

КОМПЬЮТЕРНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 004.315

М.В. Лобачев, канд. техн. наук, доц.,
Одес. нац. ун-т ім. І.І. Мечникова,
Маоел Саїд Моуафак Монтаха, магістр,
О.В. Дрозд, д-р. техн. наук, проф.,
Одес. нац. політехн. ун-т

КОНТРОЛЬ МАНТИС ЗА СПРОЩЕНОЮ ОПЕРАЦІЄЮ В ПАРАЛЕЛЬНИХ АРИФМЕТИЧНИХ ЗСУВАЧАХ

М.В. Лобачев, Маоел Саїд Моуафак Монтаха, О.В. Дрозд. **Контроль мантис за спрощеною операцією в паралельних арифметичних зсувачах.** Розглянуто особливості робочого діагностування комп'ютерних пристроїв для обробки мантис у форматах із плаваючою точкою. Розроблено метод контролю паралельного арифметичного зсувача мантис за спрощеною операцією. Дано оцінку достовірності запропонованого методу в контролі наближених результатів та показано виграш порівняно до традиційних методів робочого діагностування.

М.В. Лобачев, Маоел Саїд Моуафак Монтаха, А.В. Дрозд. **Контроль мантис по упрощенной операции в паралельных арифметических сдвигателях.** Рассмотрены особенности рабочего диагностирования компьютерных устройств для обработки мантис в форматах с плавающей точкой. Разработан метод контроля паралельного арифметического сдвигателя мантис по упрощенной операции. Дана оценка достоверности предложенного метода в контроле приближенных результатов и показан выигрыш по сравнению с традиционными методами рабочего диагностирования.

M.V. Lobachev, Maoel Said Mouafak Montaha, A.V. Drozd. **Checking of mantissas by simplified operation in parallel arithmetic shifters.** The features of on-line testing of the computing circuits for mantissas processing in floating-point formats are considered. The method of checking the parallel arithmetical shifter of mantissas by simplified operation is developed. The reliability of the offered method in checking of the approximated results is estimated and an advantage in comparison with the traditional on-line testing methods is shown.

Робоче діагностування обчислювальних пристроїв супроводжує виконання основних операцій на фактичних даних і спрямовано на оцінку достовірності одержуваних при цьому результатів [1]. Сучасне робоче діагностування в основному розроблено для випадку точних даних, де всі помилки, що викликаються несправностями цифрової схеми, належать до суттєвих для достовірності результатів. Тому при вдосконаленні методів робочого діагностування основна увага приділялася підвищенню їхньої виявляючої спроможності. Це знайшло відбиття в теорії самоперевірюваних схем, де до методів робочого діагностування ставляться вимоги виявлення несправності із заданого класу за першою помилкою. Ці вимоги зафіксували й розуміння мети робочого діагностування як виявлення несправностей цифрових схем під час виконання основних обчислень на фактичних даних, тобто робочих наборах [2].

Постійне зростання обсягів обробки наближених даних потребує адаптації робочого діагностування до задач контролю наближених обчислень. Наближений результат містить старші вірні та молодші невірні розряди, помилки в яких є відповідно суттєвими та несуттєвими для його достовірності [3]. Особливості обробки наближених даних обумовлюють чинники, які істотно знижують частку суттєвих помилок та роблять імовірність появи суттєвої помилки значно меншою за ймовірність несуттєвої помилки [4]. В цих умовах висока виявляюча спроможність традиційних методів робочого діагностування, таких, як контроль за модулем та паритетом [5, 6], використовується в основному для виявлення найбільш імовірних, тобто несуттєвих помилок.

Наближені обчислення дозволяють глибше розглянути основи робочого діагностування. Виявлення несправностей не може бути метою робочого діагностування, яке здійснюється при виконанні основних операцій на фактичних даних. Основні операції спрямовані на одержання результатів обчислень, а робоче діагностування має за мету оцінку достовірності цих результатів. За виявленням несправностей можна оцінювати достовірність результатів, оскільки виявлена помилка водночас вказує і на наявність несправності, і на обчислення помилкового результату. Однак помилковий результат завжди збігається з недостовірним результатом тільки у випадку точних даних. Тому при робочому діагностуванні обробки наближених даних необхідно керуватися справжньою метою, за якою метод робочого діагностування є достовірним, якщо дає правильну оцінку результату: достовірний результат зараховує до достовірних, а недостовірний — до недостовірних. Недостовірний результат ідентифікується виявленням в ньому помилки, а фактичною ознакою недостовірного результату є наявність несуттєвої помилки. Тому достовірність методу робочого діагностування оцінюється в контролі достовірності результатів за формулою [7]

$$D = P_B P_C + (1 - P_B)(1 - P_C), \quad (1)$$

де P_B — імовірність виявлення помилки;

P_C — імовірність появи суттєвої помилки.

Традиційні методи робочого діагностування, що базуються на вимогах теорії самоперевірюваних схем, мають високу ймовірність виявлення помилок, і для заданого класу несправностей $P_B = 1$. Тоді, згідно з (1), достовірність контролю наближених результатів визначається як $D = P_C$, тобто має мале значення $D \ll 1$, що є основною проблемою робочого діагностування.

Для підвищення достовірності контролю наближених результатів при малих значеннях P_C необхідно відповідно знижувати ймовірність P_B .

Пропонується метод контролю за спрощеною операцією, який розглядається на прикладі робочого діагностування паралельного арифметичного зсувача мантис. Метод контролю аналізує результат операції на обмеженій множині вхідних даних, що спрощує операцію. За основний підхід до обмеження вхідних даних використовується введення умов, за якими реальний округлений результат за модулем збігається з найбільш просто перевірюваним результатом. За такий результат може служити результат повної операції або нульове значення.

Метод визначає обчислення трьох дворозрядних кодів: коду E_1 спрощення операції, коду E_2 контролю спрощеної операції та коду E контролю результату. Код E_1 формується за операндами обчислюваної операції і приймає однакові значення розрядів у разі виконання обмежень за введеними умовами та взаємно-інверсні значення у протилежному випадку. Код E_2 формується за результатом операції, яка розглядається як спрощена, і приймає однакові значення розрядів при виявленні помилки в результаті та взаємно-інверсні значення у протилежному випадку. Код E формується за кодами E_1 та E_2 і приймає однакові значення розрядів при виконанні обмежень на операнди та виявленні помилки результату, а взаємно-інверсні значення — у протилежному випадку.

Об'єкт діагностування — паралельний арифметичний зсувач мантис — використовується при реалізації найбільш поширеної операції додавання, що здійснюється у форматах із плаваючою точкою [8]. Операція зсуву мантиси виконується праворуч за один такт на величину зсуву $d \{1 \dots r\} = 0 \dots n$, де n та r — розрядності мантиси та величини зсуву, відповідно.

При виконанні операції арифметичного зсуву відбуваються три дії: зміна ваг зсунутих розрядів, втрата молодших розрядів, що потрапили за межі розрядної сітки, та заповнення вивільнених позицій знаковими розрядами (для додаткового або оберненого кодів мантиси), що визначають округлений результат [9]

$$A_O\{1 \dots n\} = 2^{-d} \cdot (A\{1 \dots n\} - A\{n-d+1 \dots n\}) + S\{1 \dots d\}, \quad (2)$$

де 2^{-d} — співмножник, що враховує зміну ваг зсунутих розрядів;

$A\{n-d+1 \dots n\}$ — розряди, що втрачаються ($A\{n-d+1 \dots n\} = 0$ при $d = 0$);

$S\{1 \dots d\}$ — знакові розряди $A\{1\}$, що заповнюють вивільнені позиції.

Результат виконання повної операції, тобто довгого зсуву, визначається без втрати молодших розрядів за формулою

$$A_d\{1 \dots 2n\} = 2^{-d} \cdot A\{1 \dots n\} + S\{1 \dots d\} + S\{n+d+1 \dots 2n\}. \quad (3)$$

Умова збігання за модулем округленого результату з результатом повної операції визначається при порівнянні за модулем формул (2) та (3)

$$(2^{-d} \cdot A\{n-d+1 \dots n\} + S\{n+d+1 \dots 2n\}) \bmod M = 0. \tag{4}$$

При виборі $M = 3$ формула (4) приймає вигляд

$$((-1)^{-d\{1\}} \cdot A\{n-d+1 \dots n\} + A\{1\} \cdot (n-d) \bmod 2) \bmod 3 = 0. \tag{5}$$

Умова збігання за модулем округленого результату з нулем витікає з формули (2) при $A_0\{1 \dots n\} = 0$

$$((-1)^{-d\{1\}} \cdot (A\{1 \dots n-d\}) + A\{1\} \cdot (n-d) \bmod 2) \bmod 3 = 0, \tag{6}$$

де $A\{1 \dots n-d\} = A\{1 \dots n\} - A\{n-d+1 \dots n\}$ — розряди мантиси, що залишаються після зсуву.

Матриця зсуву містить всі варіанти зсунутого операнда A , що поставлені у відповідність величині зсуву d , яка подана у двійковій системі числення. Така матриця відображає зсув операнда $A\{2 \dots n\}$ (без знакового розряду $A\{1\}$) з розрядністю $n = 8$ (рис. 1).

d			$A\{2 \dots n\}, n = 8$													
3	2	1	$A\{2\}$	$A\{3\}$	$A\{4\}$	$A\{5\}$	$A\{6\}$	$A\{7\}$	$A\{8\}$							
0	0	0	$A\{2\}$	$A\{3\}$	$A\{4\}$	$A\{5\}$	$A\{6\}$	$A\{7\}$	$A\{8\}$							
0	0	1	$A\{1\}$	$A\{2\}$	$A\{3\}$	$A\{4\}$	$A\{5\}$	$A\{6\}$	$A\{7\}$	$A\{8\}$						
0	1	0	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{2\}$	$A\{3\}$	$A\{4\}$	$A\{5\}$	$A\{6\}$	$A\{7\}$	$A\{8\}$					
0	1	1	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{2\}$	$A\{3\}$	$A\{4\}$	$A\{5\}$	$A\{6\}$	$A\{7\}$	$A\{8\}$				
1	0	0	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{2\}$	$A\{3\}$	$A\{4\}$	$A\{5\}$	$A\{6\}$	$A\{7\}$	$A\{8\}$			
1	0	1	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{2\}$	$A\{3\}$	$A\{4\}$	$A\{5\}$	$A\{6\}$	$A\{7\}$	$A\{8\}$		
1	1	0	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{2\}$	$A\{3\}$	$A\{4\}$	$A\{5\}$	$A\{6\}$	$A\{7\}$	$A\{8\}$	
1	1	1	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{1\}$	$A\{2\}$	$A\{3\}$	$A\{4\}$	$A\{5\}$	$A\{6\}$	$A\{7\}$	$A\{8\}$

Рис. 1. Матриця зсуву операнда

Матриця зсуву складається зі старшої лівої частини (стовпці $A\{2 \dots n\}$), що обчислюється арифметичним зсувачем, та молодшої правої частини, яка вилучається з обчислень.

Матриця зсуву розбивається на фрагменти $V_i, i = 1 \dots n - 1$, що визначають контрольні коди KA_i частин A_i операнда [10]. При $n = 2^r$ на фрагменти розбивається старша частина матриці зсуву, що дозволяє обчислити умову за формулою (6). Така розбивка матриці визначає функції вибору контрольного коду зсунутого операнда (рис. 2).

Контрольні коди KA_i частин A_i операнда визначаються таким чином:

$$\begin{aligned} KA_1 &= A\{8\} \bmod 3; & KA_2 &= A\{6, 7\} \bmod 3; \\ KA_3 &= A\{6\} \bmod 3; & KA_4 &= A\{2 \dots 5\} \bmod 3; \\ KA_5 &= A\{4\} \bmod 3; & KA_6 &= A\{2, 3\} \bmod 3; \\ KA_7 &= A\{2\} \bmod 3. \end{aligned}$$

d			$A\{2 \dots n\}, n = 8$								Функції вибору KA_i		
3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	MX_1	MX_2	MX_3	
0	0	0						1		KA_4	KA_2	KA_1	
0	0	1						2		KA_4	KA_2		
0	1	0						3		KA_4		KA_3	
0	1	1						4		KA_4			
1	0	0						5			KA_6	KA_5	
1	0	1						6			KA_6		
1	1	0						7				KA_7	
1	1	1											

Рис. 2. Розбивка старшої частини матриці зсуву на фрагменти та визначення функцій вибору

При $n < 2^r$ на фрагменти розбивається молодша частина матриці зсуву, що дозволяє обчислити умову за формулою (5). Така розбивка матриці визначає функції вибору контрольного коду розрядів операнда, що втрачаються (рис. 3).

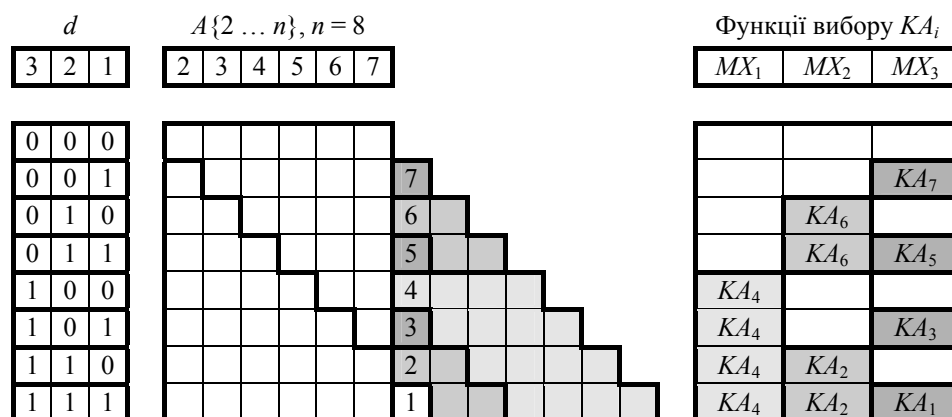


Рис. 3. Розбивка молодшої частини матриці зсуву на фрагменти та визначення функцій вибору

Контрольні коди KA_i частин A_i операнда визначаються за розбиванням матриці зсуву таким чином:

$$\begin{aligned} KA_1 &= A\{1\} \bmod 3; & KA_2 &= A\{2, 3\} \bmod 3; \\ KA_3 &= A\{3\} \bmod 3; & KA_4 &= A\{6 \dots 8\} \bmod 3; \\ KA_5 &= A\{5\} \bmod 3; & KA_6 &= A\{6, 8\} \bmod 3; \\ KA_7 &= A\{7\} \bmod 3. \end{aligned}$$

При перевірці однієї умови за модулем M кількість вхідних слів, що задіяні в контролі, знижується в M разів. Можливе використання додаткових умов, які спрощують обчислення формули (5) або (6). Код E_2 перевіряє за модулем формулу (4) або прирівнює результат за модулем до нуля. Код E ідентифікує недостовірний результат при виконанні умов перевірки операндів та виявленні помилки при перевірці результату зсуву.

Витрати обладнання схеми контролю, що обчислює коди E_1 , E_2 та E , не перевищують витрат обладнання схеми контролю за модулем.

Імовірність виявлення помилки визначається як

$$P_B = M^{-Z-1},$$

де Z — кількість умов, що встановлюються для вхідних слів.

Ще одна умова, що описується формулою (4), перевіряється при контролі результату та формуванні коду E_2 .

Достовірність контролю наближених результатів підвищується при ймовірності $P_C < 0,5$ відповідним зменшенням імовірності P_B .

Наприклад, для $P_C = 0,2$ перевірка для вхідних слів однієї умови за модулем три забезпечує ймовірність $P_B = 0,11$ і згідно з (1) достовірність контролю результатів $D = 0,73$. Традиційний контроль за модулем три з імовірністю $P_B = 0,9$ має, згідно з (1), достовірність $D = 0,26$, тобто контроль за спрощеною операцією підвищує достовірність у 2,8 разів. При перевірці двох умов імовірність виявлення помилки складає $P_B = 0,04$, а достовірність — $D = 0,78$, що перевищує достовірність контролю за модулем три в три рази.

Таким чином, запропонований метод дозволяє підняти у декілька разів достовірність контролю наближених результатів в умовах, коли помилка, що виникає за несправністю схеми, є суттєвою з імовірністю $P_C < 0,5$.

Література

1. Drozd, A. The problem of on-line testing methods in approximate data processing / A. Drozd, M. Lobachev, J. Drozd // Proc. 12th IEEE Intern. On-Line Testing Symp., Como, Italy. — 2006. — p. 251 — 256.
2. Согомоян, Е.С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е.С. Согомоян, Е.В.Слабаков. — М.: Радио и связь, 1989. — 208 с.
3. Демидович, Б.П. Основы вычислительной математики / Б.П. Демидович, И.А. Марон. — М.: Физматгиз, 1966. — 664 с.
4. Drozd, A. On-line testing of computing circuits at approximate data processing / A. Drozd // Радіоелектроніка та інформатика. — 2003. — № 3. — С. 113 — 116.
5. Noufal, I. A CAD Framework for Generating Self-Checking Multipliers Based on Residue Codes / I. Noufal, M. Nicolaidis // Proc. of IEEE Design, Automation and Test in Europe, Munich, Germany. — 1999. — p. 122 — 129.
6. Nicolaidis, M. Achieving Fault Secureness in Parity Prediction Arithmetic Operators: General Conditions and Implementations / M. Nicolaidis, S. Manich, J. Figueras // Proc. The European Design & Test Conf. — Paris (France). — 1996. — P. 186 — 193.
7. Дрозд, А.В. Нетрадиционный взгляд на рабочее диагностирование вычислительных устройств / А.В. Дрозд // Проблемы упр. — 2008. — № 2. — С. 48 — 56.
8. Справочник по цифровой вычислительной технике / Б.Н. Малиновский, В.Я. Александров, В.П. Боюн и др. — К.: Техника, 1974. — 512 с.
9. Дрозд, О.В. Контроль за модулем обчислювальних пристроїв / Дрозд О.В. — Одеса: АО Бахва, 2002. — 144 с.
10. Drozd, A.V. Efficient on-line Testing Method for Floating-Point Adder / A.V. Drozd, M.V. Lobachev // Proc. Design, Automation and Test in Europe Conf. — Munich, Germany. — 2001. — P. 307 — 311.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. політехн. ун-ту Антошук С.Г.

Надійшла до редакції 5 жовтня 2009 р.