

## ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ

д.т.н., проф. В. А. Краснобаев

С единых позиций создания высокоотказоустойчивых и сверхбыстродействующих вычислителей цифровой обработки информации анализируются свойства непозиционной системы счисления в остаточных классах (СОК). Показано их влияние на структуру и функционирование процессоров.

Основой для создания вычислителей, функционирующих в СОК, является возможность использования одновременно всех теоретико - числовых свойств СОК. Систематизируем и обобщим их свойства, произведем качественную оценку их влияния на структуру вычислителя и методы обработки информации с учетом возможности коррекции ошибок, возникающих в процессе его функционирования.

Выделим три основные свойства СОК.

1. **НЕЗАВИСИМОСТЬ ОСТАТКОВ.** Учет данного свойства дает возможность построения спецпроцессора (СП) в виде набора из  $n$  независимых вычислительных трактов (ВТ), параллельно функционирующих во времени. Данное обстоятельство позволяет распараллелить вычисляемый алгоритм на уровне микроопераций, что принципиально невозможно ни для одной из существующих позиционных систем счисления (ПСС). Это позволяет реализовать большинство арифметических операций за один такт работы вычислителя. Очевидно также, что СП в СОК будет обладать модульной структурой. Это позволяет осуществлять техническое обслуживание ВТ СП не прерывая решения задачи, что особо важно для вычислителей, функционирующих в реальном масштабе времени [1-4]. Одновременно с этим ошибки, возникшие по произвольному основанию (модулю)  $m_i$  СОК, не “размножаются”, что повышает достоверность вычислений СП в целом. При этом безразлично, имели ли место по основанию  $m_i$  однократные или многократные ошибки, или даже пачка ошибок длиной не более  $\lfloor \log_2 (m_i - 1) \rfloor + 1$  двоичных разрядов. Кроме этого, ошибка, возникшая в любом ВТ СП в СОК, сохраняется до окончания вычислений в этом же тракте, либо самоустраняется (например, путем умножения искаженного остатка на нуль) в процессе дальнейшей работы без останова вычислений.

В результате использования данного свойства СОК создана уникальная система контроля и коррекции ошибок в динамике вычислительного процесса при введении минимальной кодовой избыточности

[1,3,5-11]. Отличительной чертой такой организации контроля и коррекции ошибок является возможность их обнаружения и исправления без останова вычислений управляющих алгоритмов, что особо важно для систем регулирования и управления ответственных объектов.

**2. РАВНОПРАВНОСТЬ ОСТАТКОВ.** Любой остаток числа, представленного в СОК, несет информацию о его количественном значении. Это дает возможность программными методами заменить отказавший ВТ по модулю  $m_i$  работоспособным трактом по модулю  $m_j$  ( $m_i < m_j$ ) не прерывая решения задачи. Кроме этого, СП в СОК сохраняет свою работоспособность при отказах одновременно нескольких ВТ и способен выполнять программу при некотором уменьшении точности вычислений, т.е. такой спецпроцессор обладает свойством деградируемости и является функционально исключительно живучим. В этом аспекте спецпроцессор в СОК можно отнести к классу природоотказоустойчивых вычислительных структур. Данное свойство обуславливает также следующую характерную особенность функционирования СП: один и тот же вычислитель в СОК может иметь различную степень надежности решения задач в зависимости от требований, предъявляемых к точности, объему памяти и быстродействию, т.е. в процессе решения задач возможно осуществлять “обменные операции” между точностью вычислений, быстродействием решения алгоритмов и надежностью функционирования СП (достоверностью решения задач) [1-3, 12-14].

Использование первого и второго свойств обуславливает наличие в спецпроцессоре одновременно трех видов резервирования: структурного, информационного и функционального, что и обеспечивает высокую отказоустойчивость СП в СОК. Результаты исследований показали, что использование свойств СОК позволяет обеспечить не меньшую надежность СП в классе вычетов, чем широко применяемые в позиционных системах счисления мажоритарные методы дублирования и троирования вычислительных структур. Это достигается при значительно меньшем дополнительно вводимом объеме оборудовании [2, 3, 15 - 20], что подтверждается результатами испытаний бортовых цифровых вычислительных комплексов “STAR” и опытом эксплуатации комплекса “ЭПОС”. Анализ данных свойств позволяет также сделать вывод о том, что отдельные функциональные блоки и узлы в классе вычетов относятся к легко контролируемым и диагностируемым цифровым устройствам [1 - 3, 20].

**3. МАЛОРАЗРЯДНОСТЬ ОСТАТКОВ.** Созданные табличные алгоритмы реализации арифметических операций в СОК позволяют значительно повысить надежность (за счет использования регулярных табличных структур) и производительность (это достигается за счет возможности распараллеливания алгоритмов на уровне микроопераций) спецпроцессора.

Использование табличной арифметики в СОК позволило создать оптоэлектронные матричные процессоры с фиксированной запятой и с быстродействием около сотен миллионов элементарных операций в секунду независимо от величины разрядной сетки вычислителя. В настоящее время созданы и функционируют СП в СОК, выполняющие роль арифметических расширителей (АР) для базовых ЭВМ. В первую очередь АР реализуют арифметические операции сложения, вычитания и умножения, а также решают задачи цифровой фильтрации, дискретного преобразования Фурье и т.п.

Проведенные исследования показали, что представление аналоговой информации в СОК позволяет создать отказоустойчивую аналоговую вычислительную систему, функционирующую с любой заданной точностью, т.е. обеспечивается высокая точность вычислений спецпроцессора,

равная  $1 / \prod_{i=1}^n m_i$ , при сравнительно невысокой точности вычислений в каждом тракте, равной  $1/m_i$  [1, 21].

В [22 - 26] показано, что голографические принципы переработки информации (которые, по предположению многих ученых, подобны принципам функциональной организации процесса мышления человека) хорошо согласуются с принципами представления и обработки информации в СОК. Данное обстоятельство позволило создать когерентные оптические вычислительные структуры в СОК, приспособленные для параллельной обработки информации, (что обусловлено двумерной структурой светового потока, переносящего информацию), векторные и сигнальные процессоры, процессоры Фурье, а также сделать вывод о том, что СОК может являться основой создания систем искусственного интеллекта, а также фундаментом при построении супер - ЭВМ следующего поколения.

В настоящее время продолжают поиски путей улучшения отдельных характеристик спецпроцессора за счет возможности позиционно - остаточного представления операндов [20, 26 - 29]. Показано, что использование позиционно - остаточного кодирования позволяет находить новые оригинальные технические решения в области построения функциональных блоков и узлов отказоустойчивых и быстродействующих СП, функционирующих в реальном масштабе времени.

Одним из важных путей дальнейшего применения СОК является использование остаточного кодирования при обработке информации в гиперкомплексной числовой области. Действительно, в соответствии с результатами первой фундаментальной теоремы Гаусса, которая гласит, что данному модулю комплексного числа соответствует один и только один вычет из ряда натуральных чисел, можно при вычислениях целиком заменить комплексную область вещественной, т.е. комплексные числа заменить вещественными вычетами (числами). Это дает возможность

обрабатывать информацию в комплексной числовой области, работая только с вещественными числами. Применение СОК для процессов обработки цифровой информации в гиперкомплексной области открывает широкие перспективы создания эффективных алгоритмов управления сложными техническими объектами и системами на основе использования многомерных векторов функциональных пространств различных классов [1, 21, 30 - 33].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. Машинная арифметика в остаточных классах. – М. : Сов. радио, 1968. – 440 с.
2. Краснобаев В.А. Методы повышения надежности специализированных ЭВМ систем и средств связи. – МО СССР, 1990. – 173 с.
3. Торгашов В. А. Система остаточных классов и надежность ЦВМ. – М. : Сов. радио, 1973. – 120 с.
4. А.с. СССР № 922731. Устройство для умножения в СОК / В.А. Краснобаев. – Оpubл. в БИ № 15, 1982.
5. А.с. СССР № 1151970. Устройство для определения альтернативной совокупности чисел в СОК / В.А. Краснобаев и др. – Оpubл. в БИ № 15, 1985.
6. Королев А.В., Краснобаев В.А., Лысенко И.Э. Коррекция ошибок в классе вычетов // АСУ летательных аппаратов. – Харьков : ХАИ. – 1982. – Вып. 4. – С. 145 - 151.
7. Краснобаев В.А. Способ помехоустойчивого кодирования в СОК // Радиотехника. – 1984. – Вып. 70. – С. 9 - 17.
8. Краснобаев В.А. Способ арифметического помехоустойчивого кодирования в СОК // Радиотехника. – 1985. – Вып. 73. – С. 27 - 31.
9. Краснобаев В.А. Оценка быстродействия коррекции ошибок в СОК для систем передачи // Радиотехника. – 1984. – Вып. 71. – С.32 - 35.
10. Краснобаев В.А. Техническая реализация метода коррекции ошибок в СОК // АСУ и приборы автоматики. – 1987. – Вып. 81. – С. 97 - 101.
11. Краснобаев В.А. Метод коррекции ошибок в СОК // АСУ и приборы автоматики. – 1987. – Вып. 82.– С. 112 - 115.
12. А.с. СССР № 888124. Устройство для обнаружения и исправления ошибок в СОК / В. А. Краснобаев. Оpubл. в БИ. 1981, № 45.
13. А.с. СССР № 1166117. Устройство для контроля информации в СОК / В.А. Краснобаев. – Оpubл. в БИ № 25, 1985.
14. А.с. СССР. № 1168947 Устройство для резервирования / В.А. Краснобаев. – Оpubл. в БИ № 27, 1985.
15. Краснобаев В.А. Надежностная модель ЭВМ в системе остаточных классов // Электронное моделирование. – 1985. – № 4. – С. 44 - 46.

16. Краснобаев В.А. Вариант математической модели ЭВМ в системе остаточных классов // Кибернетика. – 1987. – № 1. – С. 25 - 26, 38.
17. Краснобаев В.А., Ирхин В.П. Вариант решения обратной задачи оптимального резервирования в системе остаточных классов // Кибернетика. – 1990. – № 3. – С. 123 - 125.
18. Краснобаев В.А. Математическая модель надежности ЭВМ в СОК // Электронное моделирование. – 1990. – № 5. – С. 125 - 118.
19. Краснобаев В.А. Надежностный синтез ЭВМ в системе остаточных классов // Кибернетика. – 1990. – № 5. – С. 115 - 118.
20. Ирхин В.П. Проектирование непозиционных специализированных процессоров. – Воронеж: Изд - во ВГУ, 1999. – 136 с.
21. Долгов А.И. Диагностика устройств, функционирующих в системе остаточных классов. – М.: Радио и связь, 1982. – 64 с.
22. Краснобаев В.А. Искусственный интеллект и система остаточных классов // Проблемы бионики. – 1987. – № 39. – С. 53 - 59.
23. Акаев А.А., Майоров С.А. Когерентные оптические вычислительные машины. – Л.: Машиностроение, 1977. – 400 с.
24. Морозов В.Н. Оптоэлектронные матричные процессоры. – М. : Радио и связь, 1986. – 112 с.
25. Ерофеев А.А., Ковалев В.С., Ульянов И.С. Сигнальные процессоры. – М. : Знание, 1991. – 64 с.
26. Акаев А.А., Майоров С.А. Оптические методы обработки информации. – М. : Высшая школа, 1988. – 237 с.
27. Евстигнеев В.Г., Сведо - Швец А.А., Краснобаев В.А. Арифметические алгоритмы для  $q$ -ичной системы счисления // АСУ летательных аппаратов. – Харьков : ХАИ. – 1982. – Вып. 4. – С. 165 - 168.
28. Ключко В.И., Ткаченко А.В. Синтез устройств АСУ в  $T$ -системах счисления. – МО СССР, 1986. – 330 с.
29. А.с. СССР № 1546952. Генератор последовательности  $P$ - чисел Фибоначчи / А.В. Ткаченко, О.Н. Фоменко, В.А. Краснобаев и др. – Оpubл. в БИ № 5, 1990.
30. А.с. № СССР 1166098. Устройство для умножения в системе остаточных классов / В.А. Краснобаев. – Оpubл. в БИ № 25, 1980.
31. Акушский И.Я., Амербаев В.М., Пак И.Т. Основы машинной арифметики комплексных чисел. – Алма-Ата : Наука, 1970. – 248 с.
32. Амербаев В.М. Теоретические основы машинной арифметики. – Алма-Ата : Наука, 1976. – 324 с.
33. Коляда А.А., Пак И.Т. Модулярные структуры конвейерной обработки цифровой информации. – Минск : Наука, 1992. – 256 с.

*Поступила в редколлегию 30.10.2000*