



Методы и принципы построения модулярных нейрокомпьютеров

(Ставропольский военный институт связи ракетных войск)

В статье рассмотрены вопросы модулярной (остаточной) арифметики и ее применение в разработке и организации модулярных нейрокомпьютерных вычислительных машин. Особое внимание уделено алгоритмам вычислений позиционных характеристик, время определения которых влияет на быстродействие модулярного нейрокомпьютера.

Противоречие между вычислительной сложностью и скоростью определения позиционных характеристик разрешено путем совместного применения китайской теоремы об остатках (КТО) и модифицированного алгоритма Х. Гарнера, что позволило найти универсальную позиционную характеристику, представленную в виде коэффициентов обобщенной позиционной системы счисления.

Проведена классификация основных базисных операций и их реализация в нейросетевом базисе. Введено понятие мультинейропроцессора. Предложено для коррекции ошибок использовать сеть Хопфилда и Хэмминга. Разработана адаптивная параллельно-конвейерная нейронная сеть для обнаружения, локализации и исправления ошибок. Рассмотрен принцип построения отказоустойчивых модулярных нейрокомпьютеров. Показано, что разработка нового класса модулярных нейрокомпьютеров связана с успехами развития программируемых логических интегральных схем.

Ресурсы вычислительной техники, функционирующей в позиционной системе счисления, постоянно совершенствуются и увеличиваются, но они не могут быть безграничными в принципе. Для решения многих научных, технических и промышленных задач не хватает мощности современных компьютеров. Поиски новых путей повышения эффективности вычислений привели исследователей к объективному выводу, что в рамках обычной позиционной системы счисления скачкообразного ускорения выполнения операций добиться невозможно. Те или иные отдельные приемы совершенствования алгоритмов выполнения операций, развития архитектурных особенностей и др. способствуют увеличению производительности, но оставляют ее в рамках фон-неймановской возможности. Выход из этой ситуации найден в привлечении новых идей в области организации и функционирования ЭВМ на основе остаточной арифметики, которая обладает специфическими характеристиками, являющимися необычными и полезными. Для представления и обработки цифровой информации остаточная арифметика предлагает ценный взгляд и более широкую перспективу, так как система остаточных классов представляет решительное отклонение от хорошо известных, на вид неизменных законов, которые управляют системами весовых (позиционных) чисел с фиксированными основаниями, т.е. десятичные и двоичные системы счисления. Стимулирующим фактором развития остаточной арифметики является нейроматематика – новый, перспективный раздел вычислительной математики, связанный с разработкой методов и алгоритмов решения задач в нейросетевом базисе, обладающего свойствами параллельного представления и обработки информации. Предпосылкой к созданию нейрокомпьютерных вычислительных средств с модулярным представлением и обработкой данных является семантическое сходство математических моделей нейронных сетей и китайской теоремы остатков [1, 2]. Оказалось, что новая организация ЭВМ, построенная на основе согласованных свойств остаточной (модулярной) арифметики и нейронных сетей позволяет выйти на следующий более прогрессивный этап развития параллельных принципов обработки информации, который обеспечивает решение более сложных задач.

Это утверждение основано на принципе адекватности математических моделей системы остаточных классов и нейронных сетей, обладающих свойствами массово-параллельных вычислений, нейроны которых выполняют роль арифметических элементов, имеющих

характеристики по модулю. Если количество синапсов нейронной сети согласовано с количеством оснований системы остаточных классов, то нейронная сеть становится естественным представлением системы остаточных классов, что и послужило началом исследования совместного использования искусственных нейронных сетей и системы остаточных классов с целью создания нового класса ЭВМ – модулярных нейрокомпьютеров [1, 2].

Рассматривая вычисления в пределах модулярного кода все операции, выполняемые нейрокомпьютером, можно разбить на две группы: модульные и немодульные. Первая группа, составляющая арифметические операции (сложение, вычитание и умножение) в остаточной арифметике включает в себя быстрые операции, в то время операции второй группы являются медленными. Вторая группа включает нахождение вычета числа, его преобразование, определение переполнения диапазона, расширение базы оснований, масштабирование и другие и требует иногда частичного преобразования в позиционную систему. Следовательно, для того, чтобы решить проблемы, для которых остаточная арифметика хорошо подходит или наоборот, чтобы определить использовать ли остаточную арифметику для решения заданной проблемы, необходимо рассмотреть такие арифметические операции, которые будут необходимы. Существенным является сокращение медленных операций в общей системе используемых операций, либо разработать методы и алгоритмы быстрого выполнения медленных операций, тогда остаточная арифметика будет иметь более широкую применимость. Решение проблемы можно достичь, если решать их методами, подходящими для позиционных систем счисления.

Центральной операцией для ряда вычислительных проблем является операция вычисления вычетов по модулям, входящим в выбранную систему модулей модулярной арифметики. Эта операция должна быть базисной в конструируемой компьютерной арифметики, которая накладывает требования на выбор и алгоритмы модульных и немодульных операций, обеспечивающих максимальную простоту операции вычисления вычетов.

Отображение вычислительного алгоритма в систему остаточных классов для выполнения на модулярной вычислительной базе является настройкой вычисляемых алгоритмов на вычислительную базу. Взаимная настройка компьютерной арифметики на вычислительную проблему позволяет получить оптимальные по быстро-

действию и аппаратным затратам вычислительные алгоритмы [3, 4].

Разработка теоретических основ вычислительных средств на базе модулярной арифметики требует решения проблемы, заключающейся в замене числового значения модулярной величиной, которая определенным образом связана со значениями компонент модулярного представления. Эти операции являются медленными, например, к таким операциям можно отнести сравнение чисел, определение знака числа, переполнение машинного диапазона и другие [1-6].

Именно медленность их выполнения сдерживает широкое применение модулярной машинной арифметики.

Для решения этой проблемы целесообразно использовать два пути.

Первый путь – поиск простых алгоритмов выполнения этих операций.

Второй путь – реализация вычислительных алгоритмов с помощью быстродействующих модульных операций.

Для реализации первого подхода предлагаются специальные функционалы [1-6] – количественные характеристики отношения порядка над множеством модулярных векторов, элементы декартового произведения колец-классов вычетов по простым модулям. Одно из устоявшихся названий для функционалов – позиционные характеристики (ПХ) модулярной величины или числовой величины в модулярном коде.

К позиционным характеристикам предъявляются противоречивые требования, ПХ должны [3-6]:

быть универсальной основой большинства (или всех) немодульных операций, включая операции кодирования и декодирования помехозащищенного кода;

обладать меньшей сложностью выполнения немодульных операций по сравнению с другими методами;

эффективно вычисляться, желательно, модульным способом.

Поиск эффективных и универсальных ПХ важен для теоретических основ модулярных вычислительных структур и вычислительных средств на их основе.

В основе алгоритмов выполнения немодульных операций лежат методы вычислений ПХ, сложность которых непосредственно влияет на скорость выполнения немодульных операций в модулярной арифметике. Поиск некоторого компромисса в удовлетворении требований, предъявляемых к ПХ, привел к введению характеристик: ранг, след, нормированный ранг, исходный ранг, ядро числа, модульное ядро, нормированное ядро, квазислед [3-6].

Анализ рассмотренных ПХ показал, что значения модулярной величины по ним не всегда определяются однозначно. Множество введенных ПХ обуславливают необходимость выявления связей между ними, нахождении способов и условий их активного использования, конструирования алгоритмов выполнения немодульных операций на их основе и проведения сравнительной оценки алгоритмической и временной сложности их вычисления.

Сложность вычисления ПХ связана с разрядностью модулярного представления, поэтому, если система многомодульная, то, желательно, найти одну такую ПХ, которая удовлетворяла бы требованиям скорости вычисления, универсальности и удобства использования в машинной арифметике. Наиболее полно этим требованиям отвечает позиционная характеристика, связанная с коэффициентами обобщенной позиционной системы счисления [6-7], которая позволяет организовать эффективное выполнение немодульных операций.

Позиционные характеристики на основе различных форм китайской теоремы остатков и на основе системы со смешанными основаниями разработаны в [1-7]. Область применения первых лежит в маломодульных системах остаточных классов, а вторых – многомодульных.

Противоречие между вычислительной сложностью определения позиционных характеристик и их быстродействием разрешено путем совместного применения китайской теоремы остатков и смешанной системы счисления [1, 2]. При этом методе определения позиционных характеристик ортогональные базисы представляются в смешанной системе счисления, что позволило модифицировать алгоритм Х.Л. Гарнера. Этот подход позволяет вычислять коэффициенты обобщенной позиционной системы счисления за один цикл синхронизации, в то время, как метод Х.Л. Гарнера, эту операцию выполняет итеративно за $2(n-1)$ циклов синхронизации, где n –

число оснований системы остаточных классов [1, 2, 7].

Теорема кодирования Н. Сабо [7] показывает, что нет лучших методов определения позиционных характеристик, при которых не нарушается их однозначность, чем переход чисел из СОК в ОПСС, поскольку величина числа в модулярном представлении существенным образом зависит от всех остатков числа.

Использование китайской теоремы остатков обеспечивает метод перевода чисел из остаточного представления в позиционное. Хотя этот метод в принципе прост, применение его данной форме не эффективно, так как, желательно, чтобы модулярный нейрокompьютер выполнял операции по модулю p_i , где $i = 1, 2, \dots, n$, а не по модулю $P = \prod_{i=1}^n p_i$ как этого требуется по китайской теореме остатков.

В противоположность метод преобразования со смешанными основаниями эффективно можно реализовать в модулярном нейрокompьютере, так как в нем используются только операции по модулю p_i . По этой причине представление чисел со смешанными основаниями представляют особую важность в остаточных вычислениях по следующим причинам:

- система со смешанными основаниями – это позиционная система счисления и, следовательно, в ней легко выполняются операции позиционного типа;

- преобразование из остаточной системы счисления в систему со смешанными основаниями и наоборот в силу их связности осуществляются наиболее быстро в модулярных нейрокompьютерах.

Класс немодульных процедур модулярной компьютерной арифметики, являющихся базисными при разработке вычислительных остаточных алгоритмов, содержит следующие основные операции [1-7]:

1. Вычисление вычета (остатка) от числа, представленного в позиционной системе счисления, с получением результата по модулю p_i , где $i = 1, 2, \dots, n$.
2. Определение знака модулярной величины – результата операции.
3. Сравнение модулярных величин по числовому значению между собой.

4. Определение переполнения за аддитивный или мультипликативный диапазон.
5. Операция деления.
6. Округление числа или результата вычислений.
7. Масштабирование числа или результата вычислений.
8. Расширение модулярной величины на дополнительные основания.
9. Определение ранга числа (r – ранг, это число раз, превышающий машинный диапазон).
10. Операции декодирования модулярного кода, вычисление синдрома, обнаружение, локализация и коррекция ошибок при кодировании помехозащищенным кодом.

Перечисленные операции являются важнейшими для машинной модулярной арифметики, и поэтому возникает необходимость разработки базовых операций и однотипных блоков для их реализации.

Базисные операции модулярной системы – это минимальное множество операций, на которых возможна реализация вычислительных остаточных или вычетных алгоритмов на имеющейся вычислительной базе, а набор операционных блоков, реализующих эти операции называется функциональным элементарным базисом. Для эффективности набор операций и блоков может быть избыточным.

Для эффективной настройки модулярной арифметики на проблемную область необходимо выбрать оптимальный алгоритм базисной операции.

Рассмотрим проблему конструирования алгоритмов выполнения базисных операций и их реализацию в нейросетевом базисе.

Операция вычисления вычета по произвольному модулю является основной базовой операцией в модулярных вычислительных алгоритмах и она дает наибольший вклад в алгоритмическую сложность, поэтому ее алгоритм и нейросетевая реализация должны быть оптимальной на выбранной вычислительной базе. В [1, 2] разработан метод определения вычета и его реализация на основе нейронной сети конечного кольца (НСКК).

Нейроны НСКК выполняют роль арифметических элементов, которые имеют характеристику оператора по модулю, а не типовых нелинейных функций активации, применяемых в обычных нейронных сетях. НСКК является базовой моделью при вычислении вычета и выполнения арифметических операций.

В работах [1, 2] исследованы вопросы ускоренного нахождения модульных и немодульных процедур на основе НСКК, которые выполняются за единицы циклов синхронизации. Благодаря этому, применение модулярной арифметики может дать значительные преимущества не только в таких приложениях, в которых основная доля вычислений приходится на точное умножение, возведение в степень больших чисел в сочетании со сложением и вычитанием, но и в которых довольно часто появляется необходимость в делении либо сравнении и определении знака числа, или при проверке, не “выходит” ли результат за пределы области допустимых значений.

Для повышения эффективности обработки данных в модулярных нейрокомпьютерах разработано операционное устройство в виде мультинейропроцессора [1, 2], состоящее из n -нейропроцессоров, обеспечивающих выполнение операций по модулю P_i ($i = 1, 2, \dots, n$). В качестве нейропроцессоров используются НСКК.

На основе модифицированного алгоритма Х.Л. Гарнера и НСКК разработаны эффективные нейросетевые вычислительные средства реализации основных немодульных базисных функций, которые подтверждены авторскими свидетельствами и патентами на изобретение и реализованы на программируемых логических интегральных схемах фирмы Xilinx типа FPGA [1, 2, 9, 10, 11, 15, 16].

В [1, 2] показано развитие общей теории помехоустойчивого кодирования в избыточной системе остаточных классов, которое является теоретической базой для разработки и проектирования высоконадежных непозиционных нейропроцессоров и комплексов вычислительных систем.

На основе использования разработанных методов и алгоритмов коррекции ошибок предложено для коррекции ошибок в избыточной системе вычетов использовать сети Хопфилда и Хэмминга [10]. Для повышения эффективности коррекции ошибок разработана архитектура адаптивной параллельно-конвейерной нейронной

сети для обнаружения, локализации и исправления ошибок в модулярных нейрокомпьютерных системах, что открывает новые перспективы для разработки отказоустойчивых модулярных вычислительных систем [12].

В [13] исследована структура высокопроизводительного модулярного нейрокомпьютера, функциональные возможности которого определяются нейросетевыми алгоритмами арифметики системы остаточных классов и доказано, что применение модулярного кодирования в нейронных сетях позволяет разрабатывать информационные системы с естественным параллелизмом, которые являются идеальной основой для проектирования нового класса вычислительных структур, позволяющих ставить и решать новые задачи, недоступные для позиционных кодов, такие как, например, построение “живучих”, близких к биологическим, систем. При этом в процессе функционирования информационные системы способны сохранять работоспособность за счет снижения в допустимых пределах каких-либо показателей качества при возникновении отказов и сбоев, а также перераспределять исходные данные между сохранившимися вычислительными ресурсами при деградации системы.

Для решения этой проблемы разработана архитектура нейронной сети оптимизации плана перераспределения нейропроцессоров мультинейропроцессорных систем в реальном масштабе времени. Предложенная идея совмещения организации системы остаточных классов с организацией и функционированием нейронных сетей находит все большее применение [14]. Такой подход обеспечивает реорганизацию самоорганизуемых вычислительных средств в динамике вычислительного процесса, благодаря замечательной особенности системы остаточных классов – наличие обменных операций между надежностью, точностью и быстродействием сети.

Новым и интересным направлением является организация самоустранения ошибок и сбоев вычислительных нейроподобных средств, функционирующих в системе остаточных классов, которые найдут широкое применение в специализированных системах.

Показано, что известные традиционные структуры параллельных информационных систем не приспособлены для решения задач с не распараллеливаемыми алгоритмами, поэтому в полной мере не могут быть использованы их преимущества по быстродействию. Весьма перспективным и плодотворным в практическом плане яв-

ляется распараллеливание на уровне машинных операций при использовании модулярного кодирования.

Широкий диапазон исследований, охвативших вопросы построения модулярных нейрокомпьютеров, привлек внимание многих исследователей к научным разработкам в этом направлении.

Теоретический уровень полученных научных результатов сопоставим с мировым, а по ряду позиций опережает аналогичные отечественные и зарубежные разработки в данной области, например, решении основной проблемы модулярного кодирования, высокоэффективном вычислении позиционных характеристик, разработке модулярных нейронных сетей функционального базиса для выполнения модульных и немодульных операций и другие.

Объединение модулярного принципа представления и обработки данных и нейронных структур в единую вычислительную архитектуру зачастую приводит к свойствам, которых нет у них по отдельности.

В заключении отметим, что отказоустойчивые нейрокомпьютеры, функционирующие в системе остаточных классов, найдут широкое применение в специализированных системах, а также в различного рода расширителях, спецпроцессорах и мультипроцессорных системах со специальной архитектурой. Разработка нового класса модулярных нейрокомпьютеров связана с успехами развития наиболее перспективного направления элементной базы – программируемых логических интегральных схем.

Литература

1. Модулярные параллельные вычислительные структуры нейропроцессорных систем / Червяков Н.И., Сахнюк П.А., Шапошников А.В., Ряднов С.А. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.
2. Нейрокомпьютеры в остаточных классах / Червяков Н.И., Сахнюк П.А., Шапошников А.В., Макоха А.Н. Учебное пособие для вузов – М.: Радиотехника, 2003. – 272 с.
3. Амербаев В.М. Теоретические основы машинной арифметики. – Алма-Ата: Наука, 1976. – 320 с.
4. Инютин С.А. Теория и методы моделирования вычислительных

- структур с параллелизмом машинных операций. – М.: Докторская диссертация, 2002. – 264 с.
5. Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. Машинная арифметика в остаточных классах. – М.: Советское радио, 1968. – 440 с.
 6. Торгашев В.А. Система остаточных классов и надежность ЦВМ. – М.: Сов. радио, 1973. – 120 с.
 7. Кнут Д. Искусство программирования. Т. 2. Получисленные алгоритмы. – М.: Вильянс, 2001. – 832 с.
 8. Галушкин А.И. Теория нейронных сетей. Кн. 1: Учеб. пособие для вузов / Общая ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2000. – 416 с.
 9. Червяков Н.И. Нейронная сеть для расширения кортежа числовой системы вычетов. Решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2003124641/09, 27.01.05.
 10. Червяков Н.И., Шапошников А.В. Нейронная сеть для коррекции ошибок в модулярных нейрокомпьютерах. Решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2003127818/09, 21.01.05.
 11. Червяков Н.И., Горденко Д.В. Нейронная сеть для округления и масштабирования чисел, представленных в системе остаточных классов. Решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2003115586/09, 24.11.04.
 12. Архитектура адаптивной параллельно-конвейерной нейронной сети для коррекции ошибок в модулярных нейрокомпьютерных системах / Червяков Н.И., Галкина В.А., Стрекалов Ю.А., Лавриненко С.В. // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2003. – № 6. – С. 47-60.
 13. Червяков Н.И., Сахнюк П.А., Шапошников А.В., Макоха А.Н. Структура нового специализированного процессора // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2003. – № 6. – С. 3-22.
 14. Червяков Н.И., Сахнюк П.А., Шапошников А.В., Галкина В.А. Нейронный цифровой фильтр с модулярной обработкой данных // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2002. – № 11. – С. 20-28.
 15. Червяков Н.И., Сивоплясов Д.В. Нейронная сеть для преобразо-

вания полиадического кода в код системы остаточных классов. Решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2003115683/09, 10.03.05.

16. Червяков Н.И., Малофей А.О., Рыбальченко М.С., Щелкунова Ю.О. Нейронная сеть для вычисления позиционных характеристик непозиционного кода. Решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2003119016/09, 17.02.05.