

УДК 681.142

А.А. Сиора

ЗАО НПО «Радий», Кировоград

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДУЛЯРНОЙ АРИФМЕТИКИ

В статье рассмотрена проблема создания отказоустойчивых систем обработки информации и управления (СОИУ) критическими объектами на основе диверсности выбора системы счисления. Показано, что использования кодов модулярной арифметики позволяет существенно повысить отказоустойчивость СОИУ без снижения производительности обработки информации.

диверсность, отказоустойчивость, система счисления, модулярная арифметика

Введение

Эффективность функционирования средств, систем и комплексов критического применения (на-

пример, АЭС) в значительной степени зависит от надежности, отказоустойчивости и живучести системы обработки информации и управления (СОИУ)

критическими объектами реального времени. Поэтому задача повышения надежности СОИУ комплексов критического применения является весьма важной и актуальной.

Анализ публикаций по данной теме. Существующие методы повышения надежности средств и систем обработки цифровой информации основываются на введении в СОИУ различных видов избыточности (структурной, информационной и пр.) после того как система счисления (СС) определена [1 – 3]. В настоящее время при проектировании СОИУ комплексов критического применения, как правило, используют принцип многоверсионности или диверсности, предполагающий параллельное или последовательное использование одновременно нескольких различных версий (одну, две или даже три версии) [4]. Очевидно, что в любом случае при проектировании СОИУ не учитывается как степень избыточности самой СС, так и влияние избыточности СС на надежность СОИУ.

Цель статьи – разработать концепцию многоверсионной технологии разработки СОИУ путем использования избыточности модулярной системы счисления – модулярной арифметики (МА).

Основная часть

При традиционном подходе к созданию СОИУ критическими объектами реального времени к СС, которая используется при представлении операндов А, предъявляются следующие основные требования:

- простота технической реализации представления кодовых слов при использовании существующей элементной базы;
- единственность представления кодовых слов в заданном числовом диапазоне $[0, M]$;
- простота аппаратной и программной реализации методов и алгоритмов выполнения необходимых операций в заданной СС;
- выполнение условия «экономичности» СС, которая характеризует первичную избыточность СОИ.

В [5] применительно к средствам переработки цифровой информации введены частные понятия первичной и вторичной структурной избыточности СОИУ.

Определение 1. Первичной (структурной, информационной, функциональной) избыточностью (ПИ) СОИУ будем называть существующую или искусственно вводимую избыточность данного вида, обусловленную природой создания или методом искусственного образования применяемой СС.

Определение 2. Вторичной (структурной, информационной, функциональной, временной и нагрузочной) избыточностью (ВИ) будем называть избыточность, искусственно вводимую в СОИУ для улучшения ее отдельных характеристик (надежности, достоверности, помехоустойчивости, отказоустойчивости пр.) после того, как СС окончательно выбрана.

Из второго определения видно, что ВИ – это избыточность, обусловленная применением традиционных методов резервирования, широко исполь-

зуемых в технических системах различного назначения для улучшения их характеристик. Первичная избыточность для СОИУ совпадает с понятием естественной избыточности (ЕИ) систем и средств переработки информации, а ВИ – с понятием искусственной избыточности (ИИ).

Необходимость введения и использования ВИ обусловлена требованиями, предъявляемыми к характеристикам, создаваемых СОИУ. Наряду с вышперечисленными требованиями к СС отметим, что выбранная и используемая система счисления сама существенно влияет на следующие характеристики СОИУ:

- структуру (архитектуру) СОИУ;
- принципы переработки информации (в большей степени на методы и алгоритмы выполнения арифметических операций);
- требования, предъявляемые к использованию новой элементной базы;
- системную и пользовательскую производительность вычислительных структур;
- надежность, живучесть, достоверность и отказоустойчивость СОИУ;
- эксплуатационные характеристики и показатели СОИУ и пр.

Очевидно, количественно объем $V_{ПИ}$ оборудования СОИУ, обусловленный наличием ПИ, несколько меньше объема $V_{ЕИ}$ оборудования при наличии ЕИ. Объем $V_{ЕИ}$ дополнительного оборудования, определенный наличием ВИ, полностью совпадает с объемом оборудования $V_{ИИ}$, обусловленного наличием ИИ. Анализ влияния СС на структуру и основные характеристики СОИУ показал, что вполне корректно считать, что $V_{ПИ} \approx V_{ЕИ}$ [6 – 8].

При традиционном подходе к выбору основания позиционной системы счисления (ПСС) СОИУ в первую очередь необходимо обеспечить следующее условие

$$V_{ПИ} = \min. \quad (1)$$

Данный (1) подход к выбору СС обусловлен требованиями обеспечения минимального количества оборудования СОИУ. Рассмотрим общий подход к решению задачи нахождения оптимального основания ПСС СОИУ, исходя из условия (1).

Произвольное число N в ПСС можно представить разными основаниями P. При этом длина n (количество n P-х разрядов в записи числа N) тоже будет разной. Покажем это на примере двух оснований ПСС P_1 и P_2 . При этом количество n_1 и n_2 разрядов в представлении числа N будет разным. Максимальное количество N_{1max} и N_{2max} возможных чисел будет равно, соответственно, $N_{1max} = P_1^{n_1}$ и $N_{2max} = P_2^{n_2}$. Учитывая, что $N_{1max} = N_{2max}$, имеем следующие соотношения:

$$P_1^{n_1} = P_2^{n_2} \quad (2)$$

или $n_1 \log_a P_1 = n_2 \log_a P_2; \quad \frac{n_1}{n_2} = \frac{\log_a P_2}{\log_a P_1}$.

Соотношения (2) можно использовать при оценке количества n P -х разрядов числа N в ПСС с основанием P .

Каждый m -й ($m = 1, 2, \dots, n$) разряд с n P -х разрядов числа N содержит P с общего количества $K = \{K_i^{(j)}\}$ символов, где K – множество символов, посредством которых формируется общий вид числа в данной P -й ПСС ($j = \overline{1, n}; i = \overline{0, q-1}$).

Так, как каждый с n P -х разрядов в записи числа N может принимать P значений, т.е. $K_i^{(j)} \in K$ ($j = \text{const}; i = \overline{1, P-1}$), то количество n разрядов в представлении числа N равняется $n = K/P$. В этом случае максимальное число $N_{\max}^{(P)}$ возможных комбинаций равно значению

$$N_{\max}^{(P)} = P^n = P^{K/P}.$$

С другой стороны

$$K(P) = P \cdot n = P \cdot \log_P N,$$

где $n = \log_P N$.

Используя метод исследования функций на экстремум, найдем численное значение основания “оптимальной” ПСС.

Пусть имеется K знаков. Тогда возьмем первую производную от функции $f(P) = P^{K/P}$ и сравним ее с нулем, т.е. $[f(P)]' = (P^{K/P})' = 0$. Получаем:

$$(K/P)P^{K/P-1} + P^{K/P} (K/P)' \ln P = 0;$$

$$(K/P)P^{K/P-1} - P^{K/P} K P^{-2} \ln P = 0;$$

$$P^{K/P-1} (1 - P P^{-1} \ln P) = 0.$$

В этом случае имеем, $P^{K/P-1} = 0$ либо $1 - \ln P = 0$. Очевидно, что $1 - \ln P = 0$, т.е. основание P оптимальной (“оптимальной”) ПСС равняется значению $e \approx 2,7$.

Рассмотрим другую функцию и исследуем ее на экстремум. Возьмем первую производную от функции $F(P) = P \log_P N$ и приравняем ее к нулю. Получим:

$$[F(P)]' = (P \log_P N)' = 0,$$

$$[F(P)]' = (P \log_P N)' = [P(\log_N P)^{-1}]' = 0;$$

$$1(\log_N P)^{-1} + P(-1)(\log_N P)^{-2} \frac{1}{P} \log_N e = 0$$

$$(\log_N P)^{-1} - P(\log_N P)^{-2} \frac{1}{P} \log_N e = 0;$$

$$(\log_N P)^{-1} [1 - (\log_N P)^{-1} \log_N e] = 0.$$

В этом случае или $(\log_N P)^{-1} = 0$, или $1 - (\log_N P)^{-1} \log_N e = 0$.

Если $(\log_N P)^{-1} = \log_P N = 0$, т.е. $\log_P N = 0$

или $N = P^0 = 1$, Последнее выражение противоречит начальным условиям задачи. Тогда

$$1 - (\log_N P)^{-1} \log_N e = 0; \frac{\log_N e}{\log_N P} = 1; \log_e P = 1; P = e.$$

Полученное значение $P = e \approx 2,7$ подтверждает вывод о том, что оптимальной является троичная ($P = 3$) ПСС.

Однако выполнение условия (1) не всегда правомерно при разработке СОИУ, когда при проектировании априорно возникает задача улучшения надежностных и других характеристик за счет использования избыточности СС. Вполне возможно, что вариант построения СОИУ, основанный на выполнении условия (1), вообще не целесообразен. Эффективность использования избыточности СС для повышения надежности СОИУ ярко проявляется при использовании, например, модулярной арифметики – непоозиционной системы счисления в остаточных классах (СОК).

Действительно, безизбыточная СОИУ в МА содержит несколько большее (на $\approx (15 - 20)\%$, в зависимости от длины машинного слова) количество оборудования $V_{\text{ПИ}}$, чем СОИУ в ПСС для заданной одинаковой длине разрядной сетки, и при одних и тех же предъявляемых к СОИУ требованиях, без учета введения ВИ. Однако, как показали теоретические исследования и практические расчеты, для достижения заданного уровня надежности (отказоустойчивости) СОИУ в МА требуется гораздо меньший (на $(4 - 57)\%$, в зависимости от величины разрядной сетки) дополнительный объем $V_{\text{ВИ}}$ оборудования, чем для СОИУ в ПСС. Расчеты показали, что в МА суммарная структурная избыточность $V_{\text{СИ}} = V_{\text{ПИ}} + V_{\text{ВИ}}$ СОИУ, обеспечивающая, например, заданный уровень $H(t)$ отказоустойчивости, значительно меньше, чем для дублированных и троированных мажоритарных вычислительных структур, широко используемых в ПСС, т.е. обеспечивается условие

$$\begin{cases} H_{\text{СОК}}(t) \geq H_{\text{ПСС}}(t)[t = \text{const}]; \\ V_{\text{СИ-СОК}} < V_{\text{СИ-ПСС}}. \end{cases} \quad (3)$$

Выражение (4), определяет условие обратное условию (3), т.е. при одинаковом количестве оборудования $V_{\text{СИ}}$ СОК обеспечивает более высокое значение отказоустойчивости, т.е.

$$\begin{cases} H_{\text{СОК}}(t) > H_{\text{ПИ}}(t)[t = \text{const}]; \\ V_{\text{СИ-СОК}} \approx V_{\text{СИ-ПСС}}. \end{cases} \quad (4)$$

Использование основных свойств МА поясняет смысл выражений (3) и (4) следующим образом:

– первичная избыточность в МА заметно и существенно положительно (с точки зрения улучшения надежностных характеристик СОИУ) проявляет себя только при наличии ВИ;

– в МА существует значительное взаимное положительное влияние отдельных видов резервирования, предусмотренных для повышения отказоустойчивости СОИУ.

Действительно, в ПСС, в отличие от СОК, применение одного вида резервирования не всегда обуславливает одновременное наличие и других видов резервирования. Отметим, что это не свидетельствует об отсутствии других видов избыточности. Так, применение информационного резервирования (введение информационной избыточности) для повышения достоверности вычислений в ПСС вызывает наличие структурной ВИ. Таким образом, применение необходимого вида резервирования в ПСС обязательно сопровождается наличием неиспользуемой («вредной») структурной избыточности, что, в конечном итоге, негативно влияет на технические, стоимостные и другие характеристики СОИУ.

В силу влияния основных свойств (независимость, равноправность и малоразрядность остатков $a_i \equiv A \pmod{m_i}$, $i = \overline{1, n}$, представляющих операнд A) МА на структуру и принципы функционирования СОИУ, структурное, информационное и функциональное резервирование оказывают друг на друга одновременное взаимное положительное влияние. Например, введение вторичной структурной избыточности (применение структурного резервирования) посредством дополнительного использования k резервных вычислительных трактов, к имеющимся n основным, приводит к проявлению как информационного, так и функционального резервирования. Первое из них связано с информационной избыточностью, обусловленной наличием избыточных кодовых слов и реализуемой путем использования дополнительной информации, получаемой с выходов k резервных вычислительных трактов. Относительно функционального (нагрузочного) резервирования отметим, что, в соответствии со свойствами МА, один работоспособный вычислительный тракт СОИУ, функционирующий в СОК по основанию m_j

(при соблюдении условия $m_j \geq \prod_{p=1}^r m_{i_p}$ (5)), может

взять на себя вычислительные функции до g одновременно отказавших вычислительных трактов.

Приведенный пример показывает, что в МА, в отличие от ПСС, введенная ВИ максимально полно используется для улучшения характеристик СОИУ. Действительно, использование любого вида резервирования в конечном итоге приводит к структурной (аппаратной) избыточности, которая в МА (в отличие от ПСС) используется для организации одновременно нескольких различных видов резервирования, что повышает коэффициент использования вводимого избыточного и общего суммарного оборудования СОИУ.

Данная организация одновременного использования различных видов резервирования за счет введения структурной избыточности характерна для структурно-функциональной организации деятельности мозга человека и может обеспечить сверхвысокую надежность, отказоустойчивость и живучесть вычислительных структур, а также большую скорость обработки огромных массивов информации. В

этом аспекте деятельность человеческого мозга близка к голографическим принципам обработки информации, что, в свою очередь, согласуется с методами и алгоритмами переработки информации в МА.

Исходя из вышеизложенного, при создании (проектировании) СОИУ необходимо учитывать не только влияние СС на объем $V_{\text{пи}}$, а в первую очередь оценивать значение $V_{\text{си}}$ (при учете влияния СС на остальные характеристики СОИУ), т.е. СС целесообразно выбирать с учетом ее дальнейшего влияния на выбор методов улучшения необходимых характеристик СОИУ. По-видимому, при построении СОИУ можно отказаться от традиционного критерия «экономичности» выбора позиционных СС по критерию (1), при котором необходимо обеспечить выполнение условия

$$f(q) = q \cdot \log_q N = \min,$$

где q – основание ПСС; N – длина машинного слова (разрядная сетка СОИУ).

Как показали вышеприведенные исследования, с точки зрения обеспечения заданного уровня надежности (отказоустойчивости) СОИУ, выбор СС целесообразно проводить по критерию

$$V_{\text{си}} = \min, \quad (6)$$

а не по критерию (1), при заданном уровне требований к отдельным характеристикам СОИУ. По-видимому, данная задача близка к задаче оптимального резервирования в теории надежности.

Выводы

В данной статье впервые рассмотрено концепцию создание отказоустойчивых систем обработки информации и управления критическими объектами на основе использования избыточности модулярной арифметики. В статье показано, что использование непозиционной системы счисления СОК позволяет при проектировании СОИУ, в отличие от двоичной ПСС, организовать одновременно несколько вариантов использования принципа диверсности.

Первый вариант. Выбор позиционной или непозиционной систем счисления.

Второй вариант. Диверсность на уровне выбора типа непозиционной системы счисления: СОК с взаимно простыми основаниями (R-коды); СОК с взаимно непростыми основаниями (L-коды).

Третий вариант. Диверсность на этапе выбора совокупности оснований $\{m_i\}$ МА, которая обеспечивает заданный числовой диапазон $[0 - M]$ обработки информации СОИУ. Т.е. для обеспечения обработки информации в заданной разрядной сетке $[0 - M]$ можно использовать различную совокупность $\{m_i\}$ модулей, где $M = \prod_{i=1}^n m_i$, а n – количество оснований МА.

Четвертый вариант. Система счисления в МА дает возможность использования диверсности реализации арифметических операций. Действительно, если в двоичной ПСС реализация арифметических операций основывается только на использовании двоичных сумматоров, то в МА, благодаря исполь-

зованию ее свойств, модульные операции реализуются на основе четырех принципов:

– сумматорный принцип (на базе малоразрядных двоичных сумматоров [1]);

– табличный принцип (на основе использования ПЗУ [1, 6]);

– прямой логический принцип реализации арифметических операций, основанный на описании модульных операций на уровне систем переключательных функций, посредством которых формируются значения двоичных разрядов результирующих вычетов (в качестве элементной базы для технической реализации данного принципа целесообразно использовать систолические и программируемые логические матрицы, а также ПЛИС [1, 2]);

– принцип кольцевого сдвига, основанный на использовании кольцевых регистров сдвига [6].

Пятый вариант. Диверсность на уровне выбора структуры СОИУ: применение принципов пассивной или активной отказоустойчивости.

Таким образом, использование МА дает широкую возможность применить многоверсионную технологию разработки СОИУ критических комплексов.

Список литературы

1. Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. *Машинная арифметика в остаточных классах*. – М.: Сов. радио, 1968. – 440 с.

2. *Основи надійності цифрових систем: Підручник* / В.С. Харченко, В.Я. Жихарев, В.М. Ілюшко, В.А. Краснобаєв, П.М. Куликов, І.В. Лисенко, М.В. Нечипорук, Г.М. Тимонькін. – Х.: НАКУ «ХАІ», 2004. – 542 с.

3. ДСТУ 2606-94. *Средства вычислительной техники. Отказоустойчивость и живучесть. Общие технические требования*.

4. Харченко В.С., Пискачева И.В., Скляр В.В. *Метрики диверсности программных средств: классификация, анализ и применение для оценки надежности и безопасности компьютерных систем управления* // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. – 2001. – Вып. 9. – С. 194-214.

5. Краснобаев В.А. *Надежностная модель ЭВМ в системе остаточных классов* // *Электрон. моделирование*. – 1985. – № 4. – С. 44-46.

6. Краснобаев В.А. *Методы повышения надежности специализированных ЭВМ систем и средств связи*. – Х.: ХВУ, 1990. – 173 с.

7. Жихарев В.Я., Ілюшко Я.В., Краснобаєв В.А. *Влияние системы счисления на надежность ЭВМ* // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2004. – № 1 (5). – С. 98-104.

8. Краснобаев В.А. *Влияние формы кодирования операндов на надежность систем обработки цифровой информации* // *Труды Юбилейной Международной научно-технической конференции “50 лет модулярной арифметике”*, Россия, Москва, Зеленоград, 23-25 ноября 2005. – М.: МИЭТ. – 2005. – С. 350-361.

Поступила в редколлегию 12.11.2007

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