

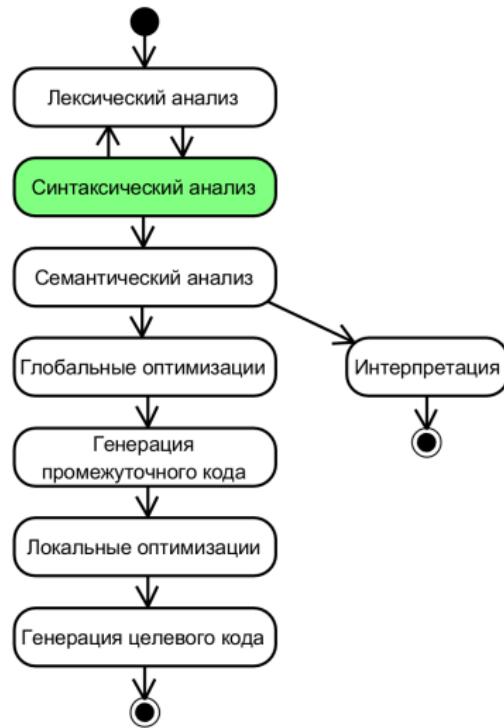
Синтаксический анализ

Часть 1: синтаксический анализ вообще

Юрий Литвинов
y.litvinov@spbu.ru

09.04.2026

Фазы компиляции

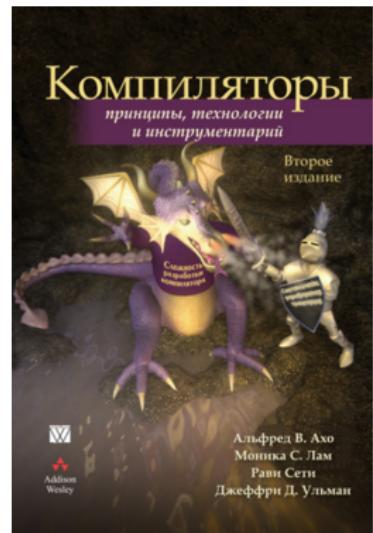


Книжка

Must read

А. Ахо, Р. Сети, Дж. Ульман, М. Лам.
Компиляторы. Принципы, технологии,
инструменты.

- ▶ Так же известна как “Книга дракона” (“Dragonbook”)



Синтаксический анализ

- ▶ Анализ последовательности токенов с целью выяснить синтаксическую структуру
 - ▶ Сопоставление с формальной грамматикой
- ▶ Строит структуру данных, представляющую разобранный по синтаксическим правилам документ
 - ▶ Чаще всего, абстрактное синтаксическое дерево (Abstract Syntax Tree, AST)
 - ▶ Бывает ещё дерево разбора (Parse tree) — содержит все токены из входной строки, в явном виде обычно не строится



Другие задачи синтаксического анализа

- ▶ Диагностика ошибок
- ▶ Восстановление после ошибок
 - ▶ Режим паники
 - ▶ Коррекция
 - ▶ Грамматические правила, обнаруживающие ошибки
 - ▶ “Предсказание ошибок”
- ▶ Привязка — определение для каждой синтаксической конструкции её места в коде

Формальные грамматики

- ▶ Терминал — символ входной строки для синтаксического анализатора (токен)
 - ▶ Для лексического анализа входная строка состоит из букв, для синтаксического — из токенов
- ▶ Нетерминал — объект, представляющий сложную синтаксическую конструкцию
- ▶ Грамматика, формально: (Σ, N, P, S) , где
 - ▶ Σ — множество терминалов
 - ▶ N — множество (алфавит) нетерминальных символов
 - ▶ P — продукции, функции вида «цепочка символов» \rightarrow «цепочка символов», где слева в цепочке есть хотя бы один нетерминал
 - ▶ $P : (\Sigma \cup N)^* N (\Sigma \cup N)^* \rightarrow (\Sigma \cup N)^*$
 - ▶ S — стартовый символ, $S \in N$

Пример грамматики

$E ::= E + E$

| $E - E$

| $-E$

| (E)

| NUMBER

NUMBER ::= 1 | 2 | 3 | ... | 9

Иерархия Хомского

- ▶ Регулярные языки (языки типа 3) — задаются регулярными выражениями, разбираются конечными автоматами
- ▶ Контекстно-свободные грамматики — грамматики, у которых слева в продукциях может быть только один символ (нетерминал)
 - ▶ Пример с предыдущего слайда — КС-грамматика
 - ▶ Разбираются стековыми автоматами (например, рекурсивным спуском)
- ▶ Контекстно-зависимые грамматики — в левой части может быть нетерминал и “контекст”, нетерминал раскрывается в правой части
 - ▶ Разбираются линейно ограниченными недетерминированными машинами Тьюринга (то есть, всё плохо)
- ▶ Языки типа 0 — грамматики без ограничений на вид продукции
 - ▶ Разбираются машинами Тьюринга (то есть всё очень плохо)

В реальной жизни

- ▶ Регулярные языки — регэкспы, весь лексический анализ
 - ▶ Не умеют считать, поэтому грамматики вида $a^n b^n$ (скобочные последовательности) им не под силу
 - ▶ Не могут в иерархические структуры, никогда не парсите регэкспами HTML
- ▶ Контекстно-свободные грамматики — грамматики большинства современных языков программирования
 - ▶ Не могут в анализ типов
- ▶ Контекстно-зависимые грамматики — грамматика C++ и некоторых неаккуратных мест в других языках
 - ▶ Пример: A c; — либо **class A<T> {}**, либо **int A; int B; int c;**
- ▶ Языки типа 0 — естественные языки (да, их тоже анализируют грамматиками, и вообще, Хомский был лингвистом)

Вывод в грамматике

- ▶ Формально, если есть грамматика $G = (\Sigma, N, P, S)$, то вывод,
 \Rightarrow_G — бинарное отношение на строках
 - ▶ $x \Rightarrow_G y \iff \exists u, v, p, q \in (\Sigma \cup N)^*: (x = upv) \wedge (p \rightarrow q \in P) \wedge (y = uqv)$
 - ▶ Неформально, шаг вывода — применение одной из продукции
- ▶ \Rightarrow_G^* — рефлексивное транзитивное замыкание \Rightarrow_G
 - ▶ $x \Rightarrow_G^* y$ — существует конечная последовательность применений продукции грамматики, которая по x делает y
 - ▶ Говорят, « y выводится из x »
- ▶ Порождение — последовательность шагов вывода
- ▶ $L(G) = \{w \in \Sigma^* | S \Rightarrow_G^* w\}$ — язык, порождаемый грамматикой G

Пример

Грамматика:

$E ::= E + E$
| $E * E$
| $-E$
| (E)
| id

Входная строка: $-(id + id)$

Порождения:

- ▶ Левое: $E \Rightarrow -E \Rightarrow -(E) \Rightarrow -(E + E) \Rightarrow -(id + E) \Rightarrow -(id + id)$
- ▶ Правое: $E \Rightarrow -E \Rightarrow -(E) \Rightarrow -(E + E) \Rightarrow -(E + id) \Rightarrow -(id + id)$

Левая рекурсия

Проблема:

$$A \rightarrow Aa \mid b$$

Пример:

$$E \rightarrow E + T \mid T$$

$$T \rightarrow T * F \mid F$$

$$F \rightarrow (E) \mid id$$

Решение:

$$A \rightarrow bA'$$

$$A' \rightarrow aA' \mid \epsilon$$

Пример:

$$E \rightarrow TE'$$

$$E' \rightarrow +TE' \mid \epsilon$$

$$T \rightarrow FT'$$

$$T' \rightarrow *FT' \mid \epsilon$$

$$F \rightarrow (E) \mid id$$

Неоднозначность

Строка: $id + id * id$

Грамматика (как была): $E ::= E + E \mid E * E \mid -E \mid (E) \mid id$

Вывод:

$$E \Rightarrow E + E$$

$$\Rightarrow id + E$$

$$\Rightarrow id + E * E$$

$$\Rightarrow id + id * E$$

$$\Rightarrow id + id * id$$

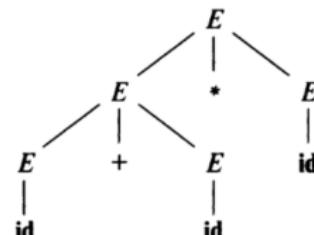
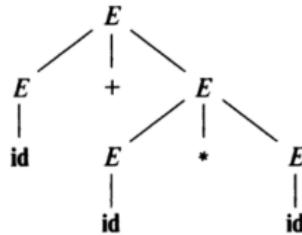
$$E \Rightarrow E * E$$

$$\Rightarrow E + E * E$$

$$\Rightarrow id + E * E$$

$$\Rightarrow id + id * E$$

$$\Rightarrow id + id * id$$

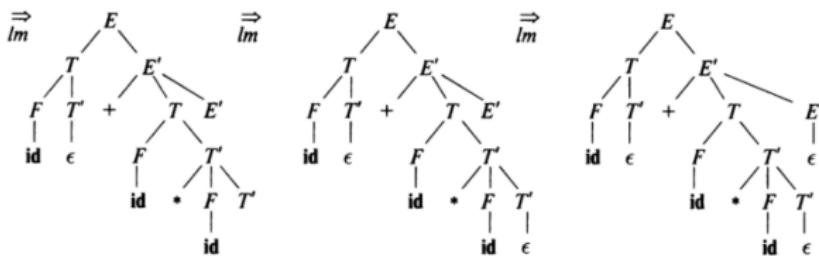
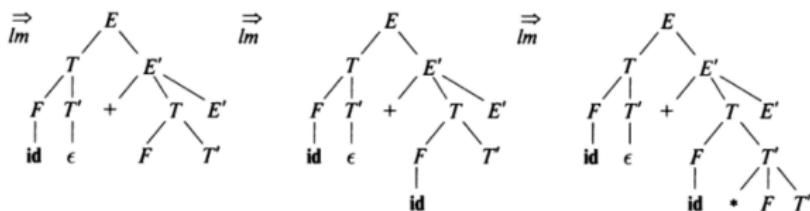
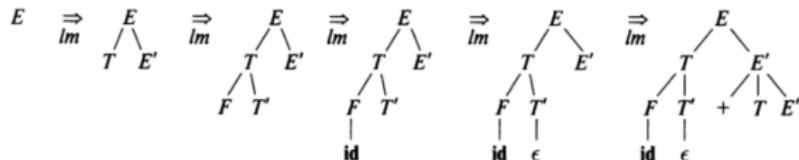


Алгоритмы разбора

- ▶ Нисходящий разбор — начинаем со стартового нетерминала, пытаемся построить входную строку
 - ▶ Рекурсивный спуск
 - ▶ LL-анализ
- ▶ Восходящий разбор — пытаемся найти во входной строке последовательность терминалов и нетерминалов и свернуть её в нетерминал
 - ▶ LR-анализ

Пример

Нисходящий разбор с построением левого порождения



FIRST(α) и FOLLOW(α)

Пусть α — строка из нетерминалов и терминалов

- ▶ FIRST(α) — множество всех терминалов, с которых может начинаться α
 - ▶ Считается рекурсивно, раскрытием нетерминальных символов
- ▶ FOLLOW(α) — множество всех терминалов, которые могут стоять за α в выводе в грамматике G
 - ▶ Считается через FIRST во всех цепочках выводов, в которых может встречаться α
 - ▶ ϵ -продукции требуют особого внимания

Зачем:

- ▶ FIRST позволяет выбрать из альтернативных продукции
- ▶ FOLLOW — чтобы выбрать между ϵ -продукцией и какой-то другой

Рекурсивный спуск

- ▶ По одной функции на нетерминал
- ▶ Просмотр строки слева направо

Выбираем продукцию $A \rightarrow X_1 X_2 \dots X_k$;

for i от 1 до k **do**

if X_i – нетерминал **then**

 | Вызов функции $X_i()$;

else if X_i равно текущему символу a **then**

 | Переходим к следующему символу;

else

 | Обнаружена ошибка;

end

end

BNF

Форма Бэкуса-Наура

- ▶ В угловых скобках — нетерминал (<literal>)
- ▶ ::= — определение (<brackets> ::= '(' | ')')
- ▶ | — альтернатива

Пример: <expr> ::= <term>|<expr><addop><term>

Пример

BNF, записанная в синтаксисе BNF

```
<syntax> ::= <rule> | <rule> <syntax>
<rule> ::= <opt-whitespace> "<" <rule-name> ">" <opt-whitespace>
          ::= <opt-whitespace> <expression> <line-end>
<opt-whitespace> ::= " " <opt-whitespace> | ""
<expression> ::= <list> | <list> <opt-whitespace> "|" <opt-whitespace> <expression>
<line-end> ::= <opt-whitespace> <EOL> | <line-end> <line-end>
<list> ::= <term> | <term> <opt-whitespace> <list>
<term> ::= <literal> | "<" <rule-name> ">"
<literal> ::= ""<text1> "" | ""<text2> """
<text1> ::= "" | <character1> <text1>
<text2> ::= " " | <character2> <text2>
<character> ::= <letter> | <digit> | <symbol>
<character1> ::= <character> | """
<character2> ::= <character> | """
<rule-name> ::= <letter> | <rule-name> <rule-char>
<rule-char> ::= <letter> | <digit> | "-"
```

Расширенная форма Бэкуса-Наура

- ▶ { } — 0 или более повторений
- ▶ [] — 0 или 1 раз (опционально)
- ▶ () — группировка
- ▶ , — конкатенация
- ▶ Вариантов синтаксиса EBNF больше, чем звёзд на небе

Пример

EBNF, записанная в синтаксисе EBNF

```
character = letter | digit | symbol | "_" ;
identifier = letter , { letter | digit | "_" } ;
terminal = "" , character , { character } , """
           | "" , character , { character } , "" ;
lhs = identifier ;
rhs = identifier
      | terminal
      | "[" , rhs , "]"
      | "{" , rhs , "}"
      | "(" , rhs , ")"
      | rhs , "|" , rhs
      | rhs , "," , rhs ;
rule = lhs , "=" , rhs , ";" ;
grammar = { rule } ;
```

Парсер-комбинаторы

- ▶ Основная идея — а давайте рассматривать парсер как композицию более простых парсеров
 - ▶ Определим примитивные парсеры и комбинаторы, строящие парсеры по парсерам
- ▶ По сути, удобная запись рекурсивного спуска
 - ▶ Не всегда, иногда используются “настоящие” преобразования грамматик
 - ▶ Например, Meerkat
- ▶ Пример — FParsec
 - ▶ Порт известной библиотеки Parsec (Haskell)
 - ▶ Рассмотрим <http://www.quanttec.com/fparsec/tutorial.html>