

ISSN 1561-2430 (Print)  
ISSN 2524-2415 (Online)

## ИНФОРМАТИКА INFORMATICS

УДК 621.391.01  
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2019-55-3-375-382>

Поступила в редакцию 13.06.2019  
Received 13.06.2019

**А. С. Поляков, И. Л. Кузнецова**

*Объединенный институт проблем информатики  
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ СПОСОБА КОРРЕКЦИИ ОШИБОК ПО ЗНАЧЕНИЯМ ЧЕТНОСТИ КООРДИНАТ БИНАРНОЙ МАТРИЦЫ

**Аннотация.** Приводятся результаты исследования характеристик предложенного в [1] способа коррекции ошибок, возникающих при передаче информации по линиям связи. Получены оценки эффективности поиска ошибок и производительности алгоритма, разработанного для реализации предложенного способа, использующего при поиске ошибок значения четности координат бинарной матрицы, к которым относятся строки, столбцы, главные и вспомогательные диагонали. Определена зависимость характеристик алгоритма от интенсивности (плотности) битовых ошибок в сообщении, полученном после передачи по линиям связи, и от размера матриц, на которые производится разбиение передаваемого сообщения.

Приведены затраты времени на вычисление значений четности координат матрицы и реализацию алгоритма поиска ошибок в переданной информации. Представлены рекомендации по оптимальному выбору размеров бинарных матриц.

Показано, что при интенсивности битовых ошибок  $10^{-2}$  и менее алгоритм обнаруживает все имеющиеся ошибки.

**Ключевые слова:** бинарная матрица, ошибки, координаты ошибок, интенсивность ошибок, ложные ошибки, четность координат матрицы, главные диагонали, вспомогательные диагонали

**Для цитирования.** Поляков, А. С. Эффективность способа коррекции ошибок по значениям четности координат бинарной матрицы / А. С. Поляков, И. Л. Кузнецова // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 375–382. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2019-55-3-375-382>

**A. S. Poljakov, I. L. Kuznetsova**

*United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

### EFFICIENCY OF THE ERROR CORRECTION METHOD BY THE PARITY VALUES OF BINARY MATRIC COORDINATES

**Abstract.** The results of study of the characteristics of the proposed method [1] for correction of errors arising during information transmission via communication lines are presented. The estimates of the efficiency of search for errors and the performance of an algorithm developed to realize the proposed method using the parity values of binary matrix coordinates are obtained; among these errors are rows, columns, main and auxiliary diagonals, are obtained. We have determined the dependence of algorithm characteristics on the intensity (density) of bit errors in the message obtained after transmission via communication lines and on the size of matrices, into which a transmitted message is divided.

The time spent for calculating the parity values of matrix coordinates and for the algorithm used to find transmitted information errors are given. Recommendations on an optimal choice of sizes of binary matrices are presented. It is shown that, when the bit error rate is  $10^{-2}$  and less, the algorithm detects all the available errors.

**Keywords:** binary matrix, errors, error coordinates, intensity (density) of bit errors false errors, matrix coordinate parity, main diagonals, auxiliary diagonals

**For citation.** Poljakov A. S., Kuznetsova I. L. Efficiency of the error correction method by the parity values of binary matrix coordinates. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 375–382 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2019-55-3-375-382>

**Введение.** В работе [1] предложен способ коррекции ошибок в информации, передаваемой по каналам связи, основанный на использовании сведений о четности координат бинарной матрицы, в качестве которых рассматриваются строки, столбцы, главные и вспомогательные диагонали матрицы. Использование четырех координат для описания адреса элемента матрицы позволяет обнаруживать и исправлять ошибки различных типов.

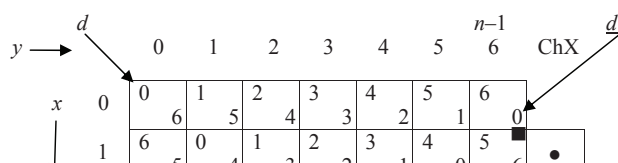
Аналитическая оценка характеристик рассмотренного в [1] способа невозможна, поскольку успешность поиска ошибок в значительной степени зависит от их конкретного расположения в матрице и наличия кратных ошибок по различным координатам, а такая информация отсутствует вследствие случайного их размещения. Оценка эффективности рассматриваемого подхода может быть получена только путем экспериментальных исследований, результаты которых представлены в настоящей статье.

Под *эффективностью* способа коррекции ошибок будем понимать основные показатели методов кодирования-декодирования, а именно: скорость кода; избыточность кода; количество обнаруживаемых ошибок в зависимости от коэффициента их плотности в переданной информации; затраты времени на кодирование и декодирование информации.

**Основные положения исследуемого способа.** Рассмотрим бинарную матрицу размером  $(m \times n)$  элементов, где  $m$  – число строк,  $n$  – число столбцов,  $x$  – номер строки,  $y$  – номер столбца,  $d$  – номер главной диагонали,  $\underline{d}$  – номер вспомогательной диагонали. Заметим, что рассматриваются матрицы, у которых  $m \leq n$ .

Под *главными диагоналями* понимаются как главная диагональ, так и все параллельные ей диагонали, которые рассматриваются как непрерывные цепочки элементов матрицы, начинающиеся с элементов первой строки (с номерами  $0, 1, \dots, n-1$ ) и проходящие в направлении сверху – вниз – направо через все строки матрицы с переходом на крайний левый элемент следующей строки при достижении крайнего правого элемента предыдущей строки. Нумерация элементов новой строки начинается с номера, который был последним в предыдущей строке. Аналогично под *вспомогательными диагоналями* подразумеваются как основная вспомогательная диагональ матрицы, так и все параллельные ей диагонали, которые рассматриваются как непрерывные цепочки элементов матрицы, начинающиеся с элементов первой строки (с номерами  $n-1, \dots, 1, 0$ ) и проходящие в направлении сверху – вниз – налево через все строки матрицы с переходом на крайний правый элемент следующей строки при достижении крайнего левого элемента предыдущей.

На рис. 1 представлена матрица  $M$  размером  $(6 \times 7)$  бит с принятыми выше обозначениями. В левом верхнем углу элементов матрицы указаны номера главных диагоналей, в нижнем правом – вспомогательных. Направления главных и вспомогательных диагоналей отмечены стрелками  $d$  и  $\underline{d}$  соответственно.



		$d$						$n-1$								$\underline{d}$	
			0	1	2	3	4	5	6	ChX							
$x$	0	0	6	5	4	3	2	5	1	0							
	1	6	0	4	1	2	3	4	5	6	•						
	2	5	6	3	0	1	2	3	4	5							
	3	4	5	2	6	0	1	2	3	4	•						
	4	3	2	1	0	6	5	4	3	2							
$m-1$	5	2	3	4	5	6	0	1	2	3	•						
	ChD	1	2	3	•	4	5	•	6	•	0						
	ChD	•	0	•	6	5	4	3	2	•	1						
	ChY		•	•						•							

Рис. 1. Матрица  $M$  с обозначениями

Fig. 1. Matrix  $M$  with the notations

В качестве примера значком ■ в матрице обозначены ошибочные элементы, т. е. элементы, значения которых изменились при передаче информации. Для представления значений четности координат используются столбец ChX (четность по строкам) и строки ChD, ChD, ChY (четность по главным диагоналям, вспомогательным диагоналям и столбцам соответственно). Строки, столбцы, главные и вспомогательные диагонали, в которых имеются ошибки, отмечены в строках ChD, ChD, ChY и столбце ChX значками •, а их значения включаются в списки ошибочных координат SX, SY, SD, SD (строк, столбцов, главных и вспомогательных диагоналей соответственно).

**Алгоритм поиска ошибок.** Согласно [1] поиск ошибок в матрице производится на основании значений списков ошибочных координат  $SX$ ,  $SY$ ,  $SD$ ,  $\underline{SD}$ , содержащих номера строк, столбцов, главных и вспомогательных диагоналей, в которых имеются ошибки.

Алгоритм, реализующий этот способ, в общем виде представляет собой блок анализа мощностей списков ошибочных координат, по результатам которого выбираются процедуры формирования множества адресов вероятных ошибок и удаления из него адресов, соответствующих ложным ошибкам.

Множество адресов вероятных ошибок формируется в виде таблицы  $S$ , столбцы которой  $S1$ ,  $S2$ ,  $S3$ ,  $S4$  соответствуют спискам ошибочных координат  $SX$ ,  $SY$ ,  $SD$ ,  $\underline{SD}$ , строки в двух столбцах таблицы представляют собой всевозможные пары значений списков  $SI$  и  $SJ$ , выбираемых из  $\{SX, SY, SD, \underline{SD}\}$ , а значения оставшихся двух столбцов вычисляются по формулам

$$x(y, d) = (y + n - d) \bmod n, \quad (1)$$

$$y(x, d) = (x - n + d) \bmod n, \quad (2)$$

$$x(y, \underline{d}) = (2n - 1 - y - \underline{d}) \bmod n, \quad (3)$$

$$y(x, \underline{d}) = (2n - 1 - x - \underline{d}) \bmod n, \quad (4)$$

$$d(x, y) = (n - x + y) \bmod n, \quad (5)$$

$$d(x, y) = (2n - 1 - x - y) \bmod n. \quad (6)$$

Заметим, что для формул (1)–(6) приняты следующие соглашения: если  $z < 0$ , то  $z \bmod n = (n - |z|) \bmod n$ ; если  $z = n$ , то  $z \bmod n = 0$ .

Критерием выбора списков  $SI$  и  $SJ$  является соотношение мощностей списков  $SX$ ,  $SY$ ,  $SD$ ,  $\underline{SD}$ , т. е. количество элементов в списках, которое зависит как от общего числа ошибок, расположенных по рассматриваемой координате, так и от числа кратных ошибок. Действительно, если по некоторой координате (например, по главной диагонали) имеются две ошибки, то мощность списка  $SD$  будет на две единицы меньше мощности списка ошибочной координаты, в которой нет кратных ошибок; если есть четыре ошибки, то мощность списка  $SD$  уменьшается на четыре единицы и т. д. По этой причине в качестве списков  $SI$  и  $SJ$  рекомендуется выбирать списки максимальной мощности, поскольку при этом формируется таблица  $S$  с наибольшим числом адресов вероятных ошибок и соответственно появляется больше возможностей их нахождения.

Алгоритм поиска ошибок включает в себя последовательность следующих действий.

1. Из множества списков ошибочных координат выбираются списки  $SI$  и  $SJ$ , по значениям которых формируется таблица  $S$ .

2. Из множества адресов вероятных ошибок (строк таблицы  $S$ ) удаляются строки (адреса), соответствующие ложным ошибкам. Правила их удаления зависят от конкретного соотношения мощностей списков ошибочных координат и вероятности обнаружения ложных ошибок из-за наличия в строках таблицы  $S$  значений, соответствующих таким ошибкам. Для удаления строк таблицы  $S$ , соответствующих ложным ошибкам, используются следующие правила:

– удаляются строки, в которых значение в столбце  $S1$  превышает  $(m - 1)$ ;

– удаляются строки, в которых в столбцах, не соответствующих столбцам  $SI$  и  $SJ$ :

а) имеются одинаковые значения;

б) значения в названных столбцах отсутствуют в списках соответствующих ошибочных координат;

– если в множестве списков ошибочных координат есть список, в котором отсутствуют элементы, то из таблицы  $S$  удаляются строки, имеющие одинаковые значения в столбце, не принадлежащем множеству  $\{SI, SJ\}$ , а также значения, отсутствующие в соответствующем этому столбцу списке ошибочных координат.

3. Если в результате выполненных действий в таблице  $S$  остались строки, то они и представляют собой адреса обнаруженных ошибок. В таком случае из списков  $SX$ ,  $SY$ ,  $SD$ ,  $\underline{SD}$  удаляются элементы, значения которых равны значениям столбцов  $S1$ ,  $S2$ ,  $S3$ ,  $S4$  в оставшихся строках таблицы  $S$ . Если после этого в списках  $SX$  и  $SY$  больше нет элементов, то это означает, что все

ошибки обнаружены, и поиск прекращается. В противном случае выполняется следующая итерация поиска ошибок.

4. Если в результате выполненных действий ошибки не обнаружены (в таблице  $S$  не осталось элементов, а в списках  $SX$  и  $SY$  они есть), то увеличивается значение счетчика неудачных попыток, и по достижении установленного критического значения (не более 3) поиск ошибок прекращается. В противном случае выполняется следующая итерация поиска.

В качестве примера рассмотрим процедуру поиска ошибок в матрице  $M$ , приведенной на рис. 1. Ошибки находятся в элементах матрицы (1,6), (3,2), (5,1). Значения списков ошибочных координат следующие:  $SX = \{1,3,5\}$ ;  $SY = \{1,2,6\}$ ;  $SD = \{3,5,6\}$ ;  $\underline{SD} = \{0,1,6\}$ . Значения этих списков показаны в верхней строке табл. 1. Мощности списков ошибочных координат одинаковы, поэтому в качестве базовых (т. е.  $S1$  и  $SJ$ ) выбираются списки  $SX$  и  $SY$  (отмечены жирным шрифтом), и на основании значений этих списков в столбцах  $S1$  и  $S2$  табл. 1 формируется множество вероятных ошибок, а значения строк в столбцах  $S3$  и  $S4$  вычисляются по формулам (5) и (6). Из табл. 1 удаляются строки, которые имеют одинаковые значения в столбце  $S4$  (отмечены символами  $>$ ,  $\wedge$ ,  $+$ ) и у которых значение столбца  $S4$  отсутствует в списке  $\underline{SD}$  (отмечено символом  $--$ ). Удаленные строки обозначены символами  $--$  справа от табл. 1, а оставшиеся строки, представляющие собой адреса обнаруженных ошибок, – символами  $++$ .

Из списков ошибочных координат удаляются значения столбцов  $S1$ ,  $S2$ ,  $S3$ ,  $S4$  в оставшихся строках. Новые значения списков показаны под двойной чертой. Число элементов в каждом из списков равно единице, поэтому строка под двойной чертой представляет собой адрес ошибки. После удаления из списков ошибочных координат значений столбцов в этой строке в списках  $SX$ ,  $SY$ ,  $SD$ ,  $\underline{SD}$  больше нет элементов, что отражено в последней строке табл. 1. Все ошибки обнаружены и поиск прекращается.

Таблица 1

Table 1

<b><math>SX =</math></b> <b><math>\{1,3,5\}</math></b>	<b><math>SY =</math></b> <b><math>\{1,2,6\}</math></b>	$SD =$ $\{3,5,6\}$	$\underline{SD} =$ $\{0,1,6\}$	
<b><math>S1</math></b>	<b><math>S2</math></b>	<b><math>S3</math></b>	<b><math>S4</math></b>	
1	1	0	4 >	--
1	2	1	3 --	--
1	6	5	6 ^	--
3	1	5	2 +	--
3	2	6	1	++
3	6	3	4 >	--
5	1	3	0	++
5	2	4	6 ^	--
5	6	1	2 +	--
1	6	5	6	++
$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	

Рассмотрим пример с наличием кратных ошибок. Предположим, что ошибки в матрице  $M$  находятся в элементах (2,2) и (2,6), т. е. имеется двойная ошибка в строке 2, поэтому  $|SX| = |SY| - 2 = 0$ . Значения списков ошибочных координат представлены в табл. 2. Для формирования множества вероятных ошибок выберем списки  $SY$  и  $SD$ , из значений которых образуются строки в столбцах  $S2$  и  $S3$ . Значения строк в столбцах  $S1$  и  $S4$  вычисляются с помощью формул (1) и (6). Из табл. 2 удаляются строки, в которых:

- значение столбца  $S1$  превышает  $(m - 1)$ , т. е. больше 5 (отмечено в столбце  $S1$  символом  $--$ );
- имеются одинаковые значения в столбце  $S4$  (таковые отсутствуют);
- значение столбца  $S4$  отсутствует в  $\underline{SD}$  (отмечено символом  $--$  в столбце  $S4$ ). Если среди оставшихся строк имеются строки с одинаковыми значениями в столбце  $S1$ , то они и представ-

ляют собой координаты двойной ошибки (обозначены в столбце S1 символами +, а справа от табл. 2 – символами ++). После удаления из списков SY, SD, SD значений столбцов S2, S3, S4 в выделенных строках мощности списков ошибочных координат равны 0, т. е. все ошибки обнаружены и поиск прекращается.

Таблица 2

Table 2

SX = Ø	SY = {2,6}	SD = {0,4}	SD = {2,5}	
S1	S2	S3	S4	
2 +	2	0	2	++
5	2	4	6 --	--
6 --	6	0	1 --	--
2 +	6	4	5	++
Ø	Ø	Ø	Ø	

**Методика проведения эксперимента.** 1. Выбирается произвольный массив данных, который разбивается на бинарные матрицы размером  $(m \times n)$  бит. В каждой из них производится вычисление четности координат матрицы: строк, столбцов, главных и вспомогательных диагоналей. Полученные значения четности координат матрицы присоединяются к исходному массиву данных.

2. Производится имитация помех при передаче данных по линии связи путем внесения в каждую из матриц определенного количества ошибок с помощью датчика случайных чисел в соответствии с заданной интенсивностью ошибок.

3. Полученный таким образом массив данных (представляющий собой аналог исходного массива данных после передачи его по линии связи) снова разбивается на бинарные матрицы размером  $(m \times n)$  бит, в которых производится вычисление четности координат матриц.

4. Вычисленные значения четности координат матриц сравниваются с аналогичными значениями четности координат, полученными при разбиении исходного массива данных, и по результатам сравнения составляются списки ошибочных координат SX, SY, SD, SD.

5. Используя значения списков ошибочных координат, с помощью разработанного алгоритма производится поиск ошибок в матрице.

6. Используя списки внесенных в матрицу ошибок, производится сравнение адресов ошибок, внесенных с помощью датчика случайных чисел и обнаруженных с помощью алгоритма. Вычисляется эффективность поиска ошибок в виде отношения количества обнаруженных ошибок к количеству ошибок, внесенных в матрицу.

Исследование характеристик алгоритма для каждого из размеров матриц выполнялось на массиве данных размером  $1024 \times 1024 = 1\,048\,576$  бит.

Результаты вычислений представлены в табл. 3, где использованы следующие обозначения:

$k$  – интенсивность ошибок, равная отношению числа ошибок в матрице к общему числу элементов матрицы;

$r$  – коэффициент избыточности кода, равный отношению количества контрольных (проверочных) элементов к общему числу передаваемых элементов:  $r = (3n + m) / (n \cdot m + 3n + m)$ ;

$v$  – скорость кода, равная отношению числа информационных элементов к общему числу передаваемых элементов:  $v = n \cdot m / (n \cdot m + 3n + m)$ ;

$t_1$  – время разбиения исходного массива данных на матрицы и вычисления четности координат матриц;

$t_2$  – время разбиения переданного массива данных на матрицы, вычисления четности координат матриц и составления списков ошибочных координат;

$t_3$  – время работы алгоритма поиска ошибок.

Алгоритм реализован на языке C#. Исследование алгоритма проводилось на компьютере Intel Core 2 со следующими характеристиками: 2,17 ГГц, ОЗУ 2,0 Гбайт, ОС Windows 7.



Таблица 3

Table 3

Размер матрицы ( $m \times n$ )	$k$	Количество ошибок в матрице	Обнаружено ошибок, %	Время, ms			$v$	$r$
				$t_1$	$t_2$	$t_3$		
$8 \times 8$	$10^{-2}$	1	100	174	200	227	0,67	0,33
	$3 \cdot 10^{-2}$	2	99	178	210	193		
	$4,6 \cdot 10^{-2}$	3	75	190	213	663		
$8 \times 16$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	2	100	124	141	121	0,70	0,30
	$2,3 \cdot 10^{-2}$	3	94	130	146	224		
	$3,1 \cdot 10^{-2}$	4	80	126	138	402		
$8 \times 32$	$7,8 \cdot 10^{-3}$	2	100	91	115	30	0,71	0,29
	$10^{-2}$	3	98	96	118	77		
	$1,5 \cdot 10^{-2}$	4	93	93	116	127		
	$1,9 \cdot 10^{-2}$	5	83	110	126	201		
$16 \times 16$	$7,8 \cdot 10^{-3}$	2	99	101	113	46	0,80	0,20
	$10^{-2}$	3	93	100	111	107		
	$1,5 \cdot 10^{-2}$	4	80	102	111	208		
$16 \times 32$	$10^{-3}$	1	100	91	102	11	0,82	0,18
	$3 \cdot 10^{-3}$	2	100	93	103	27		
	$5 \cdot 10^{-3}$	3	99	90	101	34		
	$6 \cdot 10^{-3}$	4	94	92	101	82		
	$8 \cdot 10^{-3}$	5	86	94	102	183		
	$10^{-2}$	6	76	92	102	272		
$32 \times 32$	$10^{-3}$	2	100	80	95	7	0,89	0,11
	$2,9 \cdot 10^{-3}$	3	98	97	97	20		
	$3,9 \cdot 10^{-3}$	4	94	82	95	30		
	$4,8 \cdot 10^{-3}$	5	88	81	96	67		
	$5,8 \cdot 10^{-3}$	6	77	83	96	126		

**Обсуждение результатов.** Для оценки эффективности предлагаемого способа сравним полученные результаты с характеристиками известных способов коррекции ошибок, основанных на использовании четности координат бинарной матрицы [2–7]. Непосредственное сравнение оказалось затруднительным по ряду причин:

- показатели эффективности даются в разных измерениях, чаще всего только в виде одного из возможных показателей;
- в одних работах используются три координаты четности (строки, столбцы, одна диагональ) [2], в других – четыре координаты (строки, столбцы, две диагонали) [3–7];
- определение диагоналей производится по-разному – как самостоятельные рассматриваются и главная, и все параллельные ей диагонали (это же относится и к вспомогательным диагоналям);
- производится объединение диагоналей [3] аналогично тому, как принято в настоящей статье.

В большинстве рассмотренных источников сведений об эффективности предлагаемых способов нет. Упоминание о характеристиках способа имеется в работе [4]: «анализ процесса мажоритарного декодирования двумерного линейного итеративного кода с объединенными диагональными проверками показал, что все одиночные и большая часть двойных ошибок могут быть исправлены. При длине информационного слова  $k = 64$  бит приблизительно 76 % ошибок кратностью два будут исправлены».

Более полные сведения об эффективности способов коррекции ошибок даны в [5], где выполнен обзор, анализ и сравнение различных методов кодирования-декодирования (более 20 работ), в том числе основанных на использовании четности координат бинарной матрицы. Также приведены результаты экспериментов с массивами информации размером  $(1024 \times 1024)$  бит

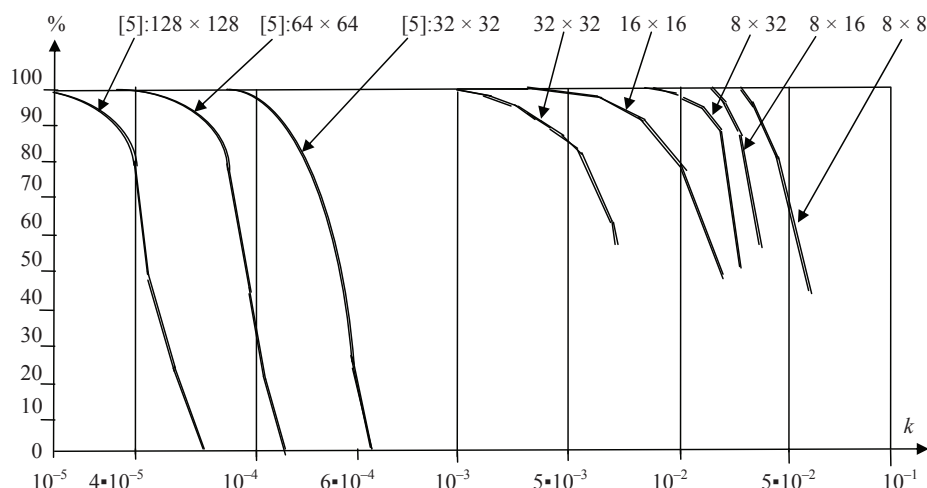


Рис. 2. Зависимость количества обнаруживаемых ошибок от интенсивности ошибок в матрице

Fig. 2. Correction rate vs number of errors for different block configurations

с искусственно внесенными ошибками и различными их интенсивностями, которые показаны на рис. 2 и обозначены: [5]: $128 \times 128$  – для матриц размером  $128 \times 128$  бит; [5]: $64 \times 64$  – для матриц размером  $64 \times 64$  бит и [5]: $32 \times 32$  – для матриц размером  $32 \times 32$  бит. На рисунке представлены результаты исследуемого в настоящей статье способа коррекции ошибок для матриц размером  $32 \times 32$ ,  $16 \times 16$ ,  $8 \times 32$ ,  $8 \times 16$ ,  $8 \times 8$  бит.

Показатели эффективности исследуемого способа обнаружения ошибок существенно лучше, чем представленного в [5], который оценивается авторами как наиболее эффективный из всех рассмотренных. К сожалению, в указанной работе не содержится сведений о его производительности, т. е. о временных затратах на поиск ошибок.

**Заключение.** Анализ представленных результатов показывает, что алгоритм, разработанный на основе предлагаемого способа, позволяет обнаруживать все ошибки при их интенсивности  $10^{-2}$  и менее, что дает возможность эффективного применения предлагаемого способа для обеспечения целостности передаваемой информации в низкокачественных линиях связи. Наибольшая результативность данного способа достигается при разбиении массива данных на матрицы размером  $(8 \times 8)$  и  $(8 \times 16)$  бит.

Затраты на обнаружение ошибок ( $t_3$ ) зависят от их интенсивности: чем она выше, тем больше времени требуется на поиск, поскольку при большем значении интенсивности ошибок появляется больше кратных ошибок, и поэтому необходимо производить больше попыток их обнаружения с использованием различных пар списков ошибочных координат. Заметим, что разница во временных затратах незначительна и измеряется десятками *мс*.

Размеры матриц, на которые производится разбиение массива данных, несущественно влияет на время, которое расходуется на сам процесс разбиения и вычисления четности координат, что хорошо видно из сравнения значений  $t_1$  и  $t_2$ .

Характеристики предлагаемого способа, а именно большое быстродействие и высокая скорость хода, гарантируют более высокий уровень защиты информации от искажений при передаче по линиям связи путем коррекции ошибок в контрольных (проверочных) символах, которые передаются вместе с информационными. Возможное количество ошибок, которые могут появиться в контрольной (избыточной) информации, достаточно велико, и равно значению избыточности кода, т. е.  $r\%$  от общего числа ошибок в передаваемой информации. Появление же ошибок в контрольной информации разрушает всю систему обнаружения ошибок.

#### Список использованных источников

1. Поляков, А. С. Коррекция ошибок при передаче информации по значениям четности координат бинарной матрицы / А. С. Поляков // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2017. – № 2. – С. 101–109.

2. Конопелько, В. К. Табличные низкоплотные коды, исправляющие модуль и пакет ошибок / В. К. Конопелько // Автоматика и телемеханика. – 1992. – Вып. 4. – С. 155–163.
3. Романенко, Д. М. Мажоритарное декодирование двумерных линейных итеративных кодов с объединенными диагональными проверками / Д. М. Романенко, Д. В. Шиман // Тр. БГТУ. Сер. 6, Физ.-мат. науки и информатика. – 2009. – Вып. 17. – С. 119–121.
4. Шиман, Д. В. Свойства и параметры линейных итеративных кодов с двойными диагональными проверками / Д. В. Шиман, Д. М. Романенко // Тр. БГТУ. Сер. 6, Физ.-мат. науки и информатика. – 2007. – Вып. 150. – С. 151–154.
5. HVD: horizontal-vertical-diagonal error detecting and correcting code to protect against with soft errors / M. Kishani [et al.] // Design Automation for Embedded Systems. – 2011. – Vol. 15, № 3–4. – P. 289–310. <https://doi.org/10.1007/s10617-011-9078-2>
6. Bilal, Y. A refined four-dimensional parity based EDAC and performance analysis using FPGA / Y. Bilal, S. A. Khan, Z. A. Khan // International Conference on Open Source Systems and Technologies (ICOSST 2013). Lahore, Pakistan, 16–18 December 2013. – P. 81–86.
7. Error Detection and Correction over Two-Dimensional and Two-Diagonal Model and Five-Dimensional Model / D. Aflakian [et al.] // Int. J. Advanced Computer Science and Applications. – 2011. – Vol. 2, № 7. – P. 16–19. <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2011.020703>

## References

1. Polyakov A. S. Error correction when transmitting information by a parity check of binary matrix coordinates. *Vestsi Natsyional'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2017, no. 2, pp. 101–109 (in Russian).
2. Konopel'ko V. K. Tablichnye nizkoplotnye kody, ispravlyayushchie modul' i paket oshibok. *Avtomatika i Telemekhanika = Automation and Remote Control*, 1992, no. 4, pp. 155–163 (in Russian).
3. Romanenko D. M., Shiman D. V. Majority decoding of two-dimensional linear iterative codes with combined diagonal checks. *Trudy BGTU. Seriya 3, Fiziko-matematicheskie nauki i informatika = Proceedings of BSTU. Issue 3: Physics and Mathematics. Informatics*, 2009, vol. 17, pp. 119–121 (in Russian).
4. Shiman D. V., Romanenko D. M. Properties and parameters of linear iterative codes with double diagonal checks *Trudy BGTU. Seriya 3, Fiziko-matematicheskie nauki i informatika = Proceedings of BSTU. Issue 3: Physics and Mathematics. Informatics*, 2007, vol. 15, pp. 151–154 (in Russian).
5. Kishani M., Zarandi H. R., Pedram H., Tajary A., Raji M., Ghavami B. HVD: horizontal-vertical-diagonal error detecting and correcting code to protect against with soft errors. *Design Automation for Embedded Systems*, 2011, vol. 15, no. 3–4, pp. 289–310. <https://doi.org/10.1007/s10617-011-9078-2>
6. Bilal Y., Khan S. A., Khan Z. A. A refined four-dimensional parity based EDAC and performance analysis using FPGA. *International Conference on Open Source Systems and Technologies (ICOSST 2013)*. Lahore, Pakistan, 16–18 December 2013, pp. 81–86.
7. Aflakian D., Siddiqui D. T., Khan N. A., Aflakian D. Error Detection and Correction over Two-Dimensional and Two-Diagonal Model and Five-Dimensional Model. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2011, vol. 2, no. 7, pp. 16–19. <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2011.020703>

## Информация об авторах

**Поляков Александр Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexpolja@tut.by

**Кузнецова Ирина Леонидовна** – главный конструктор проекта, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: kiryn@tut.by

## Information about the authors

**Alexander S. Poljakov** – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Leading Researcher, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexpolja@tut.by

**Irina L. Kuznetsova** – Chief designer of the project, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kiryn@tut.by