

Санкт-Петербургский Государственный
Университет
Математико-механический факультет

Кафедра системного программирования

GLR-анализ

Дипломная работа студента 361 группы
Григорьева Семёна Вячеславовича

Научный руководитель /подпись/	к.ф.-м.н. А.С. Лукичев
Рецензент /подпись/	Your command was ignored.Type I <command>
“Допустить к защите” заведующий кафедрой /подпись/	Your command was ignored.Type I <command>

Санкт-Петербург
2010

Содержание

1	Введение	3
2	Определения	4
3	Цели и задачи	5
4	Обзор	5
5	Реализация	6
5.1	Внутреннее представление	6
5.2	Рекурсивно восходящий алгоритм	7
5.3	Расширенные контекстно-свободные грамматики	8
5.3.1	Построение ДКА	9
5.3.2	Построение множества ситуаций	10
5.3.3	Вычисление GOTO	12
5.4	Построение деревьев вывода	12
6	Заключение	16
6.1	Свойства прототипа	16
6.2	Дальнейшее развитие	16

Содержание

1 Введение

Задачи автоматизированного реинжиниринга программ выдвигают особые требования к генераторам синтаксических анализаторов.

Для устаревшего языка сложно (а зачастую и невозможно) задать однозначную контекстно-свободную грамматику. Необходимо существенно преобразовать его спецификацию, которая приводится в документации, чтобы получить такую грамматику, но при этом она перестает быть сопровождаемой [1]. Поэтому устаревший язык обычно задается с помощью неоднозначной контекстно-свободной грамматики.

При поддержке нескольких диалектов языка необходима возможность лёгкой трансформации грамматики. Однако, зачастую, изменение одного правила приводит к появлению десятков конфликтов в грамматике [1], которые необходимо разрешать вручную. Это требует большого количества времени.

Как вариант решения этих задач предлагается использовать GLR грамматики и соответствующие инструменты построения анализаторов [1]. Действительно, GLR-алгоритм разрешает неоднозначности в грамматике на уровне концепции. По этому задание спецификации трансляции становится проще, требует меньше времени. Получившийся код компактнее и сопровождаемое.

Главным достоинством GLR-алгоритма является обработка неоднозначных грамматик. Анализатор, построенный по неоднозначной грамматике с помощью данного алгоритма, в результате разбора строит не единственное дерево, а несколько деревьев - лес, который можно сократить, используя специальные фильтры, а можно, при задании в одной спецификации нескольких диалектов, вернуть весь лес для дальнейшего выбора нужного дерева/диалекта.

Работу алгоритма GLR можно рассматривать как параллельное исполнение набора LR-анализаторов. При этом данный набор дополняется процедурой управления стеками, оптимизирующей представление стеков путем их «склеивания» и «расклеивания», что позволяет хранить и строить параллельные выводы в рамках одного LR-анализатора, лишь в моменты их различия добавляя параллельный анализатор.

Оказалось, что весьма наглядно такой алгоритм может быть представлен в виде двух взаимно-рекурсивных функций (рекурсивно-восходящий алгоритм, *recursive ascent*). При этом расклеивание стека получается естественным образом как ветвление в одной из функций, а обратное склеивание может быть реализовано как кэширование результата функции.

Стоит отметить, что по производительности такой анализатор, яв-

ляясь некоторой "надстройкой" над LR-анализатором, незначительно ему уступает. На сегодняшний день в соотношении производительность/класс разбираемых языков GLR-алгоритм выглядит наиболее предпочтительно.

Удобным способом формального определения грамматики, элементов и атрибутов языка программирования является расширенная нормальная форма Бэкуса-Наура. Поэтому инструмент должен работать с расширенными контекстно-свободными грамматиками.

При работе с инструментом пользователь ожидает получить результат описанный в терминах заданной им грамматики. Это выдвигает дополнительные требования к алгоритму. В случае, если входная грамматика была каким-либо образом преобразована, например с целью раскрыть конструкции EBNF, то появляется необходимость в построении "обратного" преобразования. Это преобразование должно "перевести" результат обратно в термины входной грамматики. Такие преобразования требуют дополнительных ресурсов и усложняют инструмент. Поэтому наиболее предпочтительными является алгоритмы, позволяющие обойтись без дополнительных преобразований грамматики.

2 Определения

Определения используемых терминов и обозначения:

- GLR: Generalized LR Parsing [1]
- EBNF: Extended Backus-Naur Form – расширенная нормальная форма Бэкуса-Наура, расширенная БНФ. Способ формального определения грамматики, элементов и атрибутов языка программирования [3].
- ДКА: детерминированный конечный автомат. Такой автомат, в котором для каждой последовательности входных символов существует лишь одно состояние, в которое автомат может перейти из текущего. [6].
- НКА: недетерминированный конечный автомат [6].
- Символ: общее название для терминала или нетерминала при описании КА.
- q - LR-состояние (core) [6]

- Замыкание: $q^* = q \cup \{B \rightarrow .c | A \rightarrow a.Bb \in q^*\} \cup \{x \rightarrow .x | A \rightarrow a.xb \in q^*\}$ [6]
- Функция goto: $\text{goto } q \ X = \{A \rightarrow aX.b | A \rightarrow a.Xb \in q^*\}$,
- LR-ситуация: продукция с точкой в некоторой позиции правой части [6].

3 Цели и задачи

В рамках данной работы ставится цель разработки прототипа генератора анализаторов, удовлетворяющего основным перечисленным требованиям и предоставляющего, в то же время, ставшие привычными средствами автоматизации трансляции (дополнение грамматики атрибутами, средства автоматического восстановления после ошибок, средства диагностики).

4 Обзор

Предпочтительным алгоритмам анализа является алгоритм разбора произвольной контекстно-свободной грамматики. Поэтому нужно рассмотреть инструменты, основанные на этом алгоритме. Важен способ реализации алгоритма, так как существуют несколько альтернатив: алгоритм Томиты (GLR-алгоритм), алгоритм Эрли (Early), рекурсивно-восходящий алгоритм. Так-же следует обратить преобразования грамматики, необходимые для построения анализатора.

В настоящее время существуют следующие инструменты основанные на GLR-алгоритме.

- ASF+SDF [11] (Algebraic Specification Formalism + Syntax Definition Formalism) - генератор с широкими возможностями, но достаточно сложным входным языком. Является SGLR-инструментом (Scannerless, Generalized-LR).
- Bison [12] - развитие инструмента YACC. Все грамматики, созданные для оригинального YACC, будут работать и в Bison. Является одним из самых популярных и совершенных "потомков" YACC. При включении соответствующей опции использует GLR-алгоритм (по умолчанию LALR).

- Elkhound [13] - позиционируется как быстрый и удобный GLR-инструмент, созданный в университете Беркли (США), тем не менее обладает достаточно "бедным" входным языком (например, он не поддерживает конструкций расширенной формы Бэкуса-Наура).

В работе [4] проведён подробный анализ этих инструментов.

Jade это генератор рекурсивно-восходящих LALR(1) парсеров с целевым языком C. Его подробное описание приводится в статье [7]. При реализации данного инструмента появилась проблема объёма кода целевого парсера. Так как при построении детерминированного парсера необходимо генерировать процедуры для каждого состояния, то объём кода быстро растёт, с ростом количества правил в грамматике. Так для языка Java объём кода составляет примерно 4 мегабайта [7]. В Jade эта проблема решается путём создания глобальной структуры(массива состояний), где хранится информация, позволяющая переиспользовать процедуры [7].

5 Реализация

Платформой для создания инструмента выбран .NET . Основным языком реализации является F# [2]. Такой выбор сделан потому, что F# является функциональным языком программирования. Это позволяет проще работать с такими структурами данных как списки и деревья, которые неизбежно возникают при решении поставленной задачи.

Общая схема реализуемого алгоритма такова:

- Входные данные – грамматика в виде списка правил. Одно правило - специальная структуры данных, описанная ниже;
- Построение ДКА по правой части правила.
- Построение LR-автомата;
- Построение деревьев вывода;

5.1 Внутреннее представление

За основу внутреннего представления грамматики взято представление инструмента YARD. Это представление и, соответственно, входной язык инструмента, содержит такие конструкции, как

- Конструкции расширенной формы Бэкуса-Наура;
- Макроправила (параметризация одних правил другими);

- Сгруппированные альтернативы;
- Предикаты;

5.2 Рекурсивно восходящий алгоритм

Существует альтернатива табличным анализаторам - рекурсивно-восходящие анализаторы. Идея состоит в том, чтобы не использовать стек явно, а заменить его стеком вызова рекурсивных функций и эмулировать поведения автомата вызовом функций. Для этого можно построить функцию соответствующую каждому состоянию и получить детерминированный LR анализ [9].

Таким образом - рекурсивно восходящий алгоритм это аналог рекурсивного спуска, но для LR грамматики. Однако, при такой реализации возникают проблемы с быстрым ростом объёма кода целевых функций [7].

Существует подход к решению этой задачи несколько с другой стороны. Показано, что можно построить систему функций, оперирующие уже не одним состоянием, а множеством состояний, и свести ,таким образом, количество необходимых функций к двум взаимно рекурсивным [10]:

- $parse\ q\ i = \{(A \rightarrow a., i) | A \rightarrow a. \in q\} \cup$
 $\{(A \rightarrow a.b, k) | i = xj, (A \rightarrow a.b, k) \in climb\ q\ x\ j\} \cup$
 $\{(A \rightarrow a.b, k) | B \rightarrow e, (A \rightarrow a.b, k) \in climb\ q\ B\ j\}$
- $climb\ q\ X\ i = \{(A \rightarrow a.Xb, k) | (A \rightarrow a.Xb, k) \in parse(goto\ q\ X)i, a \neq$
 $e, A \rightarrow a.Xb \in q\} \cup$
 $\{(A \rightarrow a.b, l) | (C \rightarrow X.c, j) \in parse(goto\ q\ X)i, (A \rightarrow$
 $a.b, l) \in climb\ q\ C\ j\}$

Важно, что при решении нашей задачи нет необходимости генерации функции для каждого состояния. Так как цель - получение недетерминированного разбора, то можно реализовать всего две функции: *parse* и *climb*, определённые выше. Это позволит решить проблему объёма кода, возникшую в Jade. Объём кода резко сократится и, более того, будет получен недетерминированный вариант разбора.

Используя рекурсивно-восходящий алгоритм можно получить эквивалент алгоритму Томиты. При использовать описанных выше функции автоматически получается ветвление в момент возникновения неоднозначности (разделение стека в алгоритме Томиты). Это получается благодаря тому, что они принимают на вход состояние и возвращают множество всех возможных состояний.

Однако возникает проблема - сложность алгоритма, основанного на функциях `parse` и `climb` экспоненциальная. Для борьбы с этим в статье [8] предлагается дополнить функции механизмом запоминания результатов предыдущих вызовов, чтобы при очередном вызове, в случае, если эта функция уже вызывалась с такими параметрами, то результат возвращался без повторного вычисления. Доказывается [8], что в при такой реализации оценки по времени будут порядка $O(n^3)$.

Запоминание результатов предыдущих вычислений и будет аналогом объединения состояний и получения структурированного в виде графа стека (`graph-structured stack`) в алгоритме Томиты.

Технически этого можно добиться реализовав функцию `memoize`. На языке F# её можно реализовать так:

```
let memoize (f: 'a ->'b) =
    let t = new System.Collections.Generic.Dictionary<'a,'b>()
    in
    fun a ->
        if t.ContainsKey(a)
        then t.[a]
        else
            let res = f a
            in
            t.Add(a,res);
            res
```

В дальнейшем в качестве функции `f` будет выступать функция `parse` и `climb`.

Дополнительного ускорения можно добиться заранее вычислив функцию `goto`. Действительно, построение замыкания (`closure`), необходимое для вычисления функции `goto` дорогая операция, а вызов `goto` происходит при каждом вызове функции `climb`. Поэтому можно вычислить `goto` на этапе построения анализатора, и в целевой программе (в функции `climb`) свести вызов (`goto q X`) к поиску по ключу.

5.3 Расширенные контекстно-свободные грамматики

На практике оказывается удобно пользоваться расширенной контекстно-свободной или EBNF грамматикой. То-есть такой грамматикой, у которой в правых частях правил могут использоваться конструкции регулярных выражений. Необходимость использования EBNF в инструментах генерации анализаторов обоснована в работе [4].

Поддержка регулярных выражений в правых частях правил (EBNF-грамматики) получается естественным образом. Для этого правая часть правила представляется как конечный автомат. LR-ситуация в таком случае может быть представлена парой: правило (нетерминал+КА) и номер состояния (соответствует позиции маркера в классическом определении). Проблемы определения левой границы отрезка в магазине, соответствующего текущему правилу, в данном подходе не существует, так как стек вызовов рекурсивных функций хранит информацию о начале анализа по правилу.

В качестве примера рассмотрим грамматику арифметических выражений без приоритетов :

- 1) $E \rightarrow E' + E'$
- 2) $E \rightarrow E' * E'$
- 3) $E \rightarrow '(E)'$
- 4) $E \rightarrow 'a'$

Так-как будет необходимо строить LR-автомат, то пополним грамматику. Добавим стартовый нетерминал и ещё одно правило.

- 1) $S \rightarrow E$

Грамматика примет вид:

- 1) $S \rightarrow E$
- 1) $E \rightarrow E' + E'$
- 2) $E \rightarrow E' * E'$
- 3) $E \rightarrow '(E)'$
- 4) $E \rightarrow 'a'$

В данном случае удобно объединить правила 1) и 2) в одно:

$$E \rightarrow E('+' \mid '*')E$$

Далее:

$$E \rightarrow (E('+' \mid '*')E) \mid ('(E)') \mid 'a' \quad (1).$$

Используя конструкции EBNF мы смогли уменьшить количество правил в грамматике до двух:

$$\begin{aligned} E &\rightarrow E('+' \mid '*')E \\ E &\rightarrow (E('+' \mid '*')E) \mid ('(E)') \mid 'a' \end{aligned}$$

5.3.1 Построение ДКА

Для того, чтобы построить табличный LR анализатор необходимо преобразовать расширенную контекстно-свободную грамматику. Нужно избавиться от конструкции BNF в правых частях. Однако можно попробовать обойтись без преобразований грамматики.

Существуют способы поддержки расширенной контекстно-свободной грамматики на уровне анализатора, без преобразований входной грам-

матики. Для этого нужно переопределить функцию goto. Можно заменить позицию точки в правиле на номер состояния конечного автомата, построенного по соответствующему регулярному выражению. Заметим, что определённая выше функция goto может быть описана в терминах конечного автомата. В этом случае регулярное выражение и, следовательно, построенный по нему автомат очень прост.

Для построения конечного автомата по регулярному выражению воспользуемся алгоритмом Томпсона [6]. Результатом работы данного алгоритма является недетерминированный конечный автомат. Так как правая часть правила (1) - регулярное выражение, то применим к ней алгоритм Томпсона.

Каждое состояние и каждый переход КА должны преобразоваться в состояние и переход LR автомата соответственно. Заметим, что в полученном НКА много ε -переходов. Например, каждая альтернатива вносит два дополнительных состояния и 4 ε -перехода. Чтобы уменьшить количество переходов в результирующем LR-автомате можно преобразовать НКА в детерминированный конечный автомат (ДКА). Для этого применим стандартный алгоритм преобразования НКА в ДКА [6].

На практике удобно представить результирующий ДКА в виде тройки (S, F, R) , где S - начальное состояние ДКА, F - множество конечных состояний и R - множество функций перехода (правил), задающее ДКА.

5.3.2 Построение множества ситуаций

Перейдём к построению LR ситуаций. Как было сказано выше, основная идея состоит в том, что точку из классического определения ситуации нужно заменить состоянием ДКА, построенного по правой части правила, как описано выше. Поясним. Предположим, что правило грамматики не содержит конструкций BNF. Например:

$$E \rightarrow E' + 'E$$

Множество ситуаций для данного правила:

- 1) $E \rightarrow .E' + 'E$
- 2) $E \rightarrow E'. ' + 'E$
- 3) $E \rightarrow E' + '.E$
- 4) $E \rightarrow E' + 'E.$

Теперь построим ДКА в соответствии с нашим алгоритмом.

У построенного ДКА четыре состояния: S_1, S_2, S_3, S_4 . Сопоставим состоянию S_1 ситуацию $E \rightarrow .E' + 'E$, S_2 ситуацию $E \rightarrow E'. ' + 'E$ и так далее. В итоге получим соответствие:

$$\begin{aligned} S_1 &- E \rightarrow .E' + 'E \\ S_2 &- E \rightarrow E'. ' + 'E \end{aligned}$$

$$S_3 - E \rightarrow E' + 'E$$

$$S_4 - E \rightarrow E' + 'E.$$

Таким образом, каждой LR-ситуации мы смогли сопоставить состояние ДКА, построенного по правой части правила. Заметим, что ситуация характеризуется правилом, для которого она строится и положением точки в правой части этого правила. Теперь вернёмся к предыдущему примеру и обобщим ситуацию.

В правой части правила - регулярное выражение. Выше мы построили по нему ДКА. Теперь построим для каждого состояния ДКА LR-ситуацию.

Для этого сперва опишем структуру данных, в которой будем сохранять одну ситуацию. Ситуация строится для правила грамматики. Правило – это нетерминал в левой части и ДКА, построенный по правой части. ДКА задаётся стартовым состоянием, множеством правил перехода и множеством конечных состояний. Правило перехода для ДКА – номер текущего состояния, принимаемый символ, номер состояния, в которое переходит ДКА, приняв данный символ. Всю эту информацию необходимо хранить, для дальнейшей работы с ней. В итоге для этого потребуется структура со следующими полями:

- Номер правила.
- Левая часть правила(нетерминал).
- Номер текущего состояния ДКА.
- Символ принимаемый ДКА в данном состоянии.
- Номер состояния ДКА, в которое он перейдёт приняв данный символ.
- Номер начального состояния ДКА.
- Номера конечных состояний ДКА.

Заметим, что эта информация состоит из двух частей: информации о ДКА в целом и правило перехода. Это ляжет в основу функции построения множества ситуаций по ДКА.

```
create_items (DFA |
(DFA построен для правила с номером = prd_num
и нетерминалом в левой части = prd_name )
&& (DFA = s,f,{rule | rule = (cur_num,symb,next_num)})) =
```

```
{(prod_number,prod_name,item_number,symbol,
  next_number,start_state,finale_state)|
  prod_number = prd_num, prod_name = prd_name,
  item_number = cur_num,symbol = symb,
  next_number = next_num,start_state = s, finale_state = f}
```

5.3.3 Вычисление GOTO

Вычисление функции GOTO - очень дорогая операция. При анализе вызов происходит при каждом вызове функции `parse`. По этому вычисление GOTO каждый раз сильно ухудшит производительность. Самое простое решение этой проблемы - вычислить значения функции заранее, на стадии генерации данных.

На данном этапе проще всего вычислить GOTO для всех возможных пар (состояние, символ) и сконструировать коллекцию, в которой, вместо вычислений, будет производиться поиск при анализе. В качестве ключей можно взять, например, значение `hash`-функции от значения параметров, для которых вычислено соответствующее значение.

Основа алгоритма - стандартный алгоритм вычисления GOTO при LR анализе, подробное описание которого можно найти в [6]. Небольшое изменение лишь в том, что ситуация имеет специальный вид.

5.4 Построение деревьев вывода

Для практических целей одна только информация о том, принадлежит входная цепочка данному языку или нет, не очень полезна. Гораздо более ценный результат - дерево вывода цепочки в данной грамматике. Так как обсуждается недетерминированный алгоритм, то в нашем случае речь будет идти о множестве деревьев (лесе) вывода. Для краткости будем называть его лесом вывода.

Рекурсивно-восходящий алгоритм анализа, описанный выше, будет основой следующего шага. Теперь необходимо получить деревья вывода.

Будем строить дерево сразу во время анализа. Для этого потребуется изменить функции `parse` и `climb`, описанные ранее.

Так как инструмент предназначен для работы с неоднозначными грамматиками, то в общем случае он должен строить лес вывода. То есть в случае если грамматика неоднозначна и существует несколько способов вывода некоторой входной цепочки, то должны быть построены все возможные деревья вывода.

Вначале рассмотрим детерминированный случай, а затем перейдём к недетерминированному.

При детерминированном разборе, если цепочка порождается входной грамматикой, должно быть получено единственное дерево вывода.

На данном этапе структуру дерева можно сделать минимально простой. Для каждой вершины можно хранить только имя соответствующего нетерминала или терминала и информацию о сыновьях. Для представления дерева опишем соответствующий алгебраический тип:

```
type tree =
  | Node of string*(tree list)*(string list)
  | Leaf of string
```

Введём следующие обозначения: $A \rightarrow R$ – правило грамматики, где A – нетерминал, R – ДКА, построенный по регулярному выражению; $(A \rightarrow R, i)$ – LR-ситуация, где i – состояние ДКА; is – $final(R, i)$ – проверка, что i – конечное состояние R ; $(leaf : a)$, $(A \rightarrow \dots)$ – конструкции дерева разбора

Тогда сигнатуры функции будут иметь следующий вид:

$parse\ q\ \{u | A \rightarrow a.b, u = vx, b \rightarrow v\} \rightarrow (A \rightarrow a.b)x\{tree_i | tree_i \text{—синтаксическое дерево вывода для } t_i : t_1..t_n \rightarrow \in b\}$

$climb\ q\ X\ \{u | A \rightarrow a.X.b, u = vx, b \rightarrow v\} (tree : \text{синтаксическое дерево для } X) \rightarrow (A \rightarrow a.Xb)x\{tree_i | tree_i \text{—синтаксическое дерево вывода для } t_i : t_1..t_n \rightarrow Xb\}$

А сами функции будут выглядеть так:

```
parse q u =
  if exists (b A → R,i) q & is-final(R,i)
  then (A → R,i;u;[])
  else
    if u=av & exists ( A → R,i) q* & R(i,a)=j
    then climb q a v (leaf:a)
    else
      if exist (A → R,0) q* & is-final(R,0)
      then climb q A v (A → [])
  climb q X u h =
    let (A → R,j;w;s) = parse (goto q* X) u in
    if R(i,X)=j & (A → R,i) in q
    then (A → R,i;w;h::s)
    else climb q A w (A → h::s)
```

Теперь нужно обобщить эти функции для случая, когда возможно несколько деревьев вывода. Это можно сделать следующим образом. Заметим, что функции `parse` и `climb` для разбора произвольной грамматики получают в качестве параметра не одно состояние, а множество

состояний. Ясно, что новые функции должны, в сущности, работать так же как и функции для детерминированного разбора, только обрабатывать не одну пару $(state, trees)$, где $state$ - состояние и $trees$ - множество деревьев вывода, соответствующих этому состоянию, а множество таких пар. Таким образом, достаточно заменить состояние парой $(state, trees)$ в функциях описанных в п. 3.2.

Пронумеруем правила грамматики.

- 1) $S \rightarrow E$
- 2) $E \rightarrow E + E$
- 3) $E \rightarrow E * E$
- 4) $E \rightarrow (E)$
- 5) $E \rightarrow a$

Данная грамматика порождает арифметические выражения с двумя бинарными операциями и скобками.

Очевидно, что такая грамматика неоднозначна. Существуют цепочки, которые выводимы несколькими способами. Например: возьмём цепочку $a+a+a$. Она имеет два левосторонних вывода:

$$S \xrightarrow{1} E \xrightarrow{2} E + E \xrightarrow{5} a + E \xrightarrow{2} a + E + E \xrightarrow{5} a + a + E \xrightarrow{5} a + a + a$$

и

$$S \xrightarrow{1} E \xrightarrow{2} E + E \xrightarrow{2} E + E + E \xrightarrow{5} a + E + E \xrightarrow{5} a + a + E \xrightarrow{5} a + a + a$$

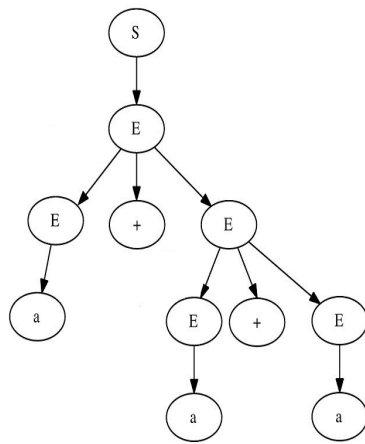
Над стрелкой - номер применяемого на данном шаге вывода правила.

Видим, что существует два вывода цепочки в данной грамматике:

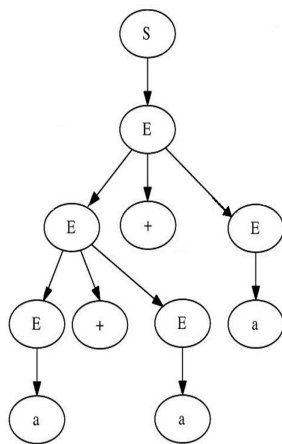
$$(1) \rightarrow (2) \rightarrow (5) \rightarrow (2) \rightarrow (5) \rightarrow (5)$$

$$(1) \rightarrow (2) \rightarrow (2) \rightarrow (5) \rightarrow (5) \rightarrow (5)$$

Им соответствуют деревья вывода:



И



Соответственно, чтобы получить несколько деревьев вывода, необходимо расширить описанные выше функции так, чтобы они могли оперировать списками.

6 Заключение

Полученные результаты:

- проведён обзор инструментов построения анализаторов. Выяснено, что предпочтительным алгоритмом анализа является GLR алгоритм;
- изучен рекурсивно-восходящий алгоритм анализа;
- предложен прототип инструмента реализующего рекурсивно-восходящий алгоритм и применимого для работы с неоднозначными грамматиками;

6.1 Свойства прототипа

Предложенный прототип имеет следующие характеристики:

- по однозначной LR-грамматике строится анализатор с линейной сложностью;
- по неоднозначной грамматике строится анализатор, возвращающий все возможные деревья вывода для данной входной цепочки;
- показана возможность поддержки регулярных выражений в правых частях правил;

6.2 Дальнейшее развитие

Задачи, требующие решения:

- поддержка атрибутивных грамматик;
- автоматическое восстановление после ошибок;

Список литературы

- [1] *Mark G.J. van den Brand, Alex Sellink, Chris Verhoef* Current Parsing Techniques in Software Renovation Considered Harmful.// IWPC '98: Proceedings of the 6th International Workshop on Program Comprehension. - IEEE Computer Society, Washington, 1998.
- [2] <http://www.research.microsoft.com/fsharp> (дистрибутивы и документация по языку F#)
- [3] ISO/IEC 14977 : 1996(E)
- [4] *Чемоданов И.С.* Генератор синтаксических анализаторов для решения задач автоматизированного реинжиниринга программ.
- [5] *Dick Grune, Criel Jacobs* PARSING TECHNIQUES A Practical Guide
- [6] *Ахо А., Сети Р., Ульман Дж.* Компиляторы: принципы, технологии, инструменты. М.: Издательский дом <Вильямс>2003. 768 с.
- [7] *Ronald Veldena* Jade, a recursive ascent LALR(1) parser generator. September 8, 1998
- [8] *Rene Leermakers* Non-deterministic Recursive Ascent Parsing. Philips Research Laboratories, P.O. Box 80.000, 5600 JA Eindhoven, The Netherlands.
- [9] *Larry Morell, David Middleton* RECURSIVE-ASCENT PARSING. Arkansas Tech University Russellville, Arkansas.
- [10] *Lex Augusteijn* Recursive Ascent Parsing (Re: Parsing techniques). lex@prl.philips.nl (Lex Augusteijn) Mon, 10 May 1993 07:03:39 GMT
- [11] <http://www.cwi.nl/projects/MetaEnv> (сайт разработчиков ASF+SDF)
- [12] <http://www.gnu.org/software/bison> (сайт разработчиков Bison)
- [13] <http://www.cs.berkeley.edu/smcpeak/elkhound> (сайт разработчиков Elkhound)