УДК 681.142.01

ОБНАРУЖЕНИЕ ОШИБОК В МОДУЛЯРНОМ АРИФМЕТИЧЕСКОМ УСТРОЙСТВЕ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОГО ОСНОВАНИЯ

к.т.н. Л.А. Овчаренко, С.С. Чекалин
(представил д.т.н. В.П. Ирхин)

Предложен алгоритм обнаружения ошибок в модулярном арифметическом устройстве путем сравнения остатка по дополнительному (контрольному) основанию с расчетным значением остатка по этому основанию, полученному из остатков исходной системы оснований с применением только модульных арифметических операций.

Высокое быстродействие выполнения арифметических операций в сочетании с возможностью контроля ошибок в работе арифметических устройств (АУ) является неотъемлемым признаком наиболее перспективных современных систем цифровой обработки сигналов (ЦОС) [1]. В этой связи в ходе проектирования АУ аппаратных средств ЦОС весьма эффективно применение модулярной системы счисления (МСС), которая за счет присущего ей внутреннего параллелизма позволяет, во первых, реализовать вычислительные структуры максимального быстродействия, и, во-вторых, обнаруживать ошибки в ходе вычислительного процесса [1, 2].

Один из способов обнаружения ошибок заключается в расширении диапазона МСС за счет включения в модулярное АУ контрольного блока, выполняющего параллельно с основными блоками арифметические операции [2]. В случае искажения цифры по любому из оснований (в том числе и контрольному), происходит выход результата арифметической операции за пределы диапазона представления чисел основной системы оснований, а обнаружение ошибки, соответственно, осуществляется путем сравнения остатка по дополнительному (контрольному) основанию с расчетным значением остатка по этому основанию, полученному на основании остатков исходной системы оснований.

Однако в известных алгоритмах расчета значения остатка по дополнительному основанию используются "неудобные" в модулярной арифметике немодульные операции, что в конечном итоге приводит к существенному снижению быстродействия АУ в целом [2].

Цель статьи – предложить алгоритм определения остатка по дополнительному основанию, содержащий только модульные арифметические операции.

Постановка задачи. Пусть задана система оснований $\mathbf{m_1}$, $\mathbf{m_2}$, …, $\mathbf{m_n}$ с диапазоном $\mathbf{M}=\prod_{i=1}^{n}\mathbf{m_i}$, и в этой системе представлено число

$$\mathbf{A}=(\alpha_1,\alpha_2,\ldots,\alpha_n), \tag{1}$$

где $\mathbf{0}\le\mathbf{A}<\mathbf{M}$;

$$\alpha_i=\mathbf{A}-\left[\frac{\mathbf{A}}{\mathbf{m_i}}\right]\cdot\mathbf{m_i}=|\mathbf{A}|_{\mathbf{m_i}},\quad \mathbf{i}=\overline{\mathbf{1,n}}; \tag{2}$$

$[\bullet]$ – целая часть числа.

Введем дополнительное основание $\mathbf{m_{n+1}}$, такое, что:

$$\mathbf{m_i}<\mathbf{m_{n+1}},\ \mathbf{i}=\overline{\mathbf{1,n}};$$

$$|\mathbf{M}|_{\mathbf{m_{n+1}}}\equiv\mathbf{1}. \tag{3}$$

Соответственно, диапазон расширенной системы будет в $\mathbf{m_{n+1}}$ раз больше диапазона исходной системы

$$\mathbf{M}^*=\mathbf{M}\cdot\mathbf{m_{n+1}}, \tag{4}$$

а число **A** представится остатками

$$\mathbf{A}=(\alpha_1,\alpha_2,\ldots,\alpha_n,\alpha_{n+1}). \tag{5}$$

Требуется по известным цифрам $\alpha_i\ \left(\mathbf{i}=\overline{\mathbf{1,n}}\right)$ исходной системы оснований определить значение $\alpha_{n+1}=|\mathbf{A}|_{\mathbf{m_{n+1}}}$ в расширенной системе.

Решение задачи. Рассмотрим расширенное представление числа $\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}}$, $\mathbf{0}\le\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}}<\mathbf{M}^*$. В модулярном коде такого числа остаток по основанию $\mathbf{m_{n+1}}$ равен 0, т.е.

$$\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}}=(\gamma_1,\gamma_2,\ldots,\gamma_n,\mathbf{0}), \tag{6}$$

где $\gamma_i=|\alpha_i\cdot\mathbf{m_{n+1}}|_{\mathbf{m_i}},\ \mathbf{i}=\overline{\mathbf{1,n}}$.

Из представления числа $\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}}$ в позиционном коде, полученном на основании китайской теоремы об остатках [1, 2]:

$$\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}}=\sum_{i=1}^{n}\gamma_i\cdot\mu_i^*\cdot\mathbf{M}_i^*-\mathbf{R}\left(\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}}\right)\cdot\mathbf{M}^*, \tag{7}$$

видно, что

$$\mathbf{A}=\sum_{i=1}^{n}\gamma_i\cdot\mu_i^*\cdot\mathbf{M}_i-\mathbf{R}\left(\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}}\right)\cdot\mathbf{M}, \tag{8}$$

где $\mathbf{M}_i^*=\mathbf{M}^*/\mathbf{m_i}$; $\mathbf{M}_i=\mathbf{M}/\mathbf{m_i}$; μ_i^* – константа, определяемая из решения сравнения $\left|\mu_i^*\cdot\mathbf{M}_i^*\right|_{\mathbf{m_i}}\equiv\mathbf{1},\ \mathbf{i}=\overline{\mathbf{1,n+1}}$; $\mathbf{R}\left(\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}}\right)$ – ранг числа

$\mathbf{A \cdot m_{n+1}}$, показывающий во сколько раз диапазон расширенной системы $\mathbf{M^*}$ был превзойден при переходе из модулярного кода в позиционный код.

Соответственно, на основании (3) и (8) получаем

$$\alpha_{n+1} = |A|_{m_{n+1}} = \left| \sum_{i=1}^{n} \left| \gamma_i \cdot \mu_i^* \cdot M_i \right|_{m_{n+1}} - \left| R\left(A \cdot m_{n+1}\right) \right|_{m_{n+1}} \right|_{m_{n+1}} . \quad (9)$$

Один из способов оценки значения ранга $\mathbf{R\left(A \cdot m_{n+1}\right)}$ в (9) базируется на конструировании числа из минимальных псевдоортогональных компонент [2].

Минимальным псевдоортогональным числом $\mathbf{P(\gamma_i)}$ называется число, модулярный код которого в расширенной системе оснований равен

$$\mathbf{P(\gamma_i) = (0,\ldots 0, \gamma_i, 0, \ldots 0, S(\gamma_i)),} \quad \mathbf{i = \overline{1,n}}, \quad (10)$$

его значение лежит в диапазоне

$$\mathbf{0 \le P(\gamma_i) < M}, \quad (11)$$

а ранг вычисляется по формуле

$$\mathbf{R\left(P(\gamma_i)\right) = \left[\frac{\gamma_i \cdot \mu_i^* \cdot M_i^* + S(\gamma_i) \cdot M_{n+1}^*}{M^*} \right]}, \quad (12)$$

где $\mathbf{S(\gamma_i)}$ – остаток числа $\mathbf{P(\gamma_i)}$ по основанию $\mathbf{m_{n+1}}$:

$$\mathbf{S(\gamma_i) = \left| \left| \gamma_i \cdot \mu_i^* \cdot M_i^* \right|_M \right|_{m_{n+1}}} . \quad (13)$$

Суммируя минимальные псевдоортогональные компоненты $\mathbf{P(\gamma_i)}$ (10), получим число

$$\mathbf{P\left(A \cdot m_{n+1}\right) = \sum_{i=1}^{n} P(\gamma_i) = \left(\gamma_1, \gamma_2, \ldots, \gamma_n, \left| \sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i) \right|_{m_{n+1}} \right)}, \quad (14)$$

модулярный код которого в общем случае отличается от кода числа $\mathbf{A \cdot m_{n+1}}$ (6) цифрой по дополнительному основанию.

Ранг числа $\mathbf{P\left(A \cdot m_{n+1}\right)}$ определяется через ранги чисел $\mathbf{P\left(\gamma_i\right)}$ как [2]:

$$\mathbf{R\left(P\left(A \cdot m_{n+1}\right)\right) = \sum_{i=1}^{n} R\left(P(\gamma_i)\right) - \left[\sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i) \Big/ m_{n+1} \right]}. \quad (15)$$

Если $\mathbf{n < m_{n+1}}$, то с учетом (11) число $\mathbf{P\left(A \cdot m_{n+1}\right)}$ всегда лежит в диапазоне

$$\mathbf{0 \le P\left(A \cdot m_{n+1}\right) < n \cdot M < M^*}. \quad (16)$$

В этом случае при конструировании числа $\mathbf{P}(\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}})$ из минимальных псевдоортогональных компонент нет выхода за пределы диапазона $[\mathbf{0},\ \mathbf{M}^{*})$. Поэтому расчетный ранг числа $\mathbf{P}(\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}})$ (15) всегда совпадает с истинным значением ранга [2]. Согласно теореме о рангах элементов числовых последовательностей [2] при $|\mathbf{M}|_{\mathbf{m_{n+1}}}\equiv\mathbf{1}$ ранг $\mathbf{R}\left(\mathbf{P}(\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}})\right)$ числа $\mathbf{P}(\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}})=\left(\gamma_1,\gamma_2,\ldots,\gamma_n,\left|\sum_{i=1}^{n}\mathbf{S}(\gamma_i)\right|_{\mathbf{m_{n+1}}}\right)$ равен рангу $\mathbf{R}\left(|\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}}|_{\mathbf{M}}\right)$ числа $|\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}}|_{\mathbf{M}}$, если $\left|\sum_{i=1}^{n}\mathbf{S}(\gamma_i)\right|_{\mathbf{m_{n+1}}}\geq\left||\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}}|_{\mathbf{M}}\right|_{\mathbf{m_{n+1}}}$, а в противном случае $\mathbf{R}\left(|\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}}|_{\mathbf{M}}\right)=\mathbf{R}\left(\mathbf{P}(\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}})\right)+\mathbf{1}$.

Лемма. Если $\mathbf{0}\leq\mathbf{A}<\mathbf{M}$ и $|\mathbf{M}|_{\mathbf{m_{n+1}}}\equiv\mathbf{1}$, то $\left||\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}}|_{\mathbf{M}}\right|_{\mathbf{m_{n+1}}}=\mathbf{0}$ при $\mathbf{0}\leq\mathbf{A}<\dfrac{\mathbf{M}-\mathbf{1}}{\mathbf{m_{n+1}}}$ и $\left||\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}}|_{\mathbf{M}}\right|_{\mathbf{m_{n+1}}}=\mathbf{m_{n+1}}-\left\lfloor\dfrac{\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}}}{\mathbf{M}}\right\rfloor$ при других $\mathbf{A}$.

Доказательство леммы вытекает из определения модуля числа (2).

Поскольку при $|\mathbf{M}|_{\mathbf{m_{n+1}}}\equiv\mathbf{1}$ числа $(\gamma_1,\gamma_2,\ldots,\gamma_n,\mathbf{x})$ и $\left(\gamma_1,\gamma_2,\ldots,\gamma_n,|\mathbf{x}+\mathbf{1}|_{\mathbf{m_{n+1}}}\right)$, $\mathbf{x}=\overline{\mathbf{0},\mathbf{m_{n+1}}-\mathbf{1}}$, находятся в соседних интервалах $[(\mathbf{j}-\mathbf{1})\cdot\mathbf{M},\mathbf{j}\cdot\mathbf{M})$ и $[\mathbf{j}\cdot\mathbf{M},(\mathbf{j}+\mathbf{1})\cdot\mathbf{M})$, $\mathbf{j}=\mathbf{1},\mathbf{2},\ldots,\mathbf{m_{n+1}}$ [2], из утверждения леммы и неравенства (16) могут быть сформулированы следующие следствия:

Следствие 1. Если $\mathbf{0}\leq\mathbf{A}<\dfrac{\mathbf{M}-\mathbf{1}}{\mathbf{m_{n+1}}}$ и $\mathbf{n}<\mathbf{m_{т+1}}$, то

$$\left|\sum_{i=1}^{n}\mathbf{S}(\gamma_i)\right|_{\mathbf{m_{n+1}}}\geq\left||\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}}|_{\mathbf{M}}\right|_{\mathbf{m_{n+1}}}=\mathbf{0}.$$

Следствие 2. Если $\dfrac{\mathbf{M}-\mathbf{1}}{\mathbf{m_{n+1}}}\leq\mathbf{A}<\dfrac{(\mathbf{n}-\mathbf{1})\cdot(\mathbf{M}-\mathbf{1})}{\mathbf{m_{n+1}}}$ и $\mathbf{n}<\mathbf{m_{т+1}}$, то

$\left|\sum_{i=1}^{n}\mathbf{S}(\gamma_i)\right|_{\mathbf{m_{n+1}}}\geq\left||\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}}|_{\mathbf{M}}\right|_{\mathbf{m_{n+1}}}>\mathbf{0}$ или $\mathbf{0}\leq\left|\sum_{i=1}^{n}\mathbf{S}(\gamma_i)\right|_{\mathbf{m_{n+1}}}<\left||\mathbf{A}\cdot\mathbf{m_{n+1}}|_{\mathbf{M}}\right|_{\mathbf{m_{n+1}}}$.

Следствие 3. Если $\dfrac{(\mathbf{n}-\mathbf{1})\cdot(\mathbf{M}-\mathbf{1})}{\mathbf{m_{n+1}}}\leq\mathbf{A}<\mathbf{M}$ и $\mathbf{n}<\mathbf{m_{т+1}}$, то

$$\left|\sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i)\right|_{m_{n+1}} \geq \left|\left|A \cdot m_{n+1}\right|_M\right|_{m_{n+1}} > 0$$, либо $$\left|\sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i)\right|_{m_{n+1}} = 0$$.

Теорема. Если задана система оснований $m_1, m_2, \ldots, m_n$ с диапазоном $M = \prod_{i=1}^{n} m_i$, в которой число $A\,(0 \leq A < M)$ представляется остатками $(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n)$, и введено дополнительное основание m_{n+1}, такое, что $m_i < m_{n+1}, i = \overline{1,n}$, $n < m_{\tau+1}$ и $|M|_{m_{n+1}} \equiv 1$, то значение остатка по дополнительному основанию при $(n-1)\cdot(M-1)/m_{n+1} \leq A < M$ определяется как

$$\alpha_{n+1} = \begin{cases} \left|\sum_{i=1}^{n} \left|\gamma_i \cdot \mu_i^* \cdot M_i - R(P(\gamma_i))\right|_{m_{n+1}} + \left|r \cdot \sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i)\right|_q - \left|r \cdot \left|\sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i)\right|_{m_{n+1}}\right|_q\right|_{m_{n+1}}, \\ \text{если } \left|\sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i)\right|_{m_{n+1}} = 0; \\ \left|\sum_{i=1}^{n} \left|\gamma_i \cdot \mu_i^* \cdot M_i - R(P(\gamma_i))\right|_{m_{n+1}} + \left|r \cdot \sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i)\right|_q - \left|r \cdot \left|\sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i)\right|_{m_{n+1}}\right|_q + 1\right|_{m_{n+1}}, \\ \text{в иных случаях,} \end{cases}$$

где q – целое положительное число, взаимно простое с числом m_{n+1}, $q \geq n$; r – константа, определяемая как решение сравнения $|r \cdot m_{n+1}|_q \equiv 1$.

Доказательство. Так как остаток числа $A \cdot m_{n+1}$ по основанию m_{n+1} равен 0, то в соответствии с условием теоремы и следствием 3 леммы, $$\left|\sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i)\right|_{m_{n+1}} = \left|A \cdot m_{n+1}\right|_{m_{n+1}} = 0$$ либо $$\left|\sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i)\right|_{m_{n+1}} \geq \left|\left|A \cdot m_{n+1}\right|_M\right|_{m_{n+1}} > \ldots > \left|A \cdot m_{n+1}\right|_{m_{n+1}} = 0$$. Тогда, применяя теорему о рангах элементов числовых последовательностей [2], можно утверждать, что расчетный ранг $R(P(A \cdot m_{n+1}))$ числа

$\mathbf{P\left(A\cdot m_{n+1}\right)=\left(\gamma_1,\gamma_2,\ldots,\gamma_n,\left|\sum_{i=1}^{n}S(\gamma_i)\right|_{m_{n+1}}\right)}$ связан с рангом $\mathbf{R\left(A\cdot m_{n+1}\right)}$ числа $\mathbf{A\cdot m_{n+1}=(\gamma_1,\gamma_2,\ldots,\gamma_n,0)}$ соотношением

$$\mathbf{R\left(A\cdot m_{n+1}\right)=\begin{cases} R\left(P\left(A\cdot m_{n+1}\right)\right), \text{ если } \left|\sum_{i=1}^{n}S(\gamma_i)\right|_{m_{n+1}}=0; \\ R\left(P\left(A\cdot m_{n+1}\right)\right)-1, \text{ в иных случаях,} \end{cases}} \quad (17)$$

где $\mathbf{R\left(P\left(A\cdot m_{n+1}\right)\right)}$ вычисляется по формуле (15), в которой целая часть суммы определяется выражением

$$\mathbf{\left[\sum_{i=1}^{n}S(\gamma_i)\Big/m_{n+1}\right]=\left(\sum_{i=1}^{n}S(\gamma_i)-\left|\sum_{i=1}^{n}S(\gamma_i)\right|_{m_{n+1}}\right)\Big/m_{n+1}}. \quad (18)$$

Поскольку $\mathbf{S(\gamma_i)<m_{n+1}}$, то результат округления в меньшую сторону значения дроби (18) всегда будет меньше величины $\mathbf{n}$. В связи с этим, выражение в правой части (18) может быть определено формальным делением числителя дроби на $\mathbf{m_{n+1}}$ по модулю $\mathbf{q}$ [2]:

$$\mathbf{\left(\sum_{i=1}^{n}S(\gamma_i)-\left|\sum_{i=1}^{n}S(\gamma_i)\right|_{m_{n+1}}\right)\Big/m_{n+1}=\left|\left|r\cdot\sum_{i=1}^{n}S(\gamma_i)\right|_q-\left|r\cdot\left|\sum_{i=1}^{n}S(\gamma_i)\right|_{m_{n+1}}\right|_q\right|_q}, \quad (19)$$

где $\mathbf{q}$ – целое положительное число, взаимно простое с числом $\mathbf{m_{n+1}}$, $\mathbf{q\geq n}$; $\mathbf{r}$ – константа, найденная из решения сравнения $\mathbf{\left|r\cdot m_{n+1}\right|_q\equiv 1}$.

Подставляя (15), (17) и (19) в (9), приходим к утверждению теоремы.

Пример. Рассмотрим систему оснований:

$$\mathbf{m_1=2;\ m_2=3;\ m_3=5;\ m_4=7\ \ (n=4;\ \ M=210)},$$

в которую введено дополнительное основание $\mathbf{m_{n+1}=m_5=11,\ \ |210|_{11}\equiv 1}$.

Находим значения констант: $\mathbf{(n-1)\cdot(M-1)/m_{n+1}=57;\ \ \mu_1^*=1;\ \ \mu_2^*=2;}$ $\mathbf{\mu_3^*=3;\ \ \mu_4^*=1;\ \ M_1=105;\ \ M_2=70;\ \ M_3=42;\ \ M_4=30}$ и выбираем $\mathbf{q=n=4}$. Из сравнения $\mathbf{\left|r\cdot m_{n+1}\right|_q\equiv 1}$ значение $\mathbf{r=3}$. Пусть в результате выполнения арифметической операции в модулярном АУ получено число **A = 119**, которое представлено в расширенной системе оснований остатками **A = (1,2,4,0,9).** Определим, используя остатки по основаниям $\mathbf{m_1}$, $\mathbf{m_2}$, $\mathbf{m_3}$ и $\mathbf{m_4}$,

остаток числа **A** по основанию m_5. С учетом (6), (12) и (13) вычисляем:
$\gamma_1 = 1;\ \gamma_2 = 1;\ \gamma_3 = 4$ и $\gamma_4 = 0$; $S(\gamma_1) = 6;\ S(\gamma_2) = 4;\ S(\gamma_3) = 7$ и $S(\gamma_4) = 0$;
$R(P(\gamma_1)) = 1;\ R(P(\gamma_2)) = 1;\ R(P(\gamma_3)) = 3$ и $R(P(\gamma_4)) = 0$.

Соответственно

$$\sum_{i=1}^{n} \left| \gamma_i \cdot \mu_i^* \cdot M_i - R(P(\gamma_i)) \right|_{m_{n+1}} = 18;\ \left| \sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i) \right|_{m_{n+1}} = 6;\ \left| \sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i) \right|_q = 1;$$

$$\left| \left| r \cdot \sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i) \right|_q - \left| r \cdot \left| \sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i) \right|_{m_{n+1}} \right|_q \right|_q = 1.$$

Применяя утверждение доказанной теоремы, рассчитываем на основании полученных результатов остаток по дополнительному основанию $\alpha_5 = |18 + 1 + 1|_{11} = 9$, который совпадает с истинным значением.

Пусть в результате выполнения арифметической операции произошло искажение цифры по основанию m_4: $\tilde{\alpha}_4 = 2$.

С учетом (6), (12) и (13) получаем:
$\gamma_1 = 1;\ \gamma_2 = 1;\ \gamma_3 = 4$ и $\tilde{\gamma}_4 = 1$; $S(\gamma_1) = 6;\ S(\gamma_2) = 4;\ S(\gamma_3) = 7$ и $S(\tilde{\gamma}_4) = 10$;
$R(P(\gamma_1)) = 1;\ R(P(\gamma_2)) = 1;\ R(P(\gamma_3)) = 3$ и $R(P(\tilde{\gamma}_4)) = 1$.

Соответственно $\sum_{i=1}^{n} \left| \gamma_i \cdot \mu_i^* \cdot M_i - R(P(\gamma_i)) \right|_{m_{n+1}} = 25;\ \left| \sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i) \right|_{m_{n+1}} = 5;$

$\left| \sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i) \right|_q = 3;\ \left| \left| r \cdot \sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i) \right|_q - \left| r \cdot \left| \sum_{i=1}^{n} S(\gamma_i) \right|_{m_{n+1}} \right|_q \right|_q = 2$, а остаток по дополнительному основанию равен $\tilde{\alpha}_5 = |25 + 2 + 1|_{11} = 6$. Так как полученный результат не совпадает с истинным значением цифры α_5, то принимается решение о наличии сбоя в работе модулярного АУ.

Следует отметить, что для приведенных в примере исходных данных утверждение теоремы справедливо при $32 \le A < M$, т.е. в более широком диапазоне, чем $(n-1)\cdot(M-1)/m_{n+1} = 57 \le A < M$.

Таким образом, ценой незначительного уменьшения диапазона изменения данных в модулярном АУ получен алгоритм расчета цифры по дополнительному (контрольному) основанию, содержащий только модульные арифметические операции, которые достаточно просто реализуются таблично на базе матриц логических вентилей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Чернявский А.С., Данилевич В.В., Коляда А.А., Селянинов М.Ю. Высокоскоростные методы и системы цифровой обработки информации. – Мн.: БГУ, 1996. – 376 с.*
2. *Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. Машинная арифметика в остаточных классах. – М.: Сов. радио, 1968. – 440 с.*

Поступила 8.07.2002

***ОВЧАРЕНКО Леонид Александрович**, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, докторант Военного института радиоэлектроники (г. Воронеж). В 1983 году окончил Череповецкое высшее военное инженерное училище радиоэлектроники. Область научных интересов – высокопроизводительные и отказоустойчивые вычислительные структуры цифровой обработки сигналов.*

***ЧЕКАЛИН Сергей Сергеевич**, ст. преподаватель, зав. лаб. Российского государственного открытого технического университета путей сообщения (Воронежский филиал), который окончил в 2000 году. Область научных интересов – высокопроизводительные и отказоустойчивые вычислительные структуры цифровой обработки сигналов.*