Верификация и валидация

Алексей Островский

Физико-технический учебно-научный центр НАН Украины

12 марта 2015 г.

Верификация и валидация

Определение

Верификация (англ. *verification*) — процессы проверки соответствия программного продукта требованиям и спецификациям, заданным при его проектировании.

Определение

Валидация (англ. *validation*) — процессы проверки соответствия программного продукта потребностям заказчика; проверка корректности спецификаций.

	Верификация	Валидация
Цель	Правильно ли строится ПП?	Строится ли правильный ПП?
Точка зрения	разработчик (белый ящик)	конечный пользователь (черный ящик)
Методы	статические	динамические (тестирование)

Методы верификации

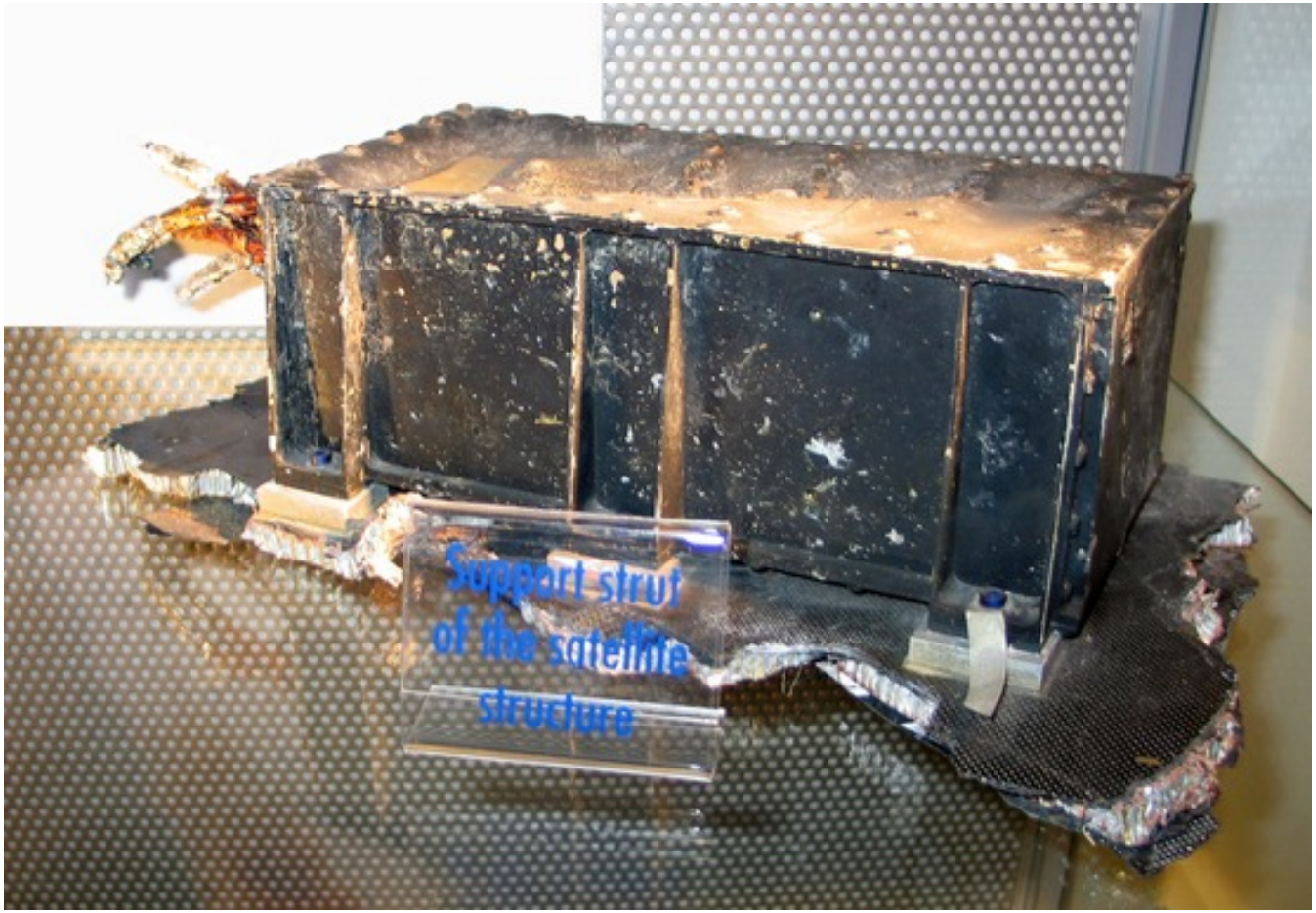
Неформальные методы:

- инспекции и обзоры кода;
- инструменты для автоматического поиска ошибок в коде.

Формальные методы верификации:

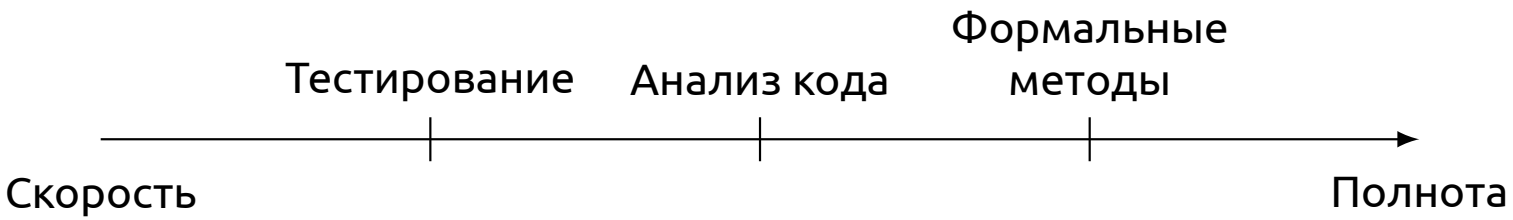
- проверка моделей ПО (англ. *model checking*);
- (автоматизированные) доказательства корректности программ;
- абстрактная интерпретация кода;
- системы типов данных.

Необходимость верификации



Фрагмент спутника «Ariane 5», потерпевшего крушение в 1996 г. Причиной аварии стало преобразование из 64-битного числа с плавающей запятой в 16-битное целое без должной проверки, что привело к переполнению и аппаратному исключению. Цена ошибки составила ∼350 млн. $.

Необходимость верификации



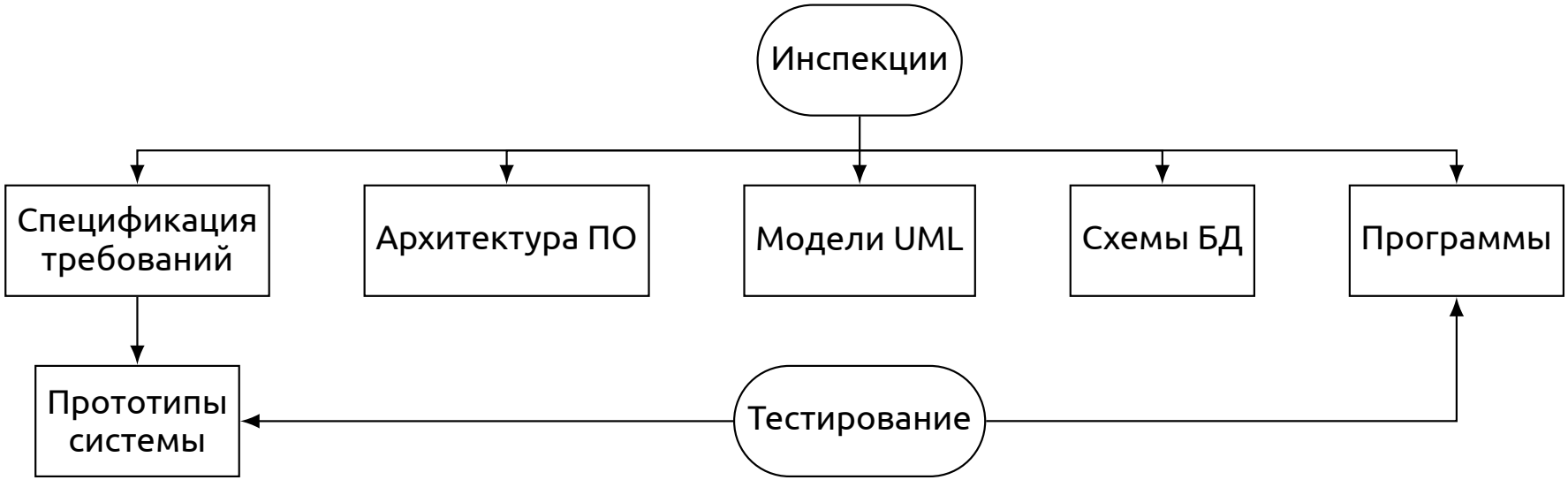
Область применения верификации:

- критические системы, системы реального времени (напр., системы управления спутниками и ракетами);
- системы с высокими требованиями к надежности / отказоустойчивости (напр., системы шифрования);
- ПО, регулируемое нормативными документами (напр., ПО, использующееся в медицине).

Инспекции

Определение

Инспекции кода (англ. *code inspections*) — анализ кода программы или ее абстрактного представления (напр., UML диаграммы) человеком на предмет наличия ошибок.



Возможности инспекций шире, чем тестирования

Преимущества инспекций

- **Отсутствие взаимодействия** между дефектами (в отличие от тестирования, где одна ошибка может скрывать другие).
- Возможность **проверки неполных версий** системы без дополнительных затрат.
- **Проверка свойств** программы (соответствие стандартам, портируемость, легкость поддержки).
- Выявление **неэффективных / неподходящих алгоритмов**.

Области проверки кода

- **Дефекты данных:**
  - инициализация переменных перед использованием;
  - отсутствие «магических» констант;
  - индексация элементов массивов / списков;
  - потенциальные случаи переполнения буфера.
- **Дефекты выполнения:**
  - проверка условий ветвления;
  - конечность циклов;
  - корректность блоков операций;
  - полнота вариантов и наличие **break** в операторе **switch** / **case**.
- **Дефекты ввода/вывода:**
  - использование всех входных переменных;
  - присвоение выходных переменных.

Области проверки кода

- **Дефекты интерфейсов:**
  - корректное количество и порядок аргументов при вызове функций / методов;
  - соответствие ожидаемых и фактических типов аргументов;
  - идентичность структуры разделяемой памяти.
- **Дефекты работы с памятью:**
  - корректность работы со связанными объектами (изменение всех требуемых ссылок);
  - корректность выделения / освобождения памяти.
- **Дефекты обработки исключений:**
  - полнота проверок возникновения исключительных ситуаций.

Парное программирование

Определение

Парное программирование (англ. *pair programming*) — способ разработки ПО, при котором код, написанный первым программистом, немедленно проверяется вторым программистом; альтернатива формальным инспекциям в гибкой методологии разработки.

Достоинства: более глубокое понимание кода — обнаружение большего числа дефектов.

Недостатки:

- повышенный шанс непонимания требований;
- пропуск ошибок из-за высокого темпа разработки;
- необъективность инспектора.

Автоматизация инспекций

Инструменты автоматизации инспекций:

- **среды разработки** — встроенные средства или плагины для проведения инспекций и неформальных обзоров кода;
- **системы контроля версий** (Subversion, git, …) — упрощение доступа к коду, запросы на изменение / уточнение фрагментов программ;
- **Lint** — семейство программ статического анализа кода для:
  - поиска типичных ошибок,
  - устранения непортируемых / потенциально опасных конструкций;
  - соблюдения принятого стиля написания программного кода.

Формальные методы

Определение

Формальные методы в разработке ПО — методы спецификации, разработки и верификации ПО на основе строгих математических моделей.

Уровни использования:

1. создание формальной модели;
2. разработка и верификация на основе мат. моделей;
3. формальное доказательство свойств ПО.

Типы формальных методов

Формальный метод $\simeq$ семантика ЯП.

- **Денотационная семантика** — подход к программе как функции, преобразующей входные данные в выходные.

  Примеры: используется в академической среде (функциональные ЯП).

- **Аксиоматическая семантика** — подход к программе как к набору пред- и постусловий для каждого выполненного действия.

  Примеры: логика Хоара, языки спецификации.

- **Операционная семантика** — подход к программе как последовательности действий в определенной модели.

  Примеры: проверка моделей, абстрактная интерпретация, символьное выполнение.

Логика Хоара

Определение

Функциональная корректность алгоритма — соответствие выходных данных ожидаемым для каждой комбинации входных данных.

Определение

Полная корректность — алгоритм корректен и выполняется за конечное время для любого входа.

Определение

Логика Хоара (англ. *Hoare logic*) — набор правил вывода для доказательства функциональной корректности компьютерных программ, записанных с помощью императивного языка программирования. [1]

[1] Существует расширение логики Хоара для доказательства полной корректности.

Правила вывода в логике Хоара

Утверждения — тройки Хоара:

$$\{P\}\, C\, \{Q\};$$

C — команда языка программирования;

P — предусловие (предикат, истинный до выполнения команды C);

Q — постусловие (предикат, истинный после выполнения команды C).

Правила вывода (общий вид):

$$T_1 \vdash T_2;$$

- из утверждений T_1 выводятся утверждения T_2;
- ($\Leftrightarrow$) для доказательства T_2 достаточно доказать T_1.

Правила вывода в логике Хоара

1. **Аксиома пропуска:** $\vdash \{P\}\ \mathbf{skip}\ \{P\}$.

2. **Аксиома присвоения:** $\vdash \{P[E/x]\}\ x := E\ \{P\}$,
   $P[E/x]$ — замена всех вхождений выражения x в предикате P на E.

   Пример: $\vdash \{x + 1 \leqslant 5\}\ x := x + 1\ \{x \leqslant 5\}$.

3. **Правило композиции:** $\{P\}\ S\ \{Q\}, \{Q\}\ T\ \{R\} \vdash \{P\}\ S; T\ \{R\}$.

   Пример:

$$\{x \leqslant 4\}\ x := x + 1\ \{x \leqslant 5\}, \{x \leqslant 5\}\ y := x\ \{y \leqslant 5\} \vdash$$
$$\vdash \{x \leqslant 4\}\ x := x + 1; y := x\ \{y \leqslant 5\}.$$

Правила вывода в логике Хоара

4. **Правило ветвления**:

$$\{B \wedge P\}\, S\, \{Q\}, \{\neg B \wedge P\}\, T\, \{Q\} \vdash \{P\}\, \textbf{if}\, B\, \textbf{then}\, S\, \textbf{else}\, T\, \{Q\}.$$

5. **Правило следствия**: $P_1 \Rightarrow P_2, \{P_2\}\, S\, \{Q_2\}, Q_2 \Rightarrow Q_1 \vdash \{P_1\}\, S\, \{Q_1\}$.
   (Можно усливать предусловие и/или ослаблять постусловие.)

Пример: Доказать $\{x \leqslant 10\}$ **if** $x < 10$ **then** $x := x + 1$ $\{x \leqslant 10\}$, если $x \in \mathbb{Z}$.

1. По правилу ветвления нужно доказать: (1) $\{x < 10\}\, x := x + 1\, \{x \leqslant 10\}$;
   (2) $\{x = 10\}$ **skip** $\{x \leqslant 10\}$.
2. По аксиоме присвоения $\{x + 1 \leqslant 10\}\, x := x + 1\, \{x \leqslant 10\}$, что эквивалентно (1).
3. По правилу следствия $\{x \leqslant 10\}$ **skip** $\{x \leqslant 10\}$, $(x = 10) \Rightarrow (x \leqslant 10) \vdash$ (2).

Правила вывода в логике Хоара

6. **Правило цикла**: $\{P \wedge B\}\ S\ \{P\} \vdash \{P\}\ \textbf{while}\ B\ \textbf{do}\ S\ \{\neg B \wedge P\}$.

Пример: Доказать $\{x \leqslant 10\}\ \textbf{while}\ x < 10\ \textbf{do}\ x := x + 1\ \{x = 10\}$, если $x \in \mathbb{Z}$.

1. Преобразуем оказуемое утверждение:
   $\{x \leqslant 10\}\ \textbf{while}\ x < 10\ \textbf{do}\ x := x + 1\ \{\neg(x < 10) \wedge (x \leqslant 10)\}$.
2. По правилу цикла надо доказать $\{(x \leqslant 10) \wedge (x < 10)\}\ x := x + 1\ \{x \leqslant 10\}$.
3. $\{x < 10\}\ x := x + 1\ \{x \leqslant 10\}$ — по правилу присвоения.

Конструкции **for**, **switch** / **case**, **do** … **while** сводятся к правилу ветвления или цикла.

Языки спецификации

Определение

Язык спецификации (англ. *specification language*) — формальный язык для описания программной системы на более высоком уровне, чем язык ее реализации.

Инструменты: логика первого порядка, теория множеств.

Примеры языков спецификации:

- VDM (Vienna development method);
- Z;
- Java Modeling Language (расширение Java);
- Spec# (расширение C#).

Применение языков спецификации

- Упрощение **анализа требований**; строгая запись требований к программной системе.
- **Проектирование** — определение модели отдельных компонентов ПО и взаимодействий между ними.
- Автоматизированная **генерация кода**.
- **Детализация поведения** программы, невозможная при помощи ЯП.
- **Доказательство корректности** с помощью программных инструментов.
- Автоматизированное **создание тестовых вариантов**.

Пример спецификации

Спецификация извлечения квадратного корня на языке JML:

```
1  public class SquareRoot {
2
3      /**
4       * Точность вычисления корня.
5       */
6      private static final double EPS = 1e-4;
7
8      // Предусловие
9      /*@ requires x >= 0.0; @*/
10     // Постусловие
11     /*@ ensures JMLDouble.approximatelyEqualTo(x, \result * \result, EPS);
12       @*/
13     public static double sqrt(double x) {
14         // ...
15     }
16 }
```

Проверка моделей

Определение

Проверка моделей (англ. *model checking*) — алгоритмическая проверка модели программной системы на соответствие заданной спецификации.

Области проверки:

- параллельное выполнение — отсутствие тупиков (англ. *deadlock*) и состояний гонки (англ. *race condition*);
- проверка ошибок времени выполнения;
- проверка пользовательских интерфейсов;
- низкоуровневый анализ кода программы.

Математический аппарат проверки моделей

- **Конечные автоматы** (англ. *finite state machine*) — строятся для представления взаимоотношений между состояними, в которых может находиться приложение ($\simeq$ направленный граф).

  Использование: анализ хода выполнения программы; перебор всех способов выполнения.

- **Символьное выполнение** (англ. *symbolic execution*) — аппроксимация семантики ЯП с помощью символьных вычислений.

  Использование: определение входов, приводящих к задаанному порядку выполнения операций.

- **Абстрактная интерпретация** (англ. *abstract interpretation*) — аппроксимация семантики ЯП с помощью монотонных функций на упорядоченных множествах.

  Использование: определение возможных значений численных переменных и корректности операций над ними.

Java Pathfinder

Java Pathfinder (JPF) — система для верификации скомпилированных Java-приложений, разработанная в NASA.

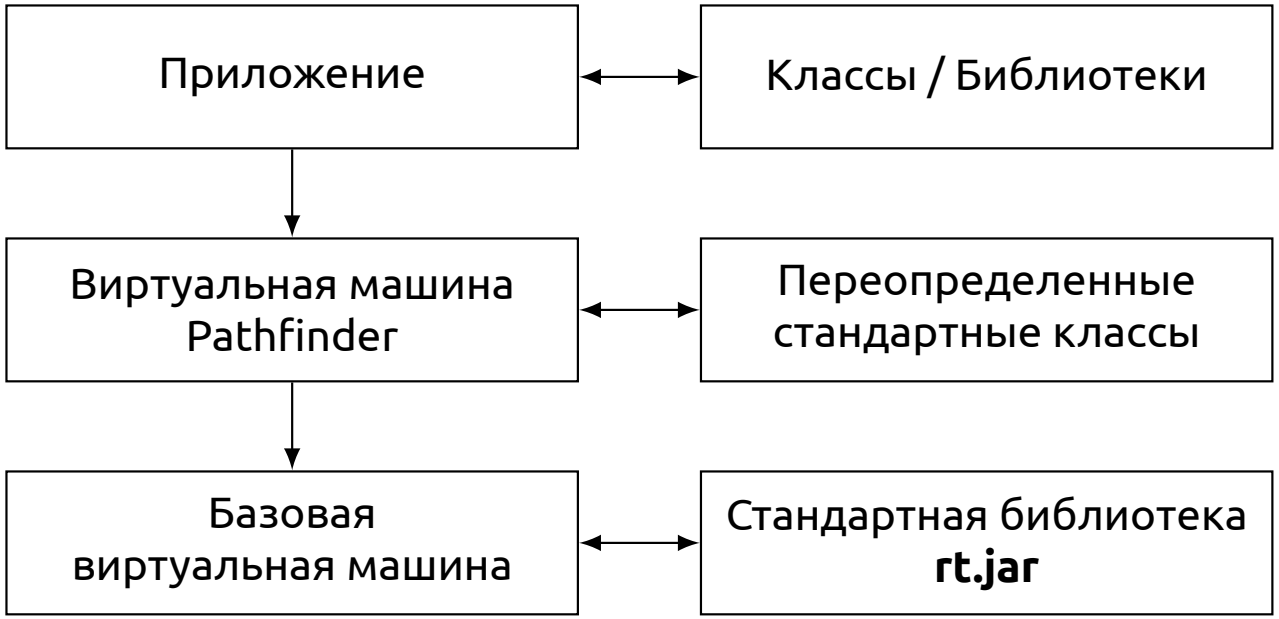


Схема выполнения приложения в Java Pathfinder.

Пример: анализ состояния гонки

Гонка, возникающая из-за возможности выполнения (1) перед (2)

```
1  public class Racer implements Runnable {
2      private int d = 42;
3
4      public void run() {
5          try { Thread.sleep(1001); } catch (InterruptedException e) {}
6          d = 0;                          // (1)
7      }
8
9      public static void main(String[] args) {
10         Racer racer = new Racer();
11         Thread t = new Thread(racer);
12         t.start();
13
14         try { Thread.sleep(1000); } catch (InterruptedException e) {}
15         int c = 420 / racer.d;      // (2)
16         System.out.println(c);
17     }
18 }
```

Пример: анализ состояния гонки

1. JPF создает конечный автомат для всевозможных состояний программы.
2. Выполняются все варианты взаимодействия между двумя потоками выполнения.
3. Обнаруживается ошибка:

```
1  ====== error #1
2  gov.nasa.jpf.listener.PreciseRaceDetector
3  race for field Racer@13d.d
4    main at Racer.main(Racer.java:15)
5          "int c = 420 / racer.d;"  : getfield
6    Thread-0 at Racer.run(Racer.java:6)
7          "d = 0;"  : putfield
```

Выводы

1. Верификация и валидация — дополняющие друг друга процессы проверки корректности ПО на соответствие спецификации и ожиданиям заказчика соответственно. Тестирование — частный случай валидации.
2. Методы верификации ПО делятся на неформальные (инспекции кода) и формальные (логика Хоара, проверка моделей).
3. Цель инспектирования кода — устранение часто допускаемых ошибок и повышение легкости сопровождения ПО.
4. Формальные методы применяются для строгого доказательства корректности программ и обнаружения «редких» ошибок. Т. к. затраты на формальные методы верификации высоки, областью их применения является критическое ПО.

Материалы

Sommerville, Ian

Software Engineering.

Pearson, 2011. — 790 p.

Лавріщева К. М.

Програмна інженерія (підручник).

К., 2008. — 319 с.

Спасибо за внимание!