой вершины исходит конечное число дуг (не больше чем правил в программе), а значит, каждый ярус дерева конечен
- ▶ Каждая вершина каждого яруса рано или поздно будет посещена
- ▶ Каждое успешное вычисление конечно, а значит, завершается на некотором ярусе
- ▶ Значит, каждое успешное вычисление рано или поздно будет построено

Но у этой стратегии есть и серьёзный недостаток, присущий обходам больших графов в ширину:

- ▶ При обходе нужно хранить в памяти **все** вершины очередного яруса
- ▶ Число таких вершин может расти экспоненциально относительно номера яруса
 - ▶ *можете посчитать, на каком ярусе двоичного дерева или, например, дерева со степенью ветвления 4 содержится гугёл вершин*

Стратегии вычисления ХЛП

Стратегия, основанная на обходе в глубину

- ▶ неполна и
- ▶ чувствительна к порядку правил: даже если успешных вычислений сколь угодно много, в зависимости от порядка правил могут быть
 - ▶ найдены они все, или
 - ▶ найдены некоторые успешные вычисления, но не все, или
 - ▶ не найдены никакие успешные вычисления

Но использование этой стратегии позволяет избежать проблем с использованием памяти, возникающих при обходе в ширину, и она удобна и достаточно эффективна для использования на практике

Поэтому в **стандартной стратегии вычисления ХЛП**, используемой обычно в интерпретаторах, используются **стандартное правило выбора подцели** и **обход в глубину**

Выбор надлежащего порядка правил и атомов в телах правил при этом становится задачей программиста