

УДК 681. 03

С.А. Мороз, В.А. Краснобаев

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ НЕПОЗИЦИОННЫХ КОДОВЫХ СТРУКТУР КЛАССА ВЫЧЕТОВ**

*Рассмотрены пути создания отказоустойчивых и быстродействующих систем обработки данных в информационно-телекоммуникационных сетях на основе использования кодов в классе вычетов.*

**Ключевые слова:** *непозиционные кодовые структуры, класс вычетов, системы обработки данных.*

### **Введение**

Задача эффективного использования сетевых ресурсов и необходимость реализации распределенной обработки данных в информационно-телекоммуникационных сетях (ИТС) поставили актуальный вопрос о создании и внедрении в современных сетях передачи данных (СПД) и в существующих системах обработки информации (СОИ) новых методов и средств быстрой и достоверной обработки цифровой информации. Модернизация существующих и создания методов и средств обработки цифровой информации позволит повысить оперативность обмена информации в СПД.

Современный этап развития ИТС обуславливает, необходимость оперативного решения окончательным оборудованием данных СПД всё более сложных задач. Однако вычислительная сложность решаемых задач опережает темпы нарастания мощности цифровых СОИ. В этом аспекте, основными направлениями совершенствования СОИ СПД реального времени является повышения пользовательской производительности и безотказности функционирования, за счет обеспечения необходимого (заданного) уровня отказоустойчивости (надежности).

**Анализ современной литературы.** Все множество СОИ в двоичных позиционных системах счисления (ПСС), можно разделить на четыре основные группы.

SISD-архитектуры (одиночный поток команд и одиночный поток данных) обеспечивает домини-

рующее положение в классической Фон-Неймановской архитектуры. В таких машинах обработка информации происходит последовательно, команды выполняются одна за другом, при этом каждая команда инициирует, как правило, одну скалярную операцию. В этом случае использование параллельной работы интерфейса ввода-вывода информации и процессора, совмещение операций, выполняемых отдельными блоками и узлами арифметико-логического устройства, не позволяют эффективно реализовать параллельные вычислительные СОИ реального времени. Следовательно, возможности по повышению быстродействию современных позиционных СОИ, базирующихся на классической архитектуре последовательного выполнения операторов, практически достигли своего предельного значения.

СОИ системы второй группы - MISD-архитектуры (множественный поток команд и одиночный поток данных) большой практической реализации не получили; эти задачи, в которых несколько процессоров могли бы эффективно обрабатывать один поток данных, в науке и технике пока неизвестны.

Основу третьей группы вычислительных систем составляют устройства, разработанные на основе SIMD-архитектуры (одиночный поток команд и множественный поток данных).

SIMD-архитектура позволяет реализовать высокоскоростные СОИ реального времени; с их помощью эффективно решаются задачи векторных и мат-

ричних вычислений, задачи определения корней систем алгебраических и дифференциальных управлений и т.п.; особое место занимают задачи цифровой обработки сигналов, которые являются наиболее оптимальными для SIMD – структуры. Данная архитектура вычислительной системы ориентирована на параллельно-конвейерное выполнение наиболее трудоемких вычислительных операций. Обеспечение предельной для данного уровня технологии производительности СОИ возможно только за счет применения нетрадиционной арифметики, в которой процесс распараллеливания осуществляются на уровне арифметических операций (микроопераций); альтернативным решением проблемы решения задач повышенной вычислительной сложности в реальном времени является применение MIMD-архитектуры (множественный поток команд и множественный поток данных). Этот класс предполагает, что в вычислительной системе есть несколько устройств обработки команд, объединенных в единый комплекс и работающих каждый со своим потоком данных и команд (мультимикропроцессорные, многомашинные, кластерные и другие подобные вычислительные системы). Однако, несмотря на все преимущества, отмеченные выше, такие как, наличие собственной памяти у каждого процессорного элемента и независимость вычислительного процесса, системы с массовым параллелизмом породили целый ряд проблем, связанных с описанием и программированием коммутаций процессов и управления ими. В то же самое время отсутствие математического аппарата, позволяющего решить проблему повышения производительности вычислительных систем, является основным сдерживающим фактором широкого применения MIMD-систем с массовым параллелизмом [1-3].

Таким образом, очевидно, что дальнейшее поступательное развитие вычислительной техники и средств обработки информации в ПСС напрямую связано с переходом к параллельным вычислениям. Данный переход открывает новые возможности в области совершенствования и развития СОИ СПД [3 – 5].

**Цель статьи** – показать пути создания отказоустойчивых и быстродействующих систем обработки данных в информационно-телекоммуникационных сетях на основе использования кодов в классе вычетов (КВ).

### Основная часть

Резервами повышения оперативности обмена информации в СПД, надежности, отказоустойчивости и живучести функционирования СОИ СПД являются использования принципа распараллеливания решаемой задачи (алгоритма) на уровне микроопераций и применения средств контроля, диагностики и коррекции ошибок информации.

Концепция параллелизма давно привлекала внимание специалистов своими потенциальными

возможностями повышения производительности СОИ. Проводимые теоретические, экспериментальные и промышленные разработки в этом направлении позволили обосновать основные принципы построения параллельных вычислительных систем. Именно с подобными системами связывается в настоящее время перспектива дальнейшего наращивания вычислительной мощности и надежности.

В 2011 году исполнилось 56 лет после опубликовании статьи чешского инженера М. Валаха, в которой впервые была выдвинута идея применить для операций над компьютерными числами вместо операций кольца вычетов по модулю  $M=2^n$  операции кольца вычетов по модулю  $M = m_1 m_2 \dots m_n$ , где  $m_1, m_2, \dots, m_n$  – попарно взаимно-простые числа. В вычислительной практике это была выдающаяся идея, так как все кольцевые операции по модулю  $M = m_1 m_2 \dots m_n$  сводились к гомоморфной параллельной реализации тех же операций по малым модулям  $m_1, m_2, \dots, m_n$ . Известная китайская теорема об остатках, которая до этого трактовалась как структурная теорема абстрактной алгебры, гарантировала указанный параллелизм в вычислениях над целыми числами, при условии, что результат кольцевых операций принадлежит диапазону целых чисел, определяемому произведением модулей  $M=m_1 m_2 \dots m_n$ . Эта идея привлекла внимание большой группы ученых. Возникло новое научное направление – модулярная арифметика.

За истекшие 50 лет модулярная арифметика (система остаточных классов (СОК), класс вычетов) пережила периоды и бурного развития, и серьезных спадов. В настоящее время наблюдается прогрессирующий рост интересов к модулярной арифметике среди разработчиков сложных систем, связанных с обработкой сигналов и изображений, с криптографическими преобразованиями и т.п.

На основе использования трех основных свойств (независимость, равноправность и малоразрядность остатков, определяющих кодовую структуру) КВ по сравнению с ПСС обладает следующими существенными преимуществами:

- возможность распараллеливания процесса обработки данных на уровне представления;
- пространственное разнесение элементов данных с возможностью их последующей асинхронной независимой обработки;
- возможность табличной (матричной) обработки данных базового набора и полиномиальных функций с однократной выборкой результата модульной операции;
- возможность создания цифровых устройств СОИ СПД с эффективным обнаружением и исправлением сбоев и отказов, а также самокорректирующихся и высоконадежных цифровых устройств;
- возможность контроля и коррекции ошибок в динамике обработки данных СОИ реального времени;

-обеспечение высокой активной отказоустойчивости СОИ СПД на основе применения методов оперативной реконфигурации;

-меньшая вычислительная сложность вычислительных алгоритмов для отдельных классов (типов) задач;

-проявление особого свойства структуры СОИ в КВ, обеспечивающего отсутствие эффекта размножения ошибок при обработке данных;

-приспособленность структуры СОИ в КВ для проведения оперативной диагностики ее блоков и узлов;

-возможность повышения надежности СОИ в КВ за счет эффективного использования пассивной и активной отказоустойчивости.

Техническая реализация распараллеливания процесса обработки данных в модели взаимодействия может осуществляться по-разному. В принципе распараллеливание может быть осуществлено на нескольких уровнях: на канальном уровне, на сетевом уровне, на транспортном уровне при передачи данных между узлами сети, на уровне представления и на прикладном при передаче файлов информации и подключении удаленных терминалов к компьютеру по сети.

Одним из наиболее перспективных направлений в разработке высокоскоростных вычислительных систем является переход к распараллеливанию на уровне арифметических микроопераций. В современных и перспективных алгоритмах, использующих аппарат линейной алгебры, основными вычислительными процедурами являются операции типа перемножения векторов и матриц, обращение матриц, поиска собственных векторов и собственных значений матриц, решение систем линейных алгебраических уравнений и т.п.

Одним из наиболее перспективных направлений решения проблемы повышения отказоустойчивости без снижения пользовательской производительности является переход к вычислениям в нетрадиционной арифметике с нетрадиционным представлением операндов. Из множества нетрадиционных арифметик наибольшее применение в вычислительных системах нашли следующие: - модулярная арифметика в системе остаточных классов (в классе вычетов); - коды Фибоначчи; - арифметика в знакологарифмической системе счисления; модулярная комплексная арифметика Гаусса (комплексные, квадриплексные и триплексные числа, кватернионы, бикватернионы и пр.); арифметика в кольце полиномов; позиционно-остаточная система счисления.

Анализ нетрадиционных арифметик показал, что в настоящее время наибольшее практическое применение нашли вычислительные устройства, использующие непозиционные модулярные коды в КВ.

В [2, 3] детально рассмотрено влияние основных свойств (независимость, равноправность и малоразрядность остатков, представляющих операнд)

КВ на структуру и принципы функционирования системы обработки информации. В частности, показано, что малоразрядность остатков в представлении чисел в модулярной арифметике дает возможность широкого выбора вариантов системотехнических решений при реализации модульных арифметических операций, основанных на следующих принципах: сумматорный принцип (на базе малоразрядных двоичных сумматоров); табличный принцип (на основе использования таблиц ПЗУ); прямой логический принцип реализации арифметических операций, основанный на описании модульных операций на уровне систем переключаемых функций булевой алгебры; принцип кольцевого сдвига, основанный на использовании кольцевых регистров сдвига.

Существующая в последние годы в вычислительной технике тенденция к распараллеливанию вычислений связана с непрерывным ростом требований к производительности вычислительных средств. В то же самое время процессоры, составляющие значительную часть аппаратной реализации СОИ, относятся к числу наименее надежных устройств, доля отказов и сбоев которых составляет более 50 процентов от общего числа отказов и сбоев аппаратуры. При этом среднее время ликвидации последствий последних, как правило, на несколько порядков превышает среднюю продолжительность выполнения одной задачи.

Наиболее перспективным путем разрешения данного противоречия является придание процессорам свойства отказоустойчивости. СОИ является отказоустойчивой (Fault-tolerant system), если при возникновении отказа она сохраняет свои функциональные возможности в полном (fail-safe) или ограниченном (fail-soft) объеме. При этом отказоустойчивость СОИ обеспечивается эффективным использованием как имеющейся, так и дополнительно введенной избыточности, а также и наличием процедур обнаружения и исправления отказов и сбоев. Fail-safe устойчивость к отказам характеризует способность вычислительной системы обеспечивать обслуживание, несмотря на возникновение отказа, хотя и с понижением качества, то есть находясь в состоянии постепенного снижения эффективности (деградации). Именно в таком контексте будет рассматриваться понятие отказоустойчивости СОИ в КВ.

Свойство отказоустойчивости обеспечивает СОИ возможность выполнения заданных действий, и после возникновения отказов за счет снижения в допустимых пределах каких-либо показателей качества функционирования (например, путем постепенной деградации). Таким образом, учет вышесказанного обуславливает актуальность исследований в сфере разработки методов повышения отказоустойчивости в процессе функционирования высокоскоростных процессоров.

Анализ причин, по которым модулярная арифметика, имеющая явные преимущества перед ПСС

при решении ряда важнейших вычислительных задач, не получила должного практического применения, показал следующее [1, 2]:

– силовое прекращение работ по созданию модулярных СОИ в СССР стало мощным психологическим фактором на пути развития модулярной арифметики; разработки модулярных СОИ были закрыты в институтах, связанных с промышленностью, в результате, многие из ведущих специалистов прекратили свои работы в этой области, многие перешли в академические и учебные институты, т.е. в сферу чисто теоретических исследований;

– модулярная арифметика нетрадиционная, достаточно сложная математическая дисциплина и трудна для восприятия большинству специалистов в вычислительной технике и в микроэлектронике; в ВУЗах программа для этих специальностей и соответствующая математическая подготовка, как правило, не предусмотрены; о серийно производимых (“К 340”, “К 340А”, “АЛМАЗ” и пр.) и реально существующих и функционирующих модулярных ЭВМ (на строго засекреченных тогда объектах) научной общественности ничего известно не было, а слух о «провале» такого проекта получил широкую огласку, в результате, во многих учебных изданиях модулярная арифметика (как и о троичной системе счисления, кодах Фибоначчи и т.п.) представляется как реально теоретически возможное экзотическое, но малоперспективное направление, отвергнуто реальной практической жизнью; в этом аспекте уже априорно программируется негативное отношение молодых специалистов к идеи разработки и практическому применению модулярной арифметике;

– с появлением микропроцессоров, БИС и СБИС высокой сложности, наряду с положительным их влиянием на вычислительную технику, превратившим ее из продукции штучного и мелкосерийного производства в продукцию массовую, имеется и негативная сторона этого явления; так, с появлением микропроцессоров многие разработчики СОИ были лишены возможности реализации своих новых идей и технических решений, они попали под диктат производителей микропроцессоров, были вынуждены применять фактически навязанные им стандартные микропроцессоры; в результате во всем мире количество коллективов, разрабатывающих новые СОИ, значительно сократилось, развитие вычислительной техники как науки резко затормозилось; за последние 30-35 лет практически ничего принципиально нового в серийно выпускаемых СОИ не появилось, в основном эксплуатируются идеи, рожденные в шестидесятых – семидесятых годах прошлого столетия; остатки вычислительной техники, как науки, с генерацией новых идей и решений, переместились в академические и учебные институты, в область теоретических исследований, что еще более усугубило проблемы развития модулярной арифметики, которая по иным причинам и на несколько лет

раньше оказалась в подобном же положении; ситуация изменяется в настоящее время с развитием систем автоматизации проектирования на основе стандартных технологий и библиотек сложных элементов и дезинтеграции процессов создания интегральных схем с введением режимов Fables (разработка в автономных дизайн-центрах) и Foundry (производства по проектам других фирм), однако, для КВ и здесь имеются определенные сложности: требуется создание специальных библиотек, хотя эта задача в научном плане не сложная, но требующая существенных организационных и финансовых затрат;

– в настоящее время существенным тормозом в развитии модулярной арифметики является организационная и информационная разобщенность ученых и инженеров, работающих в этом направлении; действительно, при огромном количестве публикаций по непозиционному кодированию, они, как правило, труднодоступны, научные контакты между разрозненными группами специалистов недостаточно развиты, и доступная информация о проводимых исследованиях и результатах отсутствует, никакой координации исследований нет; все это существенно снижает эффективность проводимых работ, не позволяет в полной мере использовать имеющийся научный потенциал для достойного развития модулярной арифметики;

В настоящее время интерес к модулярной арифметике вновь существенно возрос, и это обусловлено двумя основными причинами:

– резко возросшими требованиями к вычислительным ресурсам СОИ в связи с бурным развитием криптографии, новых методов обработки и передачи сигналов и изображений и т.п.;

– развитием современных программируемых логических интегральных схем, а также достижениями систем проектирования в микроэлектронике, предоставившими инженеру-системотехнику возможность реализовать свои технические решения в виде, например, заказной интегральной схемы в режиме Fables и т.п.

За прошедшие 50 лет в развитии модулярной арифметики достигнуты значительные результаты. На первом этапе наибольшие успехи в становлении и применении МА были достигнуты в СССР под руководством И.Я. Акушского и Д.И. Юдицкого. Возглавляемым ими коллективом ученых и инженеров на элементной базе второго поколения были разработаны и построены ряд модулярных СОИ, по производительности, надежности и экономичности намного превосходивших всех своих отечественных и зарубежных современников. Так, например, СОИ “К-340А” выпускались в большом серийном производстве, они до сих пор (около 40 лет) работают на объектах военного назначения, демонстрируя свою высокую надежность. Однако по причинам, не имеющим ничего общего с научными, техническими или экономическими соображениями, в первой половине семидесятых годов работы по созданию модулярных СОИ с СССР в ад-

министративном порядке были прекращены. Сам факт прекращения работ, при полном отсутствии информации об его истинных причинах, сыграл очень негативную роль в развитии модулярной арифметики в стране. Центры дальнейших работ по модулярной арифметике переместились из промышленных институтов, имеющих свои производства и работающих по заказам для обеспечения вычислительной техникой мощных радиоэлектронных систем, переместились в академические и учебные институты, в сферу чисто теоретических исследований. Дальнейшие попытки создания реальных вычислительных устройств на основе кодов в КВ подавлялись чиновниками, имевшими некоторую информацию о прекращении работ над модулярными ЭВМ и, не зная истинных причин, делавшими из этого искаженные выводы о недостаточной перспективности модулярной арифметики.

Однако усилиями множества ученых-энтузиастов модулярная арифметика продолжала развиваться. Были решены основные теоретические вопросы модулярной арифметики, разработан ее математический аппарат. Получен ряд интересных результатов не только в теоретическом плане, но и в практическом использовании модулярной арифметики. Наблюдается рост интереса к применению КВ в смежных областях науки и техники, требующих наряду с быстрой обработкой информации и повышения отказоустойчивости, надежности, живучести функционирования и достоверности вычислений.

### Выводы

Данная статья не содержит всех исчерпывающих данных по какому-либо одному конкретному вопросу применения кодов в КВ и предназначена для определения возможных путей их применения. Кроме этого, на основе вышеизложенного материала, можно сделать следующий вывод.

Существует целый ряд классов (типов) фундаментальных задач, важнейших для современного уровня развития науки и техники, оборонной промышленности, экономики и систем безопасности страны, которые на основе использования КВ могут быть успешно решены значительно эффективнее, чем на традиционных позиционно-двоичных СОИ.

Путем использования кодов в КВ могут быть решены важные научно-технические задачи: эффективное использование сетевых ресурсов и реализация быстрой обработки данных в информационно-телекоммуникационных сетях; повышение оперативности обмена информации в СПД; создание быстродействующего и точного бортового вычислительного устройства для наведения и управления, или для сжатия данных в технике передачи и обработки сигналов; создание нейрокомпьютеров в КВ, высокоотказоустойчивых и сверхпроизводительных арифметических расширителей мощных стационарных СОИ, бортовых СОИ реального времени, оптических устройств памяти и обработки данных, оптоэлектронных матричных процессоров; создание арифметических ускорителей для ПЭВМ; построение процессоров быстрой обработки криптографической информации и прочее.

### Список литературы

1. Краснобаев В.А. Отказоустойчивые вычислительные системы на основе модулярной арифметики: концепции, методы и средства / В.А. Краснобаев, В.И. Барсов, Е.В. Яськова // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2007. – № 8(27). – С. 82-90.
2. *Материалы Международной научно-технической конференции "50 лет модулярной арифметике"*. МИЭТ, г. Зеленоград. Моск. обл. 23-25 ноября 2005 г.
3. Акуиский И.Я. *Машинная арифметика в остаточных классах* / И.Я. Акуиский, Д.И. Юдицкий. – М.: Сов. радио, 1968. – 440 с.
4. Сиора А.А. *Отказоустойчивые системы с версионно-информационной избыточностью в АСУ ТП: моногр.* / А.А. Сиора, В.А. Краснобаев, В.С. Харченко – Х.: МОН, НАУ им. Н.Е. Жуковского (ХАИ), 2009. – 320 с.
5. Барсов В.И. *Методология параллельной обработки информации в модулярной системе счисления: моногр.* / В.И. Барсов, Л.С. Сорока, В.А. Краснобаев. – Х.: МОН, УИПА, 2009. – 268 с.

Поступила в редколлегию 14.12.2010

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

### ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ НЕПОЗИЦІЙНИХ КОДОВИХ СТРУКТУР КЛАСУ ЛИШКІВ

С.А. Мороз, В.А. Краснобаєв

*Розглянуті шляхи створення відмовостійких і швидкодіючих систем обробки даних в інформаційно-телекомунікаційних мережах на основі використання кодів в класі вирахувань.*

**Ключові слова:** *непозиційні кодові структури, клас лишків, системи обробки даних.*

### RESEARCH OF WAYS OF INCREASE OF EFFICIENCY OF THE USE OF TELECOMMUNICATIONS-INFORMATION SYSTEMS ON BASIS OF APPLICATION OF UNPOSITION CODE STRUCTURES OF CLASS OF DEDUCTIONS

S.A. Moroz, V.A. Krasnobaev

*The ways of creation of the fault-tolerant and fast-acting handling systems of data are considered in telecommunications-information networks on the basis of the use of codes in the class of deductions.*

**Keywords:** *unposition code structures, class of deductions, handling systems of data.*