

УДК 681.31.001.8

Г.А. ПОЛЯКОВ¹, Д.А. ТОЛСТОЛУЖСКИЙ²¹Академия наук прикладной радиоэлектроники, Москва, Россия²Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ СЕМАНТИКО-ЧИСЛОВОЙ ВЕРИФИКАЦИИ СИ-ПРОГРАММ И ИХ ВРЕМЕННЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ

Описывается методика комплексной формальной верификации Си-программ и их временных параллельных моделей, основанная на применении структур числовой спецификации данных и их обработке с учетом единиц измерения физических величин. Приводятся результаты семантико-числовой спецификации Си-программ и временных мультипараллельных моделей, адекватных различным требованиям/ограничениям и поддерживающих сочетания различных методов параллельной обработки данных.

Ключевые слова: мультипараллельная обработка данных, компиляционная методика верификации, семантическая верификация, структуры семантико-числовой спецификации.

Введение

В настоящее время признается, что стратегией развития цифровой вычислительной техники в XXI-м веке следует считать создание динамически реконфигурируемых и самоорганизующихся систем с мультипараллельной обработкой данных, способных автоматически (средствами самой системы) целенаправленно изменять свою архитектуру, функционирование и характеристики при изменении областей применения, решаемых задач и предъявляемых требований и ограничений [1, 2].

Основой решения этой проблемы является создание интеллектуальных технологий автоматического проектирования мультипараллельных аппаратных и программных средств [3 – 5]. Это делает исключительно актуальной задачу разработки средств формальной верификации статических и динамических (временных) объектов проектирования параллельных программ и параллельных аппаратных средств в интересах оперативной оценки человеком корректности автоматически получаемых результатов проектирования.

Анализ показывает, что в известных системах проектирования мультипараллельных цифровых устройств (САПР) и мультипараллельных программ (САПП) широко используются методы статической и динамической верификации [4 – 6].

Для САПР характерно применение статического и временного моделирования схемы устройства и процесса изменения состояний при обработке числовых данных. В САПП основой верификации является прогон и отладка параллельных программ на конкретных значениях числовых данных. Известны специализированные средства (например, МАТН-

САД, MAPLE) верификации с учетом единиц измерения физических величин [7].

Эти средства зависят от языка программирования, основаны на введении в исходный код дополнительных спецификаций физических величин и связаны с символьной обработкой, что усложняет их практическое использование и ограничивает области применения [7, 8].

В работах [9, 10] рассмотрены компиляционная и декомпиляционная методики верификации Си-программ и временных параллельных моделей алгоритмов, основанные на использовании структур числовой спецификации данных и операций над ними, но эти методики не обеспечивают возможность верификации с учетом единиц измерения физических величин.

Отметим при этом, что условием высокой эффективности верификации является учет возможно более полного состава реальных факторов, что возможно только при комплексном подходе к рассматриваемой проблеме.

Цель статьи - изложение комплексной методики формальной верификации Си-программ и временных моделей их параллельного выполнения, основанной на семантико-числовой спецификации данных и операций над ними при учете единиц измерения физических величин.

1. Исходные данные методики семантической верификации

Исходными данными для методики являются:

1. Исходный текст Си-программы задачи.
2. Семантическая база данных (единиц измерения физических величин).

3. Семантика (единицы измерения) исходных и выходных данных Си-программы.

Выходными данными методики являются:

1. Семантико-числовая спецификация исходного кода программы (список единиц измерения исходных данных задачи, значений размерности результатов промежуточных вычислений и значений размерности результатов выполнения Си-программы).

2. Результаты проверки идентичности значений размерности результатов выполнения Си-программы и пользовательской семантической спецификации задачи.

3. Указания пользователю на возможные причины некорректности единиц измерения:

– ошибка пользователя в оценке размерности выходного результата (при корректной Си-программе);

– ошибка в исходной Си-программе (при корректном задании размерности выходного результата).

2. Обобщенная схема и функциональность методики верификации

Обобщенная блок-схема компиляционной методики верификации представлена на рис. 1.



Рис. 1. Архитектура методики семантико-числовой верификации

Поясним этапы методики верификации с помощью задачи расчета для прямоугольного параллелепипеда периметра «р» основания, площади «s» основания и объема «v» параллелепипеда со сторонами основания $x = 3$ метра, $Y = 12$ метров и высотой $h = 20$ метров, Си-программа которой представлена рис. 2.

```

#include <stdio.h>
void main(void)
{
double x,y,h,p,s,v;
x = 3;
y = 12;
h = 20;
p = (x+y)*2;
s = x*y;
v = s*h;
printf("%e\n",p);
printf("%e\n",s);
printf("%e\n",v);
}
  
```

Рис. 2. Исходный текст Си-программы задачи

Содержание этапов верификации:

Этап 1 (символ 2 рис. 1) обеспечивает синтез для Си-программы (рис. 1) числового формата СВМ (детальное описание формата СВМ дано в [11]). Структуры числовой спецификации показаны в табл. 1 и табл. 2. В табл. 1 дана базовая структура, описывающая состав операторов задачи (N), их типы (TYP), число входных (SJD) и выходных (WJD) связей каждого оператора, семантику операторов (RES), указатели на начало цепочек (в табл. 2) сопряженных и внешних операторов (NSJ, NWJ) для каждого оператора Си-программы. В табл. 2 заданы множества номеров сопряженных и внешних операторов для каждого оператора Си-программы.

Этап 2 (символ 3 рис. 1) обеспечивает синтез графической визуализации исходной Си-программы (в виде Си-графа, рис. 3) на основе числового формата СВМ. Методика синтеза описана в [6].

Этап 3 (символ 4 рис. 1) выполняет компиляционную верификацию формата СВМ Си-программы (и соответствующего Си-графа). Методика верификации описана в [10]. Результаты (ОК) верификации (рис. 4) подтверждают корректность преобразований.

Этап 4 (символ 5 рис. 1) выполняет синтез семантико-числовой спецификации Си-программы, исходя из ее числовой спецификации, семантической базы данных и единиц измерения исходных и выходных данных Си-программы, определяемых поль-

зователем. Результаты синтеза семантико-числовой спецификации Си-программы показаны в табл. 3.

В табл. 3 приняты обозначения: массив RAZM – единицы измерения данных и операций, «м» - метр, «нет» - отсутствие вычисленного значения выходной переменной, «б/раз» - безразмерная величина, «м*м», «м*м*м» - синтезированные единицы измерения производных величин.

Этап 5 (символ 6 рис. 1) выполняет синтез временной параллельной модели Си-программы для заданных требований. Методика синтеза параллельных моделей изложена в [6, 11]. Поскольку при совмещении независимых операций состав данных,

операторов и их связей не изменяется (а операторам ставятся в соответствие моменты времени начала их выполнения), синтезированная выше семантико-числовая спецификация относится и к временной параллельной модели Си-программы.

Этап 6 (символ 7 рис. 1) осуществляет декомпиляционную верификацию семантико-числовой спецификации временной параллельной модели путем обратного перехода к текстовой спецификации Си-программы и заданным единицам измерения исходных и выходных данных. Методика декомпиляционной верификации описана в [10].

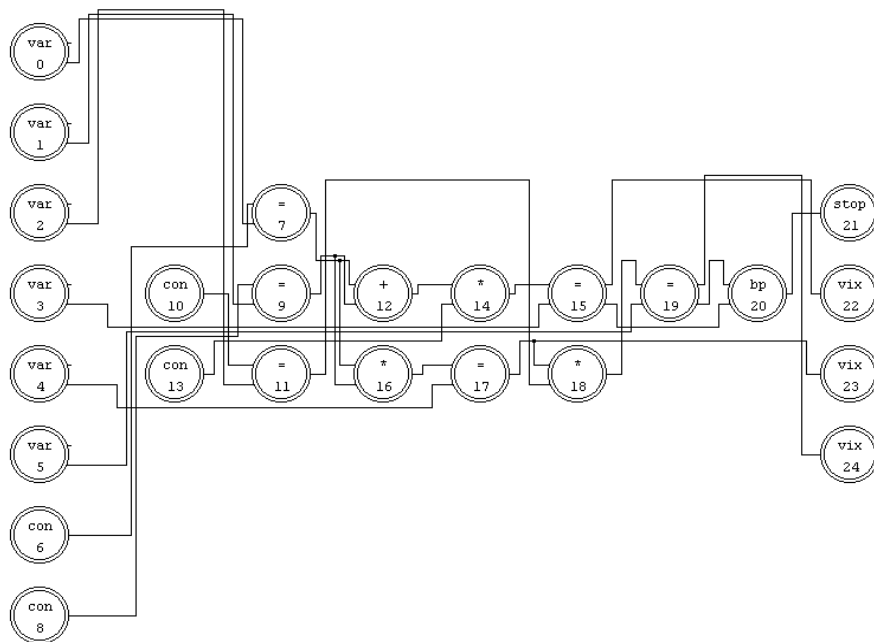


Рис. 3. Результат синтеза Си-графа исходного кода Си-программы

```

Тестирование
TESTING FILES:                2.2.2009      23:36:53 23:36:55
файл элементов:                C:\My_prog\C\Result\CNSV\WIX\WIX1.TXT
файл связей элементов:         C:\My_prog\C\Result\CNSV\WIX\WIX2.TXT

ТЕСТ КОРРЕКТНОСТИ ФАЙЛОВ:
максимальное количество элементов : 0 - 35
максимальное количество связей : 0 - 38
ТЕСТ СООТВЕТСТВИЯ ЧИСЛА СОПРЯЖЕННЫХ И ВНЕШНИХ СВЯЗЕЙ: ОК

ТЕСТ ЧИСЛА СВЯЗЕЙ ПО СОПРЯЖЕННЫМ ЭЛЕМЕНТАМ: ОК
ТЕСТ ЧИСЛА СВЯЗЕЙ ПО ВНЕШНИМ ЭЛЕМЕНТАМ: ОК
ТЕСТ СООТВЕТСТВИЯ ВЫВОДОВ ПО СОПРЯЖЕННЫМ ЭЛЕМЕНТАМ: ОК
ТЕСТ СООТВЕТСТВИЯ ВЫВОДОВ ПО ВНЕШНИМ ЭЛЕМЕНТАМ: ОК
ТЕСТ СООТВЕТСТВИЯ ЧИСЛА ВХОДОВ ЭЛЕМЕНТА И КОЛИЧЕСТВА ЕГО СОПРЯЖЕННЫХ: ОК

```

Рис. 4. Результаты компиляционной верификации семантико-числовой спецификации Си-графа

Таблица 1
Базовая структура, описывающая состав операторов задачи

N	TYP	NSJ	SJD	BJ	NWJ	WJD	VH	VIH	RES
0	47	-1	0	0	0	1	0	2	x
1	47	-1	0	0	1	1	0	2	y
2	47	-1	0	0	2	1	0	2	h
3	47	-1	0	0	3	1	0	2	p
4	47	-1	0	0	4	1	0	2	s
5	47	-1	0	0	5	1	0	2	v
6	57	-1	0	0	6	1	0	1	3
7	12	0	2	0	7	2	2	1	=
8	57	-1	0	0	9	1	0	1	12
9	12	2	2	0	10	2	2	1	=
10	57	-1	0	0	12	1	0	1	20
11	12	4	2	0	13	1	2	1	=
12	1	6	2	0	14	1	2	1	+
13	57	-1	0	0	15	1	0	1	2
14	3	8	2	0	16	1	2	1	*
15	12	10	2	0	17	2	2	2	1
16	3	12	2	0	19	1	2	1	*
17	12	14	2	0	20	2	2	1	=
18	3	16	2	0	22	1	2	1	*
19	12	18	2	0	23	2	2	2	=
20	50	20	2	0	25	1	2	1	bp
21	49	22	1	1	-1	0	1	0	stop
22	48	23	1	1	-1	0	1	0	p_out
23	48	24	1	1	-1	0	1	0	s_out
24	48	25	1	1	-1	0	1	0	v_out

Таблица 3
Результаты синтеза единиц измерения операторов Си-программы

N	TYP	NSJ	SJD	BJ	NWJ	WJD	RES	RAZM
0	47	-1	0	0	0	1	x	м
1	47	-1	0	0	1	1	y	м
2	47	-1	0	0	2	1	h	м
3	47	-1	0	0	3	1	p	нет
4	47	-1	0	0	4	1	s	нет
5	47	-1	0	0	5	1	v	нет
6	57	-1	0	0	6	1	3	б/раз
7	12	0	2	0	7	2	=	б/раз
8	57	-1	0	0	9	1	12	б/раз
9	12	2	2	0	10	2	=	м
10	57	-1	0	0	12	1	20	б/раз
11	12	4	2	0	13	1	=	м
12	1	6	2	0	14	1	+	м
13	57	-1	0	0	15	1	2	б/раз
14	3	8	2	0	16	1	*	м
15	12	10	2	0	17	2	=	м
16	3	12	2	0	19	1	*	м
17	12	14	2	0	20	2	=	м*м
18	3	16	2	0	22	1	*	м*м*м
19	12	18	2	0	23	2	=	м*м*м
20	50	20	2	0	25	1	bp	б/раз
21	49	22	1	1	-1	0	stop	б/раз
22	48	23	1	1	-1	0	p_out	м
23	48	24	1	1	-1	0	s_out	м*м
24	48	25	1	1	-1	0	v_out	м*м*м

Таблица 2
Множества номеров сопряженных и внешних операторов

N	JSD	SPJD	SNWIH	SNWHO	JWD	WPJD	WNWHO	WNWIH
0	1	0	1	1	-1	7	1	1
1	-1	6	0	0	-1	9	1	1
2	3	1	1	1	-1	11	1	1
3	-1	8	0	0	-1	15	1	1
4	5	2	1	1	-1	17	1	1
5	-1	10	0	0	-1	19	1	1
6	7	7	0	0	-1	7	0	0
7	-1	9	0	1	8	12	0	0
8	9	12	0	0	-1	16	0	0
9	-1	13	0	1	-1	9	0	0
10	11	3	1	1	11	12	1	0
11	-1	14	0	0	-1	16	1	0
12	13	7	0	0	-1	11	0	0
13	-1	9	0	1	-1	18	1	0
14	15	4	1	1	-1	14	0	0
15	-1	16	0	0	-1	14	1	0
16	17	17	0	0	-1	15	0	0
17	-1	11	0	1	18	20	1	1
18	19	5	1	1	-1	22	0	0
19	-1	18	0	0	-1	17	0	0
20	21	19	1	0	21	18	0	0
21	-1	15	1	1	-1	23	0	0
22	-1	20	0	0	-1	19	0	0
23	-1	15	0	0	24	20	0	1
24	-1	17	0	0	-1	24	0	0
25	-1	19	0	0	-1	21	0	0

Заключение

В докладе приводятся результаты семантико-числовой спецификации Си-программ и временных мультипараллельных моделей, адекватных различным требованиям/ограничениям и поддерживающих сочетания различных методов параллельной обработки данных.

Литература

1. Поляков Г.А. Адаптивные самоорганизующиеся системы с мультипараллельной обработкой данных – стратегия развития цифровой вычислительной техники в XXI веке / Г.А. Поляков // Прикладная радиоэлектроника. - 2002. - Т.1, № 1. - С. 37-41.
2. Каляев А.В. Многопроцессорные системы с программируемой архитектурой / А.В. Каляев – М.: Радио и связь, 1984. – 240 с.
3. Поляков Г.А. Проблемы создания систем совместного автоматического проектирования аппаратно-программных средств для мультипараллельной обработки данных / Г.А. Поляков // I-й Международный радиоэлектронный форум “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития” МРФ-2002. Часть 2 / - X., 2002. – С 241-244.
4. Воеводин В.В. Параллельные вычисления / В.В. Воеводин, Вл.В. Воеводин. - СПб.: БХВ Петербург, 2002. – 608 с.

5. Кривуля Г.Ф. Новые информационные технологии проектирования цифровых систем. / Г.Ф. Кривуля, В.И. Хаханов //1-й Международный радиоэлектронный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" МРФ-2002. Часть 2./ - X., 2002. – с. 233-236.

6. Поляков Г. А. Автоматизация проектирования сложных цифровых систем коммутации и управления. / Г. А. Поляков, Ю.Д. Умрихин. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.

7. Очков В.Ф. Физические и экономические величины в Mathcad Maple (+CD). / В.Ф. Очков М.: Финансы и статистика, 2002. – 192 с.

8. Калбертсон Роберт. Быстрое тестирование.: Пер. с англ. / Роберт Калбертсон, Браун Крис, Кобб Гэри. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 384 с.

9. Поляков Г.А. Компиляционная методика верификации статико-динамических объектов автоматического проектирования мультипараллельных цифровых устройств. / Г.А. Поляков, Д.А. Толстолужский // Прикладная радиоэлектроника. – X., 2005. - Т.1, № 2. – С.37-41.

10. Поляков Г.А. Декомпиляционная верификация временных мультипараллельных моделей алгоритмов / Г.А. Поляков, Д.А. Толстолужский, Е.Г. Толстолужская // Системы управления, навигации та зв'язку. – К.: ЦНДІ навігації та управління, 2008. - Вип. 4(8). - С.146-151.

11. Толстолужская Е.Г. Методика формализованного синтеза мультипараллельных архитектурно-ориентированных моделей решения задач / Е.Г. Толстолужская // Моделювання та інформаційні технології. – К., 2003. - Вип.22. – С. 206-215.

Поступила в редакцію 22.02.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры Б.М. Конорев, Харьковский национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского, Харьков, Украина.

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЇ СЕМАНТИКО - ЧИСЛОВОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ СІ-ПРОГРАМ ТА ЇХ ЧАСОВИХ ПАРАЛЕЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ

Г.О. Поляков, Д.О. Толстолужский

Описується методика комплексної формальної верифікації Сі-програм і їх часових паралельних моделей, заснована на застосуванні структур числової специфікації даних і їх обробці з урахуванням одиниць вимірювання фізичних величин. Наводяться результати семантико-числової специфікації Сі - програм і тимчасових мультипаралельних моделей, адекватних різним вимогам/обмеженням, що підтримують поєднання різних методів паралельної обробки даних.

Ключові слова: мультипаралельна обробка даних, компіляційна методика верифікації, семантична верифікація, структури семантико-числової специфікації.

TECHNIQUE OF COMPLEX SEMANTIC - NUMERICAL VERIFICATION OF C-PROGRAMS AND THEIR TIME PARALLEL MODELS

G.A. Polyakov, D.A. Tolstolyzskiy

The technique of complex formal verification of C-programs and their time parallel models, based on application of numerical data specification structures and their processing taking into account units of measure of physical sizes is described. Results of semantic-numerical specification of C - programs and the time multiparallel models adequate to various requirements/restrictions and supporting combinations of various methods of parallel data processing are outlined.

Key words: multiparallel data processing, compilation verification technique, semantic verification, structures of the semantic-numerical specification.

Поляков Геннадий Алексеевич – д-р техн. наук, проф., академик Академии Наук Прикладной Радиоэлектроники, Москва, Россия, e-mail: tda_ua@pochtamt.ru.

Толстолужский Дмитрий Александрович – младший научный сотрудник, Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина.