Формальные методы в программной инженерии

Спецификация и верификация моделей в системе Event-B

магистерский курс, 2023

Шелехов Владимир Иванович,
зав. лаб. Системного программирования ИСИ, к.т.н.,
Институт Систем Информатики, Новосибирск,
Новосибирский Государственный Университет,
vshel@iis.nsk.su, р.т. (383) 330-27-21, ИСИ СО РАН, к.269

Язык спецификаций Event-B

http://www.event-b.org/ - сайт **Event-B.org**

Язык Event-B и платформа Rodin

B метод – предшественник Event-B

Язык спецификаций Event-B: контекст, машина, событие, действие, уточнение.

Event-B ↔ Автоматное программирование

Предикаты, числа, множества

Отношения, функции. Теории

Правила корректности

Пример. Управление движением на перекрестке

Язык Event-B и платформа Rodin

Назначение: спецификация и верификация моделей в системной и программной инженерии

Применение: автоматизация в метро, ж.-д. транспорте

Язык спецификаций **Event-B**: статическая и динамическая части, язык теории множеств.

Метод уточнений.

Платформа **Rodin**: генерация формул корректности инвариантов, система автоматического и интерактивного доказательства, model-checker, набор инструментов доказательства, SMT-решатели, аниматор

Построена на базе среды **Eclipse**

Более 50 расширений с помощью плагинов

http://www.event-b.org/ - сайт **Event-B.org**

B метод – предшественник Event-B

14-я полностью автоматическая линия парижского метро (без машиниста) была разработана с применением формального метода **B**, на основе которого позже разработан метод **Event-B**.

14-я линия запущена в 1998г.

- Была написана и полностью доказана модель на языке B размером свыше 110 000 строк
- На её основе было сгенерировано 86 000 строк кода на языке **Ada**
- С момента завершения доказательства не было найдено ни одной ошибки – даже после дополнительных работ по верификации и валидации системы

Язык спецификаций Event-B

Event-B применяется для разработки и верификации моделей в системной и программной инженерии только в классе программ-процессов (систем управления).

Язык **Event-B:**

- типы данных – язык теории множеств.
- контексты – статическая часть
- машины – динамическая (автоматная) часть

Метод уточнений.

Контекст

Неизменяемая часть спецификации: определения *констант*, *множеств* и *аксиом.*

CONTEXT < context_identifier >

EXTENDS < context_identifier_list >

SETS

< set_identifier_list >

CONSTANTS

< constant_identifier_list >

AXIOMS

< label >: < predicate >

. . .

TEOREMS

< label >: < predicate >

. . .

END

CONTEXT
ColoursExample
SETS
Colours
CONSTANTS
Red
Green
AXIOMS
axm1: Colours={Red, Green}
axm2: Green≠Red

Машина

Динамическая часть: *переменные*, *инварианты*, *события*.
Константы и аксиомы импортируется из контекстов.

MACHINE < machine_identifier >
REFINES < machine_identifier >
SEES < context_identifier_list >
VARIABLES < variable_identifier_list >
INVARIANTS < label >: < predicate > …
THEOREMS < label >: < predicate > …
VARIANT < variant >
EVENTS < event_list >
END

Событие состоит из:

- *параметров*
- *охранных условий* (guards)
- *действий* (actions)

Событие **INITIALISATION**

Событие

Параметры, охранные условия, действия.

EVENT < event_identifier >

STATUS {ordinary, convergent, anticipated}

REFINES < event_identifier_list >

ANY < parameter_identifier_list >

WHERE < label >: < predicate > …

WITH < label >: < witness >

THEN < label >: < action > …

END

Действие

< label >: < action >

Детерминированные, недетерминированные действия

Виды действий:

< variable_identifier > := < expression >

< identifier > (< expression_1 >) := < expression_2 >

< variable_identifier_list > :| < before_after_predicate >

< variable_identifier > :∈ < set_expression >

Примеры:

act1 : x, y :| $x' > y \wedge y' > x' + z$

act1 : x :∈ $A \cup \{y\}$

эквивалентно

act1 : x :| $x' \in A \cup \{y\}$

Уточнение

Уточнение (refinement) . Большая и сложная спецификация реализуется в виде последовательности спецификаций, где каждая следующая уточняет предыдущую.

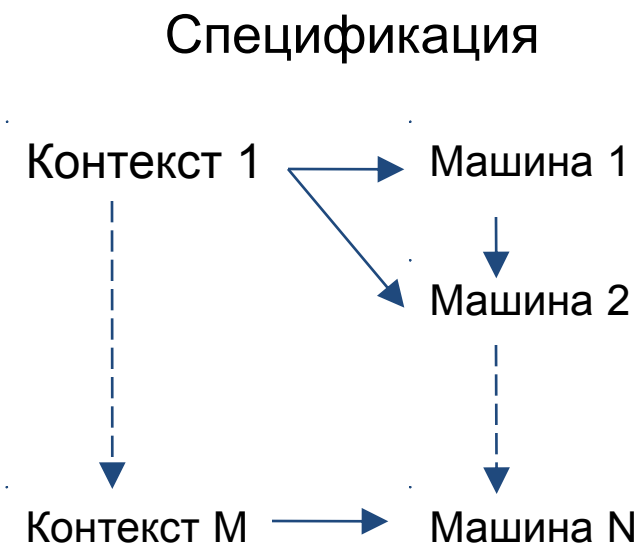
Конкретная машина B уточняет абстрактную машину A ≅ поведение машины B согласовано с поведением машины A.

Склеивающий (gluing) инвариант содержит переменные конкретной и абстрактной машины – устанавливает соответствие между B и A.

Событие абстрактной машины может быть уточнено одним или несколькими событиями конкретной машины. Конкретное событие случается лишь когда случается абстрактное событие (усиление гарда). Другие конкретные события не должны менять состояния абстрактной машины.

1. Уточнение детализацией данных
2. Уточнение введением дополнительных данных.

Уточнение


Спецификация
Контекст 1
Машина 1
Машина 2
Контекст M
Машина N

Event-B ↔ Автоматное программирование

Автоматная программа – набор *правил* вида:

M: <условие$_1$>,…, <условие$_n$> → <действие$_1$>, …, <действие$_m$> #L

Машина на языке Event-B – недетерминированная композиция:

process Z(…); {**Cy: [nA:] <правило$_1$> | … | [nK:] <правило$_k$> #Cy**}

Каждое правило (сегмент) реализуется событием Event-B.

Отличия:

- **Метки сегментов кодируются типом перечисления**
- **Нет сообщений**
- **Нет времени**
- **Нет вызовов процессов в действиях**
- **Цепочка действий в правиле – это мультиприсваивание. Суперпозиция недопустима (в т.ч. локалы); взамен можно использовать действие вида** < ident_list > :| <before_after_predicate>

Нет параллельной композиции, нет иерархии процессов. Нет определений предикатов. Уточнение – единственный вид композиции вместо объектно- и аспектно-ориентированной композиции.

Язык Event-B. Предикаты

	ASCII	Логика первого порядка
$\bot$	false	
$\top$	true	
$P \wedge Q$	P & Q	
$P \vee Q$	P or Q	
$P \Rightarrow Q$	P => Q	
$P \Leftrightarrow Q$	P <=> Q	
$\neg P$	not P	
$\forall z \cdot P \Rightarrow Q$	!z. P => Q	Тип z выводим из P
$\exists z \cdot P \wedge Q$	#z. P & Q	Тип z выводим из P
$E = F$	E = F	
$E \neq F$	E /= F	

Язык Event-B. Числа

	ASCII	
Z	INT	
N	NAT	
$\mathbf{N_1}$	NAT1	$N_1 = N \setminus \{0\}$
$m \times n$	m * n	
$m \geq n$	m >= n	
$m \leq n$	m <= n	

$m + n$ $m - n$ m / n $m > n$ $m < n$

$m \bmod n$ $m \mathinner{..} n$ $= \{ i \mid m \leq i \wedge i \leq n \}$

$\min(S)$ $\max(S)$ где $S \subset Z$

Язык Event-B. Множества

	ASCII
{E}	{E}
{E,F}	{E, F}
∅	{}
{z·P | F}	{z . P | F} значения терма F, для которых P истинна
{ x | P }	{ x | P } = {x·P | x}
S ∪ T	S \/ T
S ∩ T	S /\ T
S \ T	S \ T
E ↦ F	E |-> F упорядоченная пара (E, F) – это список
S × T	S ** T = {x ↦ y | x ∈ S ∧ y ∈ T}
P(S)	POW(S) = {s | s ⊆ S}
card(S)	card(S) число элементов
finite(S)	finite(S)
partition(S, x, y)	partition(S, {A}, {B}, {C}) ~ **type** S = **enum** A, B, C

Язык Event-B. Множества

	ASCII
$E \in S$	E : S
$E \notin S$	E /: S
$S \subseteq T$	S <: T
$S \nsubseteq T$	S /<: T
$S \subset T$	S <<: T
$S \not\subset T$	S /<<: T

Язык Event-B. Логический тип

BOOL – тип множества {FALSE,TRUE}

Язык Event-B. Отношения. Функции

ASCII

$E \mapsto F$ E |-> F упорядоченная пара

$S \times T$ S ** T $= \{x \mapsto y \mid x \in S \wedge y \in T\}$

$S \leftrightarrow T$ S <-> T $= \mathbf{P}(S \times T)$ множество отношений

$\forall r \cdot r \in S \leftrightarrow T \Rightarrow dom(r) = \{x \cdot (\exists y \cdot x \mapsto y \in r)\}$ область определения (domain)

$\forall r \cdot r \in S \leftrightarrow T \Rightarrow ran(r) = \{y \cdot (\exists x \cdot x \mapsto y \in r)\}$ область значений (range)

$S \nrightarrow T$ S +-> T частичная функция: любому элементу домена соответствует только один элемент из области значений

$S \rightarrow T = \{f \cdot f \in S \nrightarrow T \wedge \mathrm{dom}(f) = S\}$ S --> T тотальная функция

f(E) вызов функции

Краткое описание языка Event-B:

https://wiki.event-b.org/images/EventB-Summary.pdf

Язык Event-B. Теории

Теория составляется из следующих частей:

- импортируемые теории
- типы – параметры теории множества
- алгебраические типы (data types) : конструкторы, поля
- операции: префиксные, инфиксные
- аксиоматическое определение
- теоремы
- правила доказательства (proof rules) rewrite rules

Библиотека: reals, lists, queues, seqs, binary trees, orders, ….

Теории в Event-B. Руководство пользователя:

https://wiki.event-b.org/images/Theory_Plugin.pdf

Правила корректности спецификации

event evt any x where G(s, c, v, x) then v :| BA(s, c, v, x, v′) end

s – мн-ва, c – константы, v – переменные, BA – before-after предикат

A(s, c) – аксиомы и теоремы, I(s, c, v) – инварианты.

1. Событие evt сохраняет инвариант inv(s, c, v) – evt /inv/INV :

$$A(s, c) \,\&\, I(s, c, v) \,\&\, G(s, c, v, x) \,\&\, BA(s, c, v, x, v') \vdash inv(s, c, v')$$

event evt any x where G(s, c, v, x) then act: v :| BA(s, c, v, x, v′) … end

2. Выполнимость действия act в событии evt – evt /act/FIS :

$$A(s, c) \,\&\, I(s, c, v) \,\&\, G(s, c, v, x) \vdash \exists v' \cdot BA(s, c, v, x, v')$$

event evt0 any x where grd : g(s, c, v, x) . . . then . . . end

event evt refines evt0 any y where H(y, s, c,w) with x : W(x, s, c,w, y) then … end

3. Усиление гарда grd в событии evt – evt /grd/GRD :

$$A(s, c) \,\&\, I(s, c, v) \,\&\, J(s, c, v, w) \,\&\, H(y, s, c,w) \,\&\, W(x, s, c,w, y) \vdash g(s, c, v, x)$$

I(s, c, v) – инварианты абстр. evt0 , J(s, c, v, w) – инв-ты конкретного evt

Правила корректности

event evt0 any x where . . . then act: v :| BA1(s, c, v, x, v′) end

event evt refines evt0 any y where H(y, s, c,w)

with x : W1(x, s, c,w, y,w′) v′ : W2(v′, s, c, w, y, w′) then w :| BA2(s, c, w, y, w′) end

s – мн-ва, c – константы, v – переменные, BA – before-after предикат, A(s, c) – аксиомы и теоремы, I(s, c, v) – абстрактные инварианты, J(s, c, v, w) – конкретные инварианты, v и w – различны.

4. Согласованность события evt с абстр. действием act в – evt/act/SIM :

A(s, c) & I(s, c, v) & J(s, c, v, w) & H(y, s, c, w) & W1(x, s, c, w, y, w′) &

W2(v′, s, c, w, y, w′) & BA2(s, c, w, y, w′) ⊢ BA1(s, c, v, x, v′)

5. WF – well-definedness – правильность конструкции

Автоматное программирование на базисе Event-B

Язык спецификаций Event-B используется в качестве базисного языка для автоматного программирования.

Типы BOOL, INT, NAT.

Оператор присваивания <Переменная> := <Выражение>

Вместо $x \in$ BOOL будем записывать в виде x: BOOL

Начальная инициализация переменных реализуется в секции состояния. Например, x: BOOL := false.

Вместо конструкции partition со сложной семантикой используется описание типа перечисления.

Сегмент **M: if (C) A else B #L** преобразуется к виду

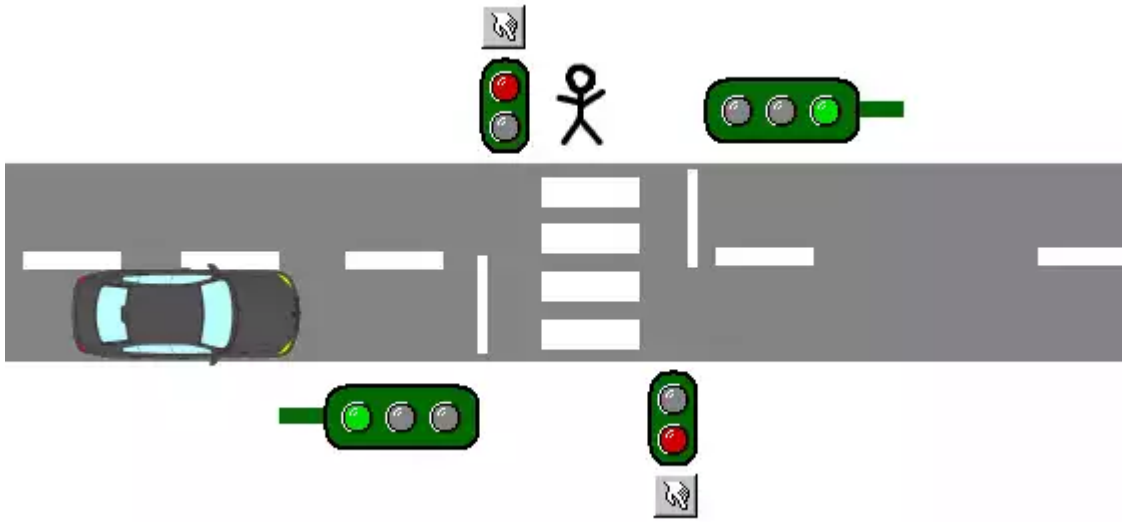
M: C → A #L ранее было: **M: C → A #L**

M: ¬ C → B #L **M: B #L**

Будем использовать комбинированную нотацию двух языков.

Управление движением на перекрестке

Содержательное описание. На пешеходном переходе через автомобильную магистраль имеется два светофора. Светофор для пешеходов: красный или зеленый. Светофор для автомобилей: красный, желтый или зеленый. Запрещено движение на красный светофор для пешеходов и автомобилей. Контроллер управляет переключениями светофоров. Зеленый светофор для пешеходов сочетается только с красным светофором для автомобилей.



На перекрестке. Анализ требований

Система управления движением не может применяться на практике. В модели должно быть время.

Объекты внешнего окружения: светофор для пешеходов и светофор для автомобилей.

Требования окружения:

RE1: Светофор для пешеходов может быть зеленым или красным.

RE2: Светофор для автомобилей может быть зеленым, **желтым** или красным.

Требование безопасности:

RS: Если светофор для пешеходов – зеленый, то светофор для автомобилей может быть только красным.

Модель упрощенной задачи

в руководстве Rodin: https://www3.hhu.de/stups/handbook/rodin/current/pdf/rodin-doc.pdf

Красный – константа **false**, а зеленый – **true**. Желтого нет.

```
section {
   peds_go: BOOL := false
   cars_go: BOOL := false
   inv  peds_go = false ∨ cars_go = false
}
process PedsCars0 {
Cycle:    [set_peds_go:] cars_go = false → peds_go := true  |
          [set_cars_go:] peds_go = false → cars_go := true  |
          [set_cars_stop:] cars_go:= false  |
          [set_peds_stop:] peds_go := false
         #Cycle
} PedsCars0
```

Модель упрощенной задачи в Event-B

в редакторе Camille

```
machine PedsCars0
variables   peds_go   cars_go
invariants   @inva peds_go ∈ BOOL    @invb cars_go ∈ BOOL
             @invc peds_go = false ∨ cars_go = false
events
 event INITIALISATION  then @act1 peds_go := false  @act2 cars_go := false   end
 event set_peds_go
  where @grd cars_go = false
  then @act1 peds_go := true
 end
 event  set_cars_go
  where @grd peds_go = false
  then @act1 cars_go := true
 end
 event  set_cars_stop then @act1 cars_go:= false end
 event  set_peds_stop then @act1 peds_go := false end
end
```

Упрощенная задача в стандартном редакторе

```
MACHINE
    M0 ›
VARIABLES
○   Cars_tl ›
○   Peds_tl ›
INVARIANTS
○   inv1:   Cars_tl∈BOOL not theorem ›
○   inv2:   Peds_tl∈BOOL not theorem ›
○   inv3:   ¬(Cars_tl=TRUE ∧ Peds_tl=TRUE) not theorem ›
```

Упрощенная задача в стандартном редакторе

```
EVENTS
  INITIALISATION:  not extended ordinary ›
  THEN
    act1:   Cars_tl:=FALSE ›
    act2:   Peds_tl:=FALSE ›
  END
```

Упрощенная задача в стандартном редакторе

```
o   set_peds_go:     not extended ordinary ›
    WHERE
    o   grd1:   Cars_tl=FALSE not theorem ›
    THEN
    o   act1:   Peds_tl:=TRUE ›
    END

o   set_peds_stop:   not extended ordinary ›
    THEN
    o   act1:   Peds_tl:=FALSE ›
    END
```

Упрощенная задача в стандартном редакторе

```
○ set_cars:    not extended ordinary ›
  ANY
  ○ new_value    ›
  WHERE
  ○ grd1:   new_value∈BOOL not theorem ›
  ○ grd2:   new_value=TRUE ⇒ Peds_tl=FALSE not theorem ›
  THEN
  ○ act1:   Cars_tl≔new_value ›
  END
```

Наша реализация упрощенной задачи

```
section {
   peds_go: BOOL := false
   cars_go: BOOL := false
   inv  peds_go = false ∨ cars_go = false
}
```

Сегменты:

- Cars – машины движутся, пешеходы стоят и ждут;
- Peds – пешеходы переходят магистраль, машины стоят перед красным светофором.

```
process PedsCars1 {
  Cars: inv  peds_go = false & cars_go = true
        #Cars | peds_go := true; cars_go:= false #Peds
  Peds: inv  peds_go = true & cars_go = false
        #Peds | peds_go := false; cars_go:= true #Cars
}
```

Сегмент Cars: #Cars | X эквивалентен Cars: X

Кодирование меток сегментов

```
process PedsCars2 {
    type State = enum { Cars, Peds };
    state:  State;
    state := Cars;
  loop:  switch (state) {
           case Cars:  peds_go := true; cars_go:= false; state:=Peds; break
           case Peds: peds_go := false; cars_go:= true;  state:=Cars
  }  #loop
} PedsCars2
```

```
process PedsCars3 {
Cycle: [Cars_go:] state=Cars → peds_go:=true; cars_go:= false; state:=Peds |
       [Peds_go:] state=Peds → peds_go:=false; cars_go:=true; state:=Cars
       #Cycle
} PedsCars3
```

Простое уточнение

```
section {
   type COLOURS = enum {red,  green}
   peds_col: COLOURS := red ;     cars_col : COLOURS := green
    inv  peds_col = red ∨ peds_col = green & cars_col = red
    inv  peds_col = red ⇔ peds_go = false                 связующие
    inv  cars_col = red ⇔ cars_go = false                 инварианты
}
process LightControl  refines PedsCars1{
Cars: inv  peds_col = red & cars_col = green
       cars_col:= red; peds_col := green   #Peds
Peds: inv  peds_col = green & cars_col = red
       peds_col := red;  cars_col:= green   #Cars
} LightControl
```

Реализация исходной задачи

```
process LightControl {
  Cars: inv  peds_col = red & cars_col = green
        cars_col:= yellowGreen #YellowGreen
  YellowGreen: inv  peds_col = red & cars_col = yellowGreen
        cars_col:= red; peds_col := green #Peds
  Peds: inv  peds_col = green & cars_col = red
        peds_col := red;  cars_col := yellowRed #YellowRed
  YellowRed:  inv  peds_col = red & cars_col = yellowRed
        cars_col:= green #Cars
} LightControl
```

Замена эквивалентной последовательностью:

cars_col:=red; peds_col:=green → cars_col:=yellowGreen; cars_col:=red; peds_col:=green

Редукция сегмента: M: A, B #L → M: A #K

K: B #L