

Языки программирования. Метапрограммирование

Алексей Островский

Физико-технический учебно-научный центр НАН Украины

12 декабря 2014 г.

Языки программирования

Определение

Язык программирования — формальный язык для записи инструкций, выполняемых исполнителем (чаще всего — ЭВМ).

Составляющие языка:

- ▶ Синтаксис — набор правил, определяющих последовательности символов, составляющих допустимую программу или ее фрагмент.
- ▶ Семантика — правила, определяющие значение различных конструкций языка.
- ▶ Система выполнения и стандартная библиотека — определяют функциональность, доступную для всех имплементаций языка без подключения внешних модулей.

Классификация языков программирования

Способы классификации ЯП:

- ▶ по способу представления инструкций — текстовые, графические, смешанные;
- ▶ по конкретизации инструкций — императивные (инструкции определяют последовательность действий), декларативные (инструкции определяют конечный результат, но не способ его достижения);
- ▶ по поддерживаемым парадигмам программирования;
- ▶ по выразительной силе — полные и неполные по Тьюрингу;
- ▶ по области применения — общего назначения и предметно-ориентированные;
- ▶ по семантическим характеристикам, напр., особенностям системы типов данных.

Синтаксис ЯП

Синтаксис = форма ЯП.

Описание синтаксиса: формы Бэкуса — Наура (БНФ).

Роль в обработке программы:

- ▶ лексический анализ — группирование символов программы в лексемы (напр., числа, строки, ключевые слова);
- ▶ синтаксический анализ — построение дерева разбора на основе лексем.

Синтаксис БНФ:

$\langle \text{выражение} \rangle ::= \langle \text{альтернатива 1} \rangle \mid \langle \text{альтернатива 2} \rangle \mid \dots \mid \langle \text{альтернатива } n \rangle$

В БНФ может использоваться синтаксис регулярных выражений (+ = повтор 1 или более раз, [] — выбор из нескольких вариантов и т. п.).

Пример БНФ

БНФ для списков:

```
1  expression ::= element | list
2  element    ::= number | variable
3  number     ::= [+ -]?['0' - '9']+
4  variable   ::= ['A' - 'Z' 'a' - 'z']\w'*
5  list       ::= '[' (expression ',' )*expression ']' | '[]'
```

Допустимые списки:

- ▶ []
- ▶ [1, [2, 3], foo, Bar]
- ▶ [-123456789, [[[]], [+987654321, baZZ]]]

Семантика ЯП

Семантика = содержание или смысл ЯП.

Описание семантики: математические и логические модели.

Составляющие семантики:

- ▶ статическая семантика — ограничение на инструкции, не формализуемые в БНФ (напр., декларирование переменных, анализ инициализации, ограничения, связанные с системой типов);
- ▶ динамическая семантика — определение поведения отдельных конструкций языка, преобразование дерева разбора в машинные инструкции;
- ▶ формальная семантика — анализ кода программы для получения ее характеристик, напр., для доказательства корректности (логика Хоара) или оптимизации.

Различия между синтаксисом и семантикой

Синтаксические и семанические ошибки в Java:

```
1  /* Некорректный синтаксис */
2  int x == 5;
3
4  /* Некорректная семантика — неизвестный тип переменной */
5  MissingType y;
6
7  /* Некорректная семантика — переменная не определена */
8  z = 3;
9
10 /* Некорректная семантика — переменная не инициализирована */
11 String str;
12 while (str.length() < 20) str += " ";
```

Система типов

Определение

Система типов языка программирования — совокупность правил, определяющих свойство типа для конструкций языка (переменных, выражений, функций, модулей, ...).

Цели системы типов:

- ▶ **основная:** определение интерфейсов для взаимодействия с частями программы и обеспечение их корректного использования с целью устранения ошибок;
- ▶ обеспечение функциональности языка (напр., динамическая диспетчеризация в ООП);
- ▶ рефлексия;
- ▶ оптимизация;
- ▶ повышение доступности программы для понимания.

Классификация типов

Категории типов в ЯП:

- ▶ примитивные типы (булев тип, целые и вещ. числа);
- ▶ ссылки и указатели;
- ▶ составные типы (напр., массивы и записи);
- ▶ объекты;
- ▶ функции;
- ▶ типы типов (напр., `Class<?>` в Java).

Унификация типов в ООП:

- ▶ языки, в которых все типы наследуются от базового типа (C#, Python);
- ▶ языки с изолированными примитивными типами (C++, Java, JavaScript).

Проверка типов в различных ЯП

Java:

```
1 String str = "4" + 2; // str == "42"
```

Python:

```
1 x = "4" + 2;  
2 # TypeError: cannot concatenate 'str' and 'int' objects
```

PHP:

```
1 <?php  
2 $number = 2;  
3 $x = '4' + $number; // $x == 6  
4 $x = '4' . $number; // $x == "42"
```

C:

```
1 printf("%s\n", "4" + 2);  
2 char* nextStr = "next string";  
3 // выведет (скорее всего) "next string"
```

Статическая и динамическая типизация

Статическая типизация — определение типов всех конструкций языка на этапе компиляции программы.

Виды статической типизации:

- ▶ явная — типы конструкций декларируются программистом (напр., при объявлении переменных);
- ▶ неявная — тип переменных выводится в процессе компиляции. Примеры:
 - ▶ `var x = 5` в C#;
 - ▶ `List<> list = new ArrayList<String>()` в Java 7+.

ЯП со статической типизацией: C++, Pascal, Java, C#.

Динамическая типизация — определение типов некоторых конструкций и проверка соответствующих ограничений во время выполнения программы.

ЯП с динамической типизацией: Python, PHP, Perl, JavaScript.

Утиная типизация

Определение

Утиная типизация (англ. *duck typing*) — вид динамической типизации, при которой корректность использования объекта определяется набором его методов и свойств, а не типом.

ЯП с утиной типизацией:

- ▶ языки с ООП на основе прототипов (JavaScript, Lua);
- ▶ Python;
- ▶ Smalltalk.

Пример динамической не утиной типизации: подсказки типов (англ. *data hinting*) в PHP.

Сильная и слабая типизация

Типобезопасность (англ. *type safety*) — предотвращение языком программирования ошибок согласования типов (напр., интерпретации целого числа `int` как вещественного `float`).

Безопасность памяти (англ. *memory safety*) — предотвращение ЯП доступа к оперативной памяти, не выделенной в ходе выполнения программы.

Сильная типизация — высокая степень типобезопасности и безопасности памяти (напр., отсутствие неявных приведений типов, указателей).

Примеры ЯП с сильной типизацией: Python, Java, функциональные ЯП.

Слабая типизация — возможность обхода безопасности типов и памяти с помощью конструкций ЯП (напр., `void*` в C/C++).

Примеры ЯП со слабой типизацией: C, C++, Visual Basic.

Полиморфизм

Определение

Полиморфизм — использование единого интерфейса для сущностей различных типов.

Виды полиморфизма:

- ▶ Специальный (ad hoc) полиморфизм — определение различных реализаций для конечного числа фиксированных наборов входных типов (напр., перегрузка функций / методов).
- ▶ Параметрический полиморфизм — определение обобщенной реализации для произвольного типа (напр., шаблоны / generics в C++ и Java).
- ▶ Полиморфизм подтипов — использование интерфейса класса для любого производного от него подкласса (применяется в ООП).

Реализация ЯП

- ▶ **Компилируемые ЯП** — исходный код преобразуется в машинный *до начала* выполнения.
Примеры: C/C++, Pascal.
- ▶ **Интерпретируемые ЯП** — преобразование кода в машинные инструкции *по ходу* выполнения.
Примеры: PHP, JavaScript.
- ▶ Компиляция в независимый от платформы код и его интерпретация.
Примеры: Java (байт-код), C# (CLR — common language runtime).

Метапрограммирование

Определение

Метапрограммирование — разработка программ, обращающихся с программами как с данными:

- ▶ создание программ, порождающих другие программы (в том числе во время компиляции);
- ▶ разработка программ, модифицирующих свой код во время исполнения.

Цели метапрограммирования:

- ▶ минимизация затрат на разработку;
- ▶ оптимизация кода;
- ▶ автоматизация разработки за счет использования высокоуровневых абстракций.

Виды метапрограммирования

1. Шаблоны — автоматическая генерация мало различающихся параметризованных фрагментов кода. Примеры параметров: типы данных, размеры массивов.

Примеры: препроцессоры в C и сходных языках; шаблоны в C++.

2. Интерпретация произвольного исходного кода с помощью специальных функций.

Примеры: Функция `eval` в Python, PHP, JavaScript и других интерпретируемых ЯП.

3. Использование рефлексии (англ. *reflection*) для модификации программы во время выполнения.

4. Использование предметно-специфичных языков (англ. *domain-specific languages*) с последующей трансляцией или интерпретацией при помощи ЯП общего назначения.

Рефлексия

Определение

Рефлексия или **отражение** (англ. *reflection*) — отслеживание и изменение структуры и поведения программы во время ее выполнения.

Возможности рефлексии:

- ▶ поиск и извлечение информации о типах во время исполнения;
- ▶ определение дополнительной информации о классах / методах (напр., данные об аннотациях в Java);
- ▶ создание или переопределение классов / методов во время работы программы.

Варианты использования рефлексии

- ▶ **Тестирование:** создание мок-объектов — заглушек, реализующих требуемые функции программного окружения.
- ▶ **Контейнеры объектов** (напр., серверы приложений): управление жизненным циклом объектов.
- ▶ **Интерпретация предметно-ориентированных языков:** установление связи между объектами ЯП общего назначения и инструкциями DSL.

Пример рефлексии

Рефлексия в JavaScript:

```
1  function Button() { /*... */ };
2
3  Button.prototype = {
4      onClick: function() { /*... */ },
5      onDoubleClick: function() { /*... */ },
6      /* ... */
7
8      /** Заменяет все методы объекта, начинающиеся на 'on', на заглушки. */
9      disable4ever: function() {
10         var noop = function() { alert('I am disabled!'); };
11         for (var member in this) {
12             if ((typeof(this[member]) == 'function')
13                 && (member.substring(0, 2) == 'on')) {
14                 this[member] = noop;
15             }
16         }
17     }
18 };
```

DSL

Определение

Предметно-ориентированный язык (англ. *domain-specific language*) — компьютерный язык, специализированный для конкретной области применения.

Примеры ПОЯ

Область	Язык(и)
Веб-страницы (отображение)	HTML, CSS
Компьютерная верстка	T _E X/ L ^A T _E X
Веб-страницы (генерация)	Языки шаблонов (Twig , Jinja / шаблоны Django, JSP)
Матричное программирование	Matlab, Octave
Реляционные СУБД	SQL

Причины появления DSL

Задача: создание представлений (view) в рамках архитектуры MVC.

Наивное решение: использование ЯП общего назначения (напр., Python).

Наивное представление в ЯП Python

```
1  # Список книг, взятый из базы данных.
2  books = [
3      { 'author': 'Ray Bradbury', 'title': '451F' },
4      { 'author': 'Herman Melville', 'title': 'Moby-Dick' }
5  ];
6
7  # HTML-код таблицы с данными о книгах.
8  print '<table>';
9  print '<thead><tr><th>Author</th><th>Title</th></tr></thead>';
10 print '<tbody>';
11 for book in books:
12     print '<tr><td>%s</td><td>%s</td></tr>'
13         % (book['author'], book['title']);
14 print '</tbody>';
15 print '</table>';
```

Причины появления DSL

Недостатки использования ЯП общего назначения:

- ▶ громоздкость кода (избыток функций вывода и т. п.);
- ▶ соблазн внести код, не относящийся к созданию представления;
- ▶ разработчик интерфейса сайта может не знать ЯП общего назначения.

Решение: использование языка шаблонов (HTML с дополнительными управляющими конструкциями).

```
1  <table>
2      <thead><tr><th>Author</th><th>Title</th></tr></thead>
3      <tbody>
4          {% for book in books %}
5              <tr>
6                  <td>{{ book.author }}</td><td>{{ book.title }}</td>
7              </tr>
8              {% endfor %}
9          </tbody>
10 </table>
```

Место DSL в разработке ПО

Варианты использования DSL:

1. DSL используется для конфигурации компонентов, написанных на ЯП общего назначения;
2. DSL встраивается в ЯП общего назначения (напр., Java Scripting Engine);
3. DSL транслируется (чаще всего — в код на ЯП высокого уровня).

Инструменты для разработки DSL:

- ▶ средства лексического и синтаксического анализа (yacc, lex, bison, ANTLR);
- ▶ инструменты моделирования предметной области (Eclipse Modeling Framework).

Преимущества DSL

- ▶ Разделение ответственности (англ. *separation of concerns*) — независимость семантики языка от его реализации;
- ▶ высокий уровень абстракции DSL — позволяет сократить объем решения, повысить его доступность и упростить отладку;
- ▶ упрощение портирования — при переносе в другую среду меняется лишь имплементация DSL;
- ▶ легкость в освоении использовании профильными специалистами.

Недостатки DSL

- ▶ Затраты на проектирование, имплементацию и сопровождение языка и соответствующих инструментов (напр., поддержки среды разработки);
- ▶ проблема определения границ DSL;
- ▶ трудности интеграции DSL в программную систему;
- ▶ проблема стандартизации языков одной предметной области;
- ▶ низкая производительность по сравнению с языками общего назначения.

Выводы

1. Языки программирования характеризуются синтаксисом (формой) и семантикой (содержанием). Семантика языка может использоваться не только в процессе компиляции / интерпретации, но и при анализе программ, напр., при доказательстве их корректности.
2. Важная часть семантики языка программирования — система типов. ЯП может обладать статической или динамической, строгой или слабой типизацией.
3. Метапрограммирование (порождающее программирование) — парадигма программирования, в которой код программ рассматривается как данные. Основными инструментами метапрограммирования являются рефлексия и использование предметно-ориентированных языков.

Материалы



Czarnecki, K.; Eisenecker, U. W.
Generative Programming.



Fowler, M.
Domain Specific Languages.

<http://martinfowler.com/dsl.html>



Лавріщева К. М.
Програмна інженерія (підручник).
К., 2008. — 319 с.

Спасибо за внимание!