УДК 681.3

ПРИМЕНЕНИЕ МОДУЛЯРНОЙ АРИФМЕТИКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

д.т.н. Н.И. Червяков, П.А. Сахнюк, Р.П. Гахов,
А.В. Шапошников, Р.Н. Резеньков*

Предложен подход к повышению отказоустойчивости вычислительных систем на основе нейронных сетей.

Основными преимуществами нейронных сетей (НС) как логического базиса алгоритмов решения задач являются следующие: инвариантность методов синтеза НС от размерности пространства признаков и их размеров; соответствие современным перспективным технологиям; отказоустойчивость в смысле монотонного, а не катастрофического изменения качества решения задачи в зависимости от числа вышедших из строя элементов [1].

Как и всякая логическая структура, НС требует построения алгоритмов диагностики с целью выявления неисправных элементов. Разработаны и описаны следующие алгоритмы: алгоритм локализации отказов в НС; алгоритм построения минимального проверяющего текста для класса отказов типа логических констант на выходах нейронов; алгоритм адаптивной диагностики отказов типа логических констант на входах и выходах нейронов.

Распределение функции, реализуемой НС, по структуре было впервые отмечено Розенблатом, и иллюстрируется на рис. 1. Для исследования таких свойств НС, как постепенная деградация структуры (аналогия с MIMD - архитектурой) и распределения функции по структуре, исследовалась модель параметрической надежности НС [2].

Применение системы остаточных классов (СОК) обеспечивает независимую и параллельную обработку каждого разряда числа, что и определяет специфику организации арифметического устройства. Наиболее важным свойством СОК является возможность обменных операций между точностью, быстродействием и надежностью. Избыточное кодирование в СОК обеспечивает живучесть аппаратуры даже в катастрофических ситуациях, когда поток неисправностей очень велик, но система будет выдавать результаты с меньшей точностью или с несколько замедленным быстродействием, но вполне достаточным для качественного функционирования аппаратуры [3].

Использование нейросетевых методов и алгоритмов оправдано, когда алгоритмы решения задачи легко переносятся на нейросетевую структуру и эффективно реализуются на нейрокомпьютере, например алгоритмы, основанные на использовании свертки. Доказано, что операция типа свертки является основой алгоритмов в арифметике системы остаточных классов, поэтому алгоритмы арифметики СОК легко переносятся на НС.

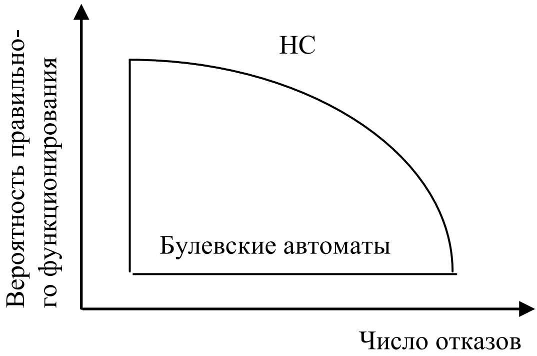

Рис. 1. Отказоустойчивость нейронных сетей

Таким образом, предлагается соединить возможности непозиционных кодов и нейросетевые алгоритмы для получения высокопроизводительных отказоустойчивых систем. Для этого необходимо представить алгоритм решения указанной задачи в нейросетевом логическом базисе, т. е.: разработать вычислительный механизм и структуру нейронной сети, реализующей параллельную арифметику СОК; синтезировать нейросетевые алгоритмы модулярной арифметики при вычислениях в конечных кольцах; разработать иерархичную нейронную сеть и принцип ее деградации; разработать методику построения отказоустойчивых процессоров СОК путем перераспределения обрабатываемых им данных на основе нейронных сетей.

Для синтеза вычислительных структур на основе нейронных сетей, реализующих модулярную арифметику системы остаточных классов, предлагается использовать свойство нейронных алгоритмов, заключающееся в возможности настройки (обучения) входного сигнала, представляющего преобразуемое двоичное число, для получения сравнимого по тому же модулю меньшего малоразрядного числа. Вычислительную процедуру будем выполнять до получения требуемого результата, т.е. до нахождения наименьшего неотрицательного вычета. В [4, 5] рассмотрены вычислительные модели арифметики в конечных кольцах, которые удается эффективно распараллелить и выразить через нейросетевые операции, содержащие минимальное количество итераций настройки (обучения) входного сигнала.

Арифметическое устройство (АУ) специализированного процессора СОК может быть выполнено в виде отдельных трактов по числу оснований и работающих независимо во времени, и могут быть оформлены как типовые элементарные звенья. То есть структура непозиционного процессора имеет модульную организацию по обработке, передаче и хранению информации [3]. В качестве такого типового звена (модуля) может выступать один из узловых нейропроцессоров параллельной нейросетевой вычислительной структуры (например, нейрокомпьютер серии "Геркулес"), который эмулирует нейросетевые алгоритмы модулярной арифметики при вычислениях в конечных кольцах по определенному основанию СОК. Рассматриваемое АУ имеет $\mathbf{p_i}$, $\mathbf{i=1, 2, \ldots, n}$ каналов (модулей), которые предназначены для обработки данных по $\mathbf{k}$ рабочим и $\mathbf{r}$ контрольным основаниям.

Один из подходов к решению проблемы повышения надежности АУ основан на перераспределении его каналов при отказах части рабочих или контрольных каналов. При этом под надежностью АУ понимается его свойство сохранять работоспособность при отказах каналов, возможно при снижении в допустимых пределах некоторых показателей качества функционирования. Эта особенность позволяет реализовать АУ в СОК с постепенной деградацией. В АУ с постепенной деградацией оставшиеся исправные каналы используются для обработки данных. При отказах каналов осуществляется реконфигурация АУ для исключения всех или части каналов. При этом производится новое распределение между работоспособными каналами тех данных, которые АУ в состоянии обработать.

Для разработки методики построения отказоустойчивых процессоров СОК путем перераспределения обрабатываемых им данных необходимо реализовать метод проекций и сокращенную систему остаточных классов. Основой метода проекций, используемого для обнаружения и исправления ошибок, и сокращенной системы остаточных классов, используемой при перераспределении данных в процессоре СОК при отказах каналов, является китайская теорема об остатках, но не с фиксированными, а с изменяемыми в зависимости от значений и числа отказавших оснований СОК величинами ортогональных базисов. Поэтому, основная проблема данной методики заключается в пересчете значений ортогональных базисов СОК.

Установлено, что величины ортогональных базисов СОК и сокращенной, вследствие отказов каналов (оснований) СОК, сравнимы между собой по модулю величины основания. Это позволяет использовать для нахождения величин ортогональных базисов сокращенной СОК разработанные нейросетевые алгоритмы модулярной арифметики при вычислениях в конечных кольцах.

Поэтому, решением указанной проблемы является построение иерархической двухуровневой однородной НС, состоящей из типовых звеньев (модулей), представляющих собой НСА модулярной арифметики при вычислениях в конечных кольцах. На первом уровне вычисляются величины ортогональных базисов сокращенной СОК, на втором – непосредственная реализация китайской теоремы об остатках.

Зависимость показателей АУ от принятого решения при деградации рабочих и контрольных каналов показана в табл.1, в которой приняты следующие обозначения:

Таблица 1

Сравнение показателей арифметического устройства

№	Решение	Деградация рабочих каналов, **к**	Деградация контрольных каналов, **r**	Показатели		
				Производ.	Точность	Достов.
1.	$\mathbf{U_1=U_o^{c}U_p^{c}}$	Нет	Да	0	*	*
		Да	Нет	0	*	*
		Да	Да	0	*	*
2.	$\mathbf{U_2=U_o^{c}U_p^{\text{с-п}}}$	Нет	Да	Решения не имеют смысла		
		Да	Нет			
		Да	Да			
3.	$\mathbf{U_3=U_o^{o}U_p^{c}}$	Нет	Да	1	*	0
		Да	Нет	1	0	1
		Да	Да	1	0	*
4.	$\mathbf{U_4=U_o^{o}U_p^{\text{с-п}}}$	Нет	Да	1	0	1
		Да	Нет	*	*	*
		Да	Нет	1	0	*
5.	$\mathbf{U_5=U_o^{\text{с-о}}U_p^{c}}$	Нет	Да	0	*	0
		Да	Нет	*	0	1
		Да	Да	*	0	0
6.	$\mathbf{U_6=U_o^{\text{с-о}}U_p^{\text{с-п}}}$	Нет	Да	0	0	0
		Да	Нет	0	0	1
		Да	Да	0	0	*

0 – уменьшение показателя данного вида, **1** – его увеличение, а символ * означает возможность увеличения, уменьшения или сохранения данного показателя;

$\mathbf{S_y}$ – состояние распределения множества данных между каналами в момент отказа части каналов;

$\mathbf{A_y^{o}}$ – множество всех собственных данных отказавших каналов для состояния S_y;

$\mathbf{A_y^{p}}$ – множество всех собственных данных работоспособных каналов для состояния $\mathbf{S_y}$;

$\mathbf{U_o^c}$ – все данные множества $\mathbf{A_y^o}$ сохраняются в АУ;

$\mathbf{U_o^o}$ – все данные множества $\mathbf{A_y^o}$ отбрасываются;

$\mathbf{U_o^{c\text{-}o}}$ – часть данных множества $\mathbf{A_y^o}$ сохраняются, а часть отбрасывается;

$\mathbf{U_p^c}$ – все данные множества $\mathbf{A_y^p}$ сохраняются и продолжают выполнять свою роль;

$\mathbf{U_p^{c\text{-}п}}$ – все данные множества $\mathbf{A_y^p}$ сохраняются в АУ, часть данных продолжает выполнять свою роль, а часть - перераспределяется.

Произведен расчет вероятности безотказной работы рассматриваемой системы при различном допустимом числе отказавших каналов. Сравнение по данному показателю процессоров в СОК на основе НС и позиционной системе счисления позволяет сделать следующие выводы.

1. По сравнению с троированными позиционными процессорами процессоры в СОК на основе НС позволяют добиться преимуществ в надежности при существенном выигрыше в избыточных аппаратурных затратах, что объясняется наличием эффекта поэлементного скользящего резервирования.

2. Если допустить некоторое снижение точности из-за уменьшения количества работающих каналов, то при отказе каналов их можно просто удалять из процессора. Таким образом, надежность процессора в СОК окажется выше не только по сравнению с позиционным процессором мажоритарной структуры, но и по сравнению с мультипроцессорными избыточными системами, в которых отказ более r подчиненных избыточных процессоров рассматривается как отказ всей системы. Это объясняется наличием обменных операций между точностью, быстродействием и надежностью в СОК. Таким образом, вопрос только в том, какое число отказавших каналов в СОК считать допустимым.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галушкин А.И. Современные направления развития нейрокомпьютеров в России // Зарубежная радиоэлектроника. – 1998. – № 1. – С. 3 - 17.

2. Галушкин А.И. Итоги развития теории многослойных нейронных сетей (1965-1995 гг.) в работах Научного центра нейрокомпьютеров и ее перспективы // Нейрокомпьютер. – 1996. – № 1,2.

3. Червяков Н.И., Швецов Н.И., Хлевной С.Н. Надежность и живучесть систем управления и связи, функционирующих в СОК. – Ставрополь : СВВИУС, 1986.

4. Червяков Н.И., Сахнюк П.А. Применение нейроматематики для реализации модулярной арифметики при вычислениях в конечных кольцах // Нейрокомпьютер. – 1999. – № 14. – С. 12 - 25.

5. Zhang D.Parallel VLSI neural system designs. – Springer, 1998. – 257 p.