

УДК 621.325.5

А.В. ДРОЗД, М.В. ЛОБАЧЕВ

Одесский национальный политехнический университет, Украина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАБОЧЕГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ

Рассмотрены особенности использования рабочего диагностирования цифровых устройств при решении сложных вычислительных задач. Показано, что целью рабочего диагностирования является оценка достоверности результатов. При выполнении приближенных вычислений неисправности схем производят ошибки, которые являются несущественными для достоверности результатов в большинстве случаев. Традиционные методы рабочего диагностирования демонстрируют низкую эффективность, обнаруживая, в основном, несущественные ошибки и отбраковывая достоверные результаты.

рабочее диагностирование, вычислительные устройства, приближенные вычисления, достоверность результатов, существенные и несущественные ошибки, достоверность методов рабочего диагностирования

Постановка проблемы

Постановка вычислительной задачи включает в себя три основные компоненты: объем вычислений, допустимое время его выполнения и обеспечение достоверных результатов. Уровень защищенности общества определяется умением решать задачи на пределе возможностей, в областях критического применения. Предельные возможности, как правило, заключаются в выполнении значительного объема вычислений за минимально возможное время. Из этого следуют такие особенности решения задач:

– распараллеливание вычислений, которое предполагает высокую сложность технического (в основном аппаратного) решения, ограниченную его надежностью;

– различные требования к точности и диапазону данных, которые обуславливают приближенный характер вычислений.

Приближенный результат содержит старшие верные и младшие неверные разряды [1]. Результат является достоверным, если содержит требуемое количество верных разрядов [2].

Достижимая в этих условиях достоверность результатов определяется двумя факторами:

– непрерывным потоком неисправностей вслед-

ствие ограниченной надежности технического решения;

– ростом абсолютной погрешности приближенных результатов, что происходит с увеличением объема выполняемых вычислений.

Каждый из этих факторов может сделать задачу нерешаемой.

Рост абсолютной погрешности уменьшает количество верных разрядов результата. Для любой вычислительной системы можно определить объем вычислений, при котором результат не будет иметь ни одного верного разряда. Вычислительная система разрабатывается на определенный класс задач, который ограничен также по объему выполняемых вычислений. Задача, в частности, не может быть решена сегодня, если современная технология измерений не обеспечивает получения исходных данных с точностью, достаточной для вычисления требуемого количества верных разрядов результата.

Для борьбы с потоком неисправностей время выполнения задачи разбивается на интервалы, обозначаемые контрольными точками. Если результат в контрольной точке является достоверным, то вычисления продолжают на следующем интервале, а в противном случае повторяется текущий интервал вычислений. Каждое повторение вычислений пре-

пятствует решению задачи в установленный срок.

Получение достоверных результатов в условиях существенного противодействия основывается на отбраковке недостоверных результатов и, следовательно, на возможности оценивать достоверность результата. Такая возможность реализуется путем выполнения дополнительных, избыточных вычислений. В общем виде речь идет о версионной избыточности, которая обеспечивает неоднократное получение результатов решения задачи, используя для этого различные возможности [3]. Сравнение результатов, вычисленных по различным версиям, позволяет отбраковать недостоверные результаты.

Многоверсионные системы не следует противопоставлять мажоритарным, т.е. состоящим из одинаковых каналов для многократного решения задачи, поскольку каждый из этих каналов при его аппаратной реализации становится уникальным, например, по наличию его скрытых дефектов, приводящих к неисправностям. Даже повторный счет на одном и том же устройстве дает две версии решения задачи с учетом различного проявления во времени сбоев. Таким образом, мажоритарные системы являются частным случаем многоверсионных систем.

Однако многоверсионная технология существенно усложняет решение задачи, и поэтому практический интерес представляют, прежде всего, наиболее простые виды версионности. К ним относятся диверсность [4], к которой можно причислить также основное и контрольное решение задачи. Вторая версия выполняется наиболее просто, в сокращенном варианте, используя методы и средства рабочего диагностирования. Контрольное решение задачи может быть использовано и при большем количестве версий. Поэтому рабочее диагностирование следует рассматривать как одно из основных средств обеспечения достоверных результатов.

Однако исторически сложившееся, традиционное понимание цели рабочего диагностирования тормозит его дальнейшее развитие, приводит к су-

щественному отставанию в решении задач, которые ставятся перед ним в современных вычислительных процессах.

Традиционная трактовка рабочего диагностирования

Считается, что рабочее диагностирование, как и тестовое, направлено на оценку технического состояния схем путем поиска их неисправностей. Отличие признается в том, что тестовое диагностирование это делает на тестах в паузах вычислений, а рабочее диагностирование – на рабочих, т.е. фактических данных в процессе их обработки [5, 6].

Следует также отметить, что современную основу рабочего диагностирования составляет теория самопроверяемых схем [7]. Эта теория ведет свой отсчет с 1968 года, когда на Конгрессе в Эдинбурге В. Картер и П. Шнайдер предложили строить самопроверяемые схемы, распространяя рабочее диагностирование также на собственные средства [8].

Были введены определения полной самопроверяемости цифровых схем – их защищенности и самотестируемости в заданном классе неисправностей.

Защищенность определила условия обнаружения одной неисправности из заданного класса при возникновении первой ошибки результата вычислений, а самотестируемость – возможности обнаружения первой неисправности до появления второй.

В следующие десятилетия и по настоящее время рабочее диагностирование развивалось по пути разработки самопроверяемых схем, которые были успешно построены для комбинационных преобразователей и автоматов с памятью [9, 10], арифметических устройств сложения, умножения и деления [11, 12], используя различные способы кодирования данных, контроль по паритету и модулю.

Теория самопроверяемых схем сыграла важную роль в развитии рабочего диагностирования, определив основное требование, предъявляемое к его

методам – обнаруживать неисправности цифровых устройств по первой ошибке на их выходах [13].

Эти достижения определяют высокую достоверность разработанных методов рабочего диагностирования, позволяющих выявлять практически все типичные неисправности современных вычислительных устройств.

Однако сегодня теория самопроверяемых схем стала существенно ограничивать развитие рабочего диагностирования, подчиняя его устаревающим догмам.

Одна из таких догм состоит в традиционном определении цели рабочего диагностирования, которая перестает отвечать современным реалиям и замыкает рабочее диагностирование в рамки частного случая обработки точных данных.

Предлагается определить настоящую цель рабочего диагностирования, сравнить ее с объявленной целью и оценить реальную достоверность методов рабочего диагностирования.

Цель рабочего диагностирования

Одним из существенных негативов теории самопроверяемых схем является фиксация в рабочем диагностировании приоритета поиска неисправностей устройств над обнаружением ошибок вычисляемых результатов. Этот приоритет позволил на десятилетия сохранить единую цель для рабочего и тестового диагностирования – оценивать техническое состояние устройств путем поиска их неисправностей. Однако использование рабочего диагностирования в процессе выполнения вычислений, т.е. на фактических данных, делает объявленную цель несостоятельной, противоречащей практике и даже нереализуемой для самопроверяемых схем.

Действительно, процесс вычислений можно уподобить полету самолета, и было бы странно наблюдать поиск неисправностей в ходе полета.

Поиск неисправностей следует выполнять до начала полета, до начала вычислений, и для этого тес-

товое диагностирование имеет больше возможностей по сравнению с рабочим диагностированием.

Поиск неисправностей в процессе вычислений также противоестественен как поиск мин, осуществляемый не саперами-тестами, а следующими за ними фактическими данными, ради правильной обработки которых минное поле и подвергается разминированию.

Для понимания настоящей цели рабочего диагностирования достаточно обратиться к практике его использования.

Ошибки вызываются двумя основными типами неисправностей – сбоями и отказами, причем, как известно, сбой возникает значительно чаще отказов [14]. Поэтому в самопроверяемой схеме по первой ошибке будет, как правило, обнаружен сбой, который является кратковременной самоустраняющейся неисправностью и не позволяет судить о техническом состоянии схемы. Обнаружение одной ошибки не является достаточным условием также для идентификации отказа как устойчивой неисправности. Отказ идентифицируют по его характерному поведению – генерации серии ошибок. А первая обнаруженная ошибка может быть как началом такой серии, так и единственной в случае сбоя.

Таким образом, самопроверяемые схемы, положенные в основу рабочего диагностирования, не дают реальной оценки технического состояния цифрового устройства.

Первая ошибка обнаруживается не для оценки технического состояния устройства, а для получения ответа на вопрос: «Можно ли использовать вычисленный результат или он является недостоверным?». Как правило, после обнаружения первой ошибки предпринимается вторая попытка вычисления достоверного результата в расчете на то, что происшедшая неисправность является сбоем и не отражает техническое состояние устройства.

На практике методы рабочего диагностирования используются для оценки достоверности вычисляе-

мых результатов, что объясняет их направленность на обнаружение первой ошибки и является настоящей целью рабочего диагностирования.

Следует отметить, что поиск неисправностей в рабочем диагностировании осуществляется путем оценки результата вычислений обнаружением его ошибок, т.е. настоящая цель рассматривается как средство достижения объявленной ложной цели.

Вместе с тем, техническое состояние схемы представляет интерес только с позиции вычисления достоверных результатов в процессе их получения, а вне этого не имеет никакой ценности, и потому не является конечным предметом оценки.

Сравнение объявленной и настоящей цели рабочего диагностирования

Насколько различаются объявленная и настоящая цели рабочего диагностирования?

В случае точных данных любая ошибка является существенной для достоверности результата, т.е. делает его недостоверным. Следовательно, обнаружение любой ошибки при обработке точных данных, с одной стороны, свидетельствует о действии неисправности, а с другой стороны, о получении недостоверного результата. Это позволяет отождествить объявленную и настоящую цели. Причем предпочтение было отдано объявленной цели, что можно объяснить первичностью неисправности по отношению к порождаемой ею ошибке.

Обработка приближенных данных имеет ту особенность, что большинство ошибок, порождаемых неисправностями цифровых устройств, не оказывает влияния на достоверность вычисляемых результатов, т.е. относится к несущественным ошибкам. Они исключаются в процессе округлений или проявляются в младших неверных разрядах результата [15].

Действительно, приближенные данные наиболее эффективно представляются и обрабатываются в

форматах с плавающей точкой в виде произведения с использованием мантиссы и порядка [16]. Поэтому умножение присутствует во всех операциях, выполняемых над мантиссами, удваивая разрядность результата по сравнению с разрядностью операндов (для двухместных операций). Согласно теории ошибок, результат не может иметь верных разрядов больше, чем операнд [17]. Поэтому разряды младшей половины результата являются неверными и в форматах с одинарной точностью отбрасываются. При этом можно считать, что каждая вторая ошибка проявляется в отбрасываемых разрядах и, следовательно, является несущественной.

В приближенных вычислениях нарушаются коммутативный и ассоциативный законы. Для их восстановления применяют двойные и расширенные форматы, увеличивая разрядность мантисс за счет младших неверных разрядов. Это относит большую часть ошибок к несущественным.

Кроме того, выравнивание порядков, выполняемое в наиболее часто используемых операциях сложения, приводит к сдвигу мантиссы слагаемого с меньшим порядком. При этом отбрасываются младшие разряды сдвигаемой мантиссы, которые во всех предшествующих операциях считались верными. Поэтому каждое выравнивание порядков также уменьшает долю существенных ошибок.

Для достижения объявленной цели необходимо обнаруживать неисправности цифровых устройств. В этом случае неважно, какую ошибку генерирует неисправность – существенную или несущественную. Любая ошибка указывает на неисправность, и поэтому ее следует обнаруживать с наибольшей вероятностью.

Для достижения настоящей цели необходимо обнаруживать только существенные ошибки, т.е. меньшую часть всех ошибок. Поэтому для обработки приближенных данных объявленная и настоящая цели расходятся в значительной мере.

Достоверность методов рабочего диагностирования

Достоверность методов определяется степенью соответствия оценки, полученной по этим методам, истинному положению [18].

С позиции объявленной цели метод рабочего диагностирования является достоверным, т.е. выявляет неисправность устройства в той степени, в какой обнаруживает ошибки.

Современные методы рабочего диагностирования, такие как контроль по модулю и паритету, разработаны для случая обработки точных данных. Они выполнены в соответствии с требованиями самопроверяемых схем и обнаруживают практически все ошибки, вызываемые типичными неисправностями матричных устройств. Поэтому эти методы имеют высокую достоверность в соответствии с объявленной целью [19]. С позиции настоящей цели метод рабочего диагностирования является достоверным, если обнаруживает существенные ошибки, выявляя недостоверные результаты, и игнорирует несущественные ошибки, сохраняя достоверные результаты, вычисляемые при неисправностях.

Современные методы рабочего диагностирования не различают существенные и несущественные ошибки, что приводит к обнаружению в основном наиболее часто встречающихся несущественных ошибок и отбраковке достоверных результатов.

Это указывает на низкую достоверность методов рабочего диагностирования, что в условиях непрерывного потока неисправностей в значительной степени препятствует решению вычислительной задачи [20].

Таким образом, высокая вероятность обнаружения ошибок, достигнутая в современных методах рабочего диагностирования, используется вопреки получению эффективной оценки достоверности результатов при обработке приближенных данных.

Перспективы развития рабочего диагностирования

Настоящая цель рабочего диагностирования цифровых устройств – оценивать достоверность вычисляемых результатов – эффективно достигается только в рамках обработки точных данных.

Приближенные данные составляют основную часть чисел, и их доля в компьютерной обработке постоянно растет.

Обработка приближенных данных существенно меняет условия рабочего диагностирования, разделяя ошибки, вызываемые неисправностями, на существенные и несущественные для достоверности вычисляемых результатов.

Расширяется также круг задач критического применения, для которых пересчет достоверных результатов, отбракованных вследствие обнаружения несущественных ошибок, составляющих большинство, стоит недопустимо дорого.

В условиях непрерывного потока неисправностей несущественные ошибки играют положительную роль, создавая дополнительные возможности для получения достоверных результатов вычислений.

Однако несовершенные методы рабочего диагностирования демонстрируют низкую достоверность и становятся одной из основных преград на пути решения сложных вычислительных задач, отбрасывая вычислительный процесс на предыдущие контрольные точки при обнаружении несущественных ошибок.

Все перечисленное требует совершенствования методов рабочего диагностирования в направлении постановки и достижения настоящей цели, их развития по пути различения существенных и несущественных ошибок и, соответственно, снижения отбраковки достоверных результатов.

Литература

1. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Физматгиз, 1966. – 664 с.
2. Желнов Ю.А. Точностные характеристики управляющих вычислительных машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
3. Kharchenko V.S., Tarasenko V.V. Multiversion Design Technologies of On-board Fault-tolerant FPGA Devices // Proc. MAPLD Conf., Maryland, USA. – 2001.
4. Харченко В.С., Тарасенко В.В. Технология разработки отказоустойчивых цифровых устройств на ПЛИС с использованием диверсных моделей ввода и тестирования проекта // Радиозлектроника и информатика. – 2002. – № 3. – С. 71-74.
5. Горяшко А.П. Синтез диагностируемых схем вычислительных устройств. – М.: Наука, 1987. – 288 с.
6. Пархоменко П.П., Согомоян Е.С. и др. Основы технической диагностики. – М.: Энергия, 1981. – 320 с.
7. Согомоян Е.С., Слабаков Е.В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. – М.: Радио и связь, 1989. – 208 с.
8. Carter W., Schneider P. Design of Dynamically Checked Computers // Proc. IFIP Congress 68. – Edinburgh, Scotland. – 1968. – P. 878-883.
9. Smith J.E. and Metze G. The design of totally self-checking combinational circuits // Proc. Int. Symposium on Fault Tolerant Computing Dig. – Los Angeles (USA). – 1977. – P. 130-134.
10. Ozguner F. Design of totally self-checking asynchronous and synchronous sequential machines // Proc. Int. Symposium on Fault Tolerant Computing Dig. – Los Angeles, USA. – 1977. – P. 124-129.
11. Nicolaidis M. Efficient Implementation of Self-checking Adders and ALUS // Proc. 23th Fault Tolerant Computing Symp., Toulouse, France. – 1993. – P. 586-595.
12. Nicolaidis M., Bedder H. Efficient Implementation of Self-checking Multiply and Divide Arrays // Proc. 1994 European Design and Test Conf. – Paris, France. – 1994. – P. 134-137.
13. Favalli M. and Metra S. Optimization of Error Detecting Codes for the Detection of Crosstalk Originated Errors // Proc. of IEEE Design, Aut. and Test in Europe, Munich, Germany. – 2001. – P. 290-296.
14. Noufal I. and Nicolaidis M. A CAD Framework for Generating Self-Checking Multipliers Based on Residue Codes // Proc. of IEEE Design, Aut. and Test in Europe, Munich, Germany. – 1999. – P. 122-129.
15. Drozd A. On-line Testing of Computing Circuits at Approximate Data Processing // Radioelectronics & Informatics. – 2003. – № 3. – P. 113-116.
16. ANSI/IEEE Std 754-1985. IEEE Standard for Binary Floating-Point Arithmetic. IEEE, New York, USA, 1985. – 18 p.
17. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. – М., Ленинград: ОГИЗ, 1948. – 556 с.
18. Тоценко В.Г. Алгоритмы технического диагностирования дискретных устройств. – М.: Радио и связь, 1985. – 240 с.
19. Щербаков Н.С. Достоверность работы цифровых устройств. – М.: Машиностроение, 1989. – 224 с.
20. Дрозд А.В. Достоверность рабочего диагностирования вычислительных устройств для обработки приближенных данных // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2002. – Вип. 4 (20). – С. 8-13.

Поступила в редакцию 2.03.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Харченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.