ИНФОРМАТИКА

2008 июль-сентябрь № 3

УДК 004.33.054

С.В. Ярмолик[1], А.Н. Курбацкий[2], В.Н. Ярмолик[1]

АНАЛИЗ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧИЯ ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ ОЗУ

Анализируются численные характеристики подобия и различия, применяемые для сравнения двоичных и многозначных векторов, которые используются при многократном тестировании оперативных запоминающих устройств (ОЗУ). Показывается, что оценкой, позволяющей формировать эффективные начальные состояния ОЗУ при многократном их тестировании, являются характеристики различия двоичных векторов Rogers-Tantoto и Sokal-Michener. Выбор адресных последовательностей для обеспечения высокой эффективности тестирования ОЗУ осуществляется на основе расстояния Минковского.

Введение

При тестировании вычислительных систем и устройств, поведение которых определяется не только последним входным значением (обращением) к ним, но и предшествующими входными значениями, зависящими от их внутренних состояний, необходимо строить тестовые последовательности, учитывающие максимальное количество разнообразных ситуаций [1]. Для современных вычислительных систем и устройств, состоящих из огромного числа составных элементов, количество разнообразных ситуаций принимает астрономические значения. В запоминающих устройствах (ЗУ) разнообразие заключается как в различных состояниях их запоминающих ячеек, число которых, как правило, превышает 10^9, так и в большом количестве их неисправных состояний [2, 3]. Даже в случае классических методов тестирования оперативных запоминающих устройств (ОЗУ) емкостью N бит, когда состояние ячеек известно, сложность эффективного теста, генерирующего всевозможные комбинации состояний, пропорциональна величине 2^N, что приводит к так называемому комбинаторному взрыву. Поэтому в настоящее время используются и по-прежнему разрабатываются методы построения тестов, имеющих существенно меньшую сложность, как правило, линейно зависящую от емкости ОЗУ. Эти тесты имеют общее название «маршевые тесты» (*March Tests*) и доминируют в практических приложениях. При их применении необходима разработка небольшого количества тестовых процедур, которые, тем не менее, были бы достаточно качественными, т. е. покрывали бы максимально возможное число различных неисправных состояний ОЗУ.

В общем случае при отсутствии дополнительной информации о тестируемой вычислительной системе или устройстве эта задача решается на основе разбиения возможных значений параметров на конечное число групп и использования различных комбинаций значений из различных групп. Для построения этих комбинаций используются покрывающие массивы (*Covering Arrays*), дающие минимально возможные множества комбинаций, которые перебирают все возможные сочетания пар, троек или другого числа значений отдельных параметров [4]. При тестировании ОЗУ применяются различные методы и приемы формирования покрывающих массивов, что особенно часто используется в случае тестов для обнаружения обобщающих математических моделей неисправных состояний ОЗУ.

Наиболее значимым классом таких моделей неисправностей ОЗУ являются кодочувствительные неисправности (*Pattern Sensitive Faults – PSF*), затрагивающие несколько ячеек ОЗУ. Для подобных неисправностей логическое состояние одной ячейки ОЗУ может зависеть от содержимого (0 или 1) или от логических переходов из 1 в 0 или из 0 в 1 в соседних ячейках ЗУ. Выделяют базовую ячейку (*Base Cell*), которая в данном случае является аналогом жертвы, и соседние ячейки (*Neighborhood Cells*), выступающие в роли агрессоров, количество и местоположение которых может быть произвольным. В зависимости от эффекта влияния на базовую ячейку различают [1, 3] пассивные кодочувствительные неисправности (*Passive PSF – PPSF*), для которых состояние базовой ячейки не может быть изменено для определенного кода в соседних ячейках ЗУ, и активные кодочувствительные неисправности (*Active PSF – APSF*). Базовая ячейка изменяет свое состояние из-за изменения кода в соседних ячейках. Изменение кода происходит в результате изменения состояния на противоположное только в одной соседней ячейке, в то время как остальные ячейки сохраняют предыдущее состояние.

Исходя из определения кодочувствительных неисправностей, их количество оценивается величиной $2^k N^k$, где k – число произвольных ячеек ОЗУ из N, участвующих в кодочувствительной неисправности. Это количество уже для k=3 и N=10^6 принимает нереально большое значение [5].

Известно, что традиционные маршевые тесты не позволяют генерировать все состояния в соседних ячейках, которые необходимы для обнаружения кодочувствительных неисправностей. Однако различные модификации маршевых тестов позволяют увеличить количество выявленных неисправностей типа *PSF*. Рассматривались различные методы для обнаружения неисправностей *PSF*, такие как метод частичного покрытия [1], метод двух групп [6], маршевый алгоритм по строкам [7], неразрушающее тестирование [8], псевдоисчерпывающее тестирование [9], тестирование с использованием различных адресных последовательностей [10] и различных начальных состояний адресов [11], а также применение множества начальных состояний ОЗУ [12].

Во всех указанных методах решается задача разбиения возможных значений адресов ячеек ОЗУ и их состояний на конечное число групп и использования различных комбинаций значений из разных групп для эффективного тестирования ОЗУ. В особенности это касается методов, описанных в [9–12]. Достижение цели получения множества различных комбинаций из различных групп предопределяет использование численных метрик различия и подобия объектов (ОЗУ) либо их характеристик [13, 14].

1. Анализ характеристик различия и подобия

Как отмечалось в [13, 14], подобие и различие объектов и их характеристик очень трудно поддаются оценке и измерению и тем более получению обобщающих метрик либо численных оценок подобия и различия. Традиционно в классических приложениях [13–15] для оценки различия используется понятие расстояния, которое измеряет степень различия между объектами либо их характеристиками. Согласно определению под расстоянием $D(i,j)$ между объектами i и j понимают количественную величину, отвечающую трем условиям: расстояние всегда положительно или равняется нулю ($D(i,j)\geq 0$), расстояние между объектом i по отношению к самому себе равняется нулю ($D(i,i)=0$), для расстояния выполняется свойство симметрии ($D(i,j)=D(j,i)$). Расстояние называется метрикой, если для него выполняется свойство треугольника ($D(i,j)\leq D(i,k)+D(k,j)$).

Используя понятие нормализованной величины различия, принимающей значения в диапазоне $0\leq D(i,j)\leq 1$, для понятия подобия применяется соотношение $S(i,j)=1-D(i,j)$. Для случая, когда $1\leq D(i,j)\leq +1$, данная величина может вычисляться как $S(i,j)=1-2D(i,j)$. Тогда при $D(i,j)=+1$, что свидетельствует о максимальном различии объектов i и j, величина $S(i,j)$ принимает значение –1, что свидетельствует о минимальной близости объектов.

При тестировании ОЗУ для достижения высокой покрывающей способности их сложных неисправностей используется подход, основанный на многократном тестировании. При его реализации применяются различные начальные состояния $B_i=b_{i0}b_{i1}b_{i2}\ldots b_{i(N-2)}b_{i(N-1)}$ ОЗУ, которые представляют собой двоичные векторы ($b_{ij}\in\{0,1\}$, $j\in\{0,1,2,\ldots,N-1\}$, $i\in\{0,1,2,\ldots,2^N-1\}$) [12], а также различные адресные последовательности $A_i=A_i(0)A_i(1)A_i(2)\ldots A_i(N-2)A_i(N-1)$, $A_i(j)\in\{0,1,2\ldots,N-1\}$, $j\in\{0,1,2,\ldots,N-1\}$ [10–11].

2. Характеристики различия и подобия для двоичных векторов

Существует множество различных характеристик для оценки степени подобия и различия двоичных векторов [13, 14].

Для оценки различия между двумя векторами начальных состояний памяти $B_i=b_{i0}b_{i1}b_{i2}\ldots b_{i(N-2)}b_{i(N-1)}$ и $B_j=b_{j0}b_{j1}b_{j2}\ldots b_{j(N-2)}b_{j(N-1)}$ определим величину $S_{qg}(B_i,B_j)$. Для двух векторов B_i и B_j $S_{qg}(B_i,B_j)$, где $q,g\in\{0,1\}$, будет числом пар компонент (b_{ik},b_{jk}), таких, что $b_{ik}=q$ и

$b_{jk}=g$. Различают четыре величины $S_{qg}(B_i,B_j)$, а именно $S_{00}(B_i,B_j)$, $S_{01}(B_i,B_j)$, $S_{10}(B_i,B_j)$ и $S_{11}(B_i,B_j)$, которые используются для определения восьми характеристик степени различия или подобия двоичных векторов [13, 14]. Например, в случае B_i=111100110101 и B_j=010111000011 получаем $S_{00}=1$, $S_{01}=3$, $S_{10}=5$ и $S_{11}=3$.

На основе S_{00}, S_{01}, S_{10} и S_{11} были определены восемь характеристик различия $D(i,j)$ и подобия $S(i,j)$ (табл. 1 [14]).

Таблица 1

Характеристики различия и подобия

№	Характеристика	$S(i,j)$	$D(i,j)$
1	*Jaccard–Needham*	$S_{11}/(S_{11}+S_{10}+S_{01})$	$(S_{10}+S_{01})/(S_{11}+S_{10}+S_{01})$
2	*Dice*	$S_{11}/(2S_{11}+S_{10}+S_{01})$	$(S_{10}+S_{01})/(2S_{11}+S_{10}+S_{01})$
3	*Correlation*	$(S_{11}S_{00}-S_{10}S_{01})/\sigma$	$0{,}5-(S_{11}S_{00}-S_{10}S_{01})/(2\sigma)$
4	*Yule*	$(S_{11}S_{00}-S_{10}S_{01})/(S_{11}S_{00}+S_{10}S_{01})$	$(S_{01}S_{10})/(S_{11}S_{00}+S_{10}S_{01})$
5	*Russell–Rao*	S_{11}/N	$1-S_{11}/N$
6	*Sokal–Michener*	$(S_{11}+S_{00})/N$	$1-(S_{11}+S_{00})/\mathrm{N}$
7	*Rogers–Tanmoto*	$(S_{11}+S_{00})/(S_{11}+S_{00}+2S_{10}+2S_{01})$	$(2S_{10}+2S_{01})/(S_{11}+S_{00}+2S_{10}+2S_{01})$
8	*Kulzinsky*	$S_{11}/(S_{10}+S_{01})$	$(S_{10}+S_{01}-S_{11}+N)/(S_{10}+S_{01}+N)$

Примечание: $\sigma=((S_{10}+S_{11})(S_{01}+S_{00})(S_{01}+S_{11})(S_{10}+S_{00}))^{1/2}$.

Четыре из приведенных характеристик: *Jaccard–Needham*, *Dice*, *Russell–Rao* и *Kulzinsky* – не зависят от S_{00} из-за меньшей значимости совпадений нулей (S_{00}) для большого числа приложений, особенно для поисковых алгоритмов и различных приложений по обработке данных (*Data Mining*, *Data Engineering*) [14]. Для этих приложений важным является совпадение, т. е. значение величины S_{11}. Только некоторые характеристики используют все четыре значения S_{00}, S_{01}, S_{10} и S_{11} и могут быть рассмотрены как метрики различия или подобия векторов начального состояния ОЗУ.

Проанализируем возможность использования характеристик, приведенных в табл. 1, в качестве меры различия между векторами начального состояния ОЗУ. Для их оценки рассмотрим множества начальных состояний ОЗУ, для которых доказано, что при реализации многократного тестирования они являются оптимальными в смысле обнаружения кодочувствительных неисправностей [2, 5, 9]. В качестве тестов ОЗУ рассмотрим маршевые тесты, формирующие одну двоичную комбинацию (обнаруживающие одну кодозависимую неисправность) в произвольно выбранных ячейках памяти, т. е. тесты типа *MATS*+ [2]. Как показано в [2, 9, 12], эффективность многократных тестов пропорциональна количеству двоичных комбинаций в произвольных k ячейках ОЗУ емкостью N бит. В случае *MATS*+-подобных тестов это достигается выбором оптимальных начальных состояний ОЗУ. В случае двукратных маршевых тестов оптимальными будут векторы, которые являются инверсными один по отношению к другому [12]. Так, если первый вектор имеет вид $B_1=b_0b_1b_2\ldots b_{N-2}b_{N-1}$, тогда второй вектор должен являться его инверсией: $B_2=b_0^*b_1^*b_2^*\ldots b_{N-2}^*b_{N-1}^*$ [12]. В этом случае во второй тестовой сессии при начальном состоянии B_2 будут обнаруживаться кодочувствительные неисправности, которые не были обнаружены в первой сессии при использовании вектора B_1. Соответственно суммарное их количество будет максимально возможным. Следует также отметить, что это количество не зависит от вида вектора B_1, т. е. от значений его конкретных бит.

Таким образом, объективная мера различия между B_1 и B_2 должна принимать максимальное значение и не зависеть от вида вектора $B_1=b_0b_1b_2\ldots b_{N-2}b_{N-1}$. Для данного случая очевидно, что для любых B_1 и соответствующих ему B_2 $S_{00}(B_1,B_2)=0$, $S_{11}(B_1,B_2)=0$ и $S_{01}(B_1,B_2)+S_{10}(B_1,B_2)=N$, а величина $S_{01}(B_1,B_2)S_{10}(B_1,B_2)$ зависит от исходного вектора B_1 и принимает значения от 0 до $N^2/4$. Две характеристики, а именно *Correlation* и *Yule*, зависят от $S_{01}(B_1,B_2)S_{10}(B_1,B_2)$ и поэтому не могут быть применены в качестве меры различия при формировании оптимальных векторов начального состояния при тестировании ОЗУ.

Рассмотрим две пары векторов начального состояния ОЗУ: $B_1=b_0b_1b_2\ldots b_{N-2}b_{N-1}$ и $B_3=b_0^*b_1^*b_2^*\ldots b_{N/2-1}^*b_{N/2}\ldots b_{N-2}b_{N-1}$, а также $B_2=b_0^*b_1^*b_2^*\ldots b_{N-2}^*b_{N-1}^*$ и $B_3=b_0^*b_1^*b_2^*\ldots b_{N/2-1}^*b_{N/2}\ldots b_{N-2}b_{N-1}$.

Суммарное количество двоичных комбинаций $Q(B_1,B_3)$ при применении первой пары B_1 и B_3 и количество $Q(B_2,B_3)$ при использовании второй пары B_2 и B_3 векторов во всевозможных сочетаниях из k ячеек в ОЗУ емкостью N бит определяется как

$$Q(B_1,B_3)=Q(B_2,B_3)=\binom{N}{k}+\sum_{i=1}^{k-1}\binom{N/2}{k-i}\binom{N/2}{i}. \quad (1)$$

Выражение (1) свидетельствует об одинаковой эффективности двух пар начальных состояний ОЗУ при его двукратном тестировании *MATS*+-подобными тестами, так как полнота покрытия сложных неисправностей ОЗУ пропорциональна количеству комбинаций $Q(B_i,B_j)$ [2]. Из этого можно заключить, что вектор B_3 одинаково отличен (удален) как от вектора B_1, так и от вектора B_2 в смысле качества двухкратных тестов ОЗУ. Поэтому мера различия между векторами должна принимать одинаковые значения для B_1 и B_3, а также для B_2 и B_3.

В качестве примера рассмотрим ОЗУ емкостью N=8 бит и B_1=00000000, тогда B_2=11111111 и B_3=11110000. Для данного примера результаты вычисления $S_{qg}(B_i,B_j)$ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения величин $S_{qg}(B_i,B_j)$

$S_{qg}(B_1,B_3)$				$S_{qg}(B_2,B_3)$			
S_{00}	S_{01}	S_{10}	S_{11}	S_{00}	S_{01}	S_{10}	S_{11}
N/2=4	N/2=4	0	0	0	0	N/2=4	N/2=4

Характеристики различия $D_n(B_i,B_j)$, где $n\in\{1,2,3,\ldots,8\}$, представляют собой порядковый номер характеристики (см. табл. 1) и для пар векторов B_1,B_3 и B_2,B_3 принимают следующие численные значения (табл. 3).

Таблица 3

Значения характеристик различия $D_n(B_i,B_j)$

B_i,B_j	$D_1(B_i,B_j)$	$D_2(B_i,B_j)$	$D_3(B_i,B_j)$	$D_4(B_i,B_j)$
B_1,B_3	1	1	1/2	0/0
B_2,B_3	1/2	1/3	1/2	0/0
B_i,B_j	$D_5(B_i,B_j)$	$D_6(B_i,B_j)$	$D_7(B_i,B_j)$	$D_8(B_i,B_j)$
B_1,B_3	1	1/2	2/3	1
B_2,B_3	1/2	1/2	2/3	2/3

Как видно из табл. 3, характеристика $D_4(B_i,B_j)$ дает неопределенное значение своей величины и соответственно не может быть использована для выбора оптимальных сочетаний начальных состояний тестируемого ОЗУ при многократном применении маршевых тестов ОЗУ. Аналогично из списка мер оценки оптимальных пар векторов необходимо исключить $D_1(B_i,B_j)$, $D_2(B_i,B_j)$, $D_5(B_i,B_j)$ и $D_8(B_i,B_j)$, так как для двух одинаково эффективных пар векторов B_1,B_3 и B_2,B_3 значения этих характеристик различны, что не позволяет применять их в качестве меры различия. Отметим, что ранее уже были отклонены характеристики *Correlation* и *Yule*. Только две характеристики, а именно *Rogers–Tanmoto* и *Sokal–Michener*, позволяют адекватно оценить меру различия двоичных векторов, представляющих собой начальное состояние ОЗУ, с точки зрения обнаруживающей способности кодочувствительных неисправностей многократными маршевыми *MATS*+-подобными тестами.

Принимая во внимание, что $S_{10}(B_i,B_j)+S_{01}(B_i,B_j)$ представляет собой Хэммингово расстояние (*Hamming Distance*) $HD(B_i,B_j)$ [15] между векторами B_i и B_j, характеристики *Sokal–Michener* и *Roers–Tanmoto* можно представить как

$$D_{Sokol-Michener}(B_i, B_j) = 1 - \frac{S_{11} + S_{00}}{N} = 1 - \frac{N - (S_{01} + S_{10})}{N} = \frac{HD(B_i, B_j)}{N}; \quad (2)$$

$$D_{Rogers-Tanmoto}(B_i, B_j) = \frac{2S_{01} + 2S_{10}}{S_{00} + S_{11} + 2S_{01} + 2S_{10}} = \frac{2HD(B_i, B_j)}{N + HD(B_i, B_J)}. \quad (3)$$

Проведенный анализ показывает возможность использования характеристик *Sokal-Michener* и *Rogers-Tanmoto* в качестве меры различия между векторами начального состояния ОЗУ, так как на их основе оказывается возможным получить объективную оценку эффективного их сочетания. Кроме того, выражения (2) и (3) свидетельствуют о работоспособности расстояния Хэмминга $HD(B_i,B_j)$ как меры различия двоичных векторов для случая выбора оптимальных начальных состояний ОЗУ при их тестировании *MATS*+-подобными тестами. Эффективность применения расстояния Хэмминга экспериментально была показана в [12] для случая многократного тестирования ОЗУ. Так, например, для четырехкратного тестирования ОЗУ тестами типа *MATS*+ наибольший процент обнаруживаемых кодочувствительных неисправностей достигается при использовании начальных состояний ОЗУ, удовлетворяющих следующему утверждению.

Утверждение 1. *В случае четырехкратного тестирования ОЗУ тестом, генерирующим только одно состояние в k соседних ячейках ОЗУ, оптимальные векторы начального состояния ОЗУ* B_i, B_j, B_l *и* B_r, *где* $i \neq j \neq l \neq r \in \{1,2,\ldots,2^N\}$, *должны удовлетворять следующему равенству:* $HD(B_i,B_j)=HD(B_i,B_l)=HD(B_l,B_j)=HD(B_i,B_r)=HD(B_j,B_r)=HD(B_l,B_r)=2N/3$, *где N – объем ОЗУ.*

Для подтверждения приведенного выше утверждения были получены экспериментальные значения покрывающей способности *PNPSF*3 для N=9 и *MATS*+-подобных тестов (табл. 4).

Таблица 4

Экспериментальные результаты для N=9

B_i, B_j, B_l и B_r	$HD(B_i,B_j)$, $HD(B_i,B_l)$, $HD(B_l,B_j)$, $HD(B_i,B_r)$, $HD(B_j,B_r)$, $HD(B_l,B_r)$	*FC*_4*runMATS*+(*PNPFS*3), %
000000000, 111111000, 000111111, 111000111	6, 6, 6, 6, 6, 6	49, 1
000000000, 111111111, 000000111, 110000011	9, 3, 4, 6, 5, 3	42,3
000000000, 111111111, 000000111, 000001100	9, 3, 2, 6, 7, 4	40,2
000000000, 000001111, 000000111, 000000001	4, 3, 1, 1, 3, 2	28,1

Как видно из приведенных данных, наибольшая эффективность обнаружения кодочувствительных неисправностей *PNPSF*3 достигается при максимальном минимальном значении Хэммингова расстояния, равном $2N/3$, между любой парой начальных состояний ОЗУ. Нормированные значения характеристик различия *Sokal-Michener* и *Rogers-Tanmoto* соответственно равняются 2/3 и 4/5.

Более сложная ситуация наблюдается для случая векторов, элементами которых являются многозначные величины.

3. Характеристики различия и подобия для многозначных векторов

Как отмечалось ранее, при тестировании ОЗУ для достижения высокой покрывающей способности кодочувствительных неисправностей использовался подход, основанный на многократном тестировании [16]. Оптимальный набор адресных последовательностей $A_i=A_i(0)A_i(1)A_i(2)\ldots A_i(N-2)\ A_i(N-1)$, $A_i(j) \in \{0,1,2,\ldots,N-1\}$, $j \in \{0,1,2,\ldots,N-1\}$, для многократного применения маршевых тестов должен обеспечивать эффективное обнаружение кодочувствительных неисправностей. С этой точки зрения при очередном применении маршевого теста его адресная последовательность должна максимально отличаться от адресных последовательностей тестов, примененных на предыдущих тестовых сессиях, т. е. должна быть максимально отличной (удаленной) от предыдущей адресной последовательности. Только в этом случае будет активизироваться и соответственно обнаруживаться большее число кодочувствительных неисправностей, не обнаруженных при предыдущих итерациях применения маршевого теста.

Часто на практике в качестве меры расстояния используется расстояние Евклида (*Euclidean Distance*), вычисляемое как корень квадратный из суммы квадратов разностей координат (элементов) двух многозначных векторов [17]. Более общей мерой расстояния (различия) является расстояние Минковского (*Minkowski Distance*), вычисляемое согласно выражению

$$D_{Minkowski}(A_i, A_j) = \sqrt[\lambda]{\sum_{l=0}^{N-1} \left| A_i(l) - A_j(l) \right|^{\lambda}}. \tag{4}$$

Для λ=2 расстояние Минковского является расстоянием Евклида, при λ=∞ – расстоянием Чебышева (*Chebyshev Distance*), а при λ=1 принимает вид арифметического расстояния, либо, что то же самое, Манхэттенского расстояния (*Manhattan Distance* или *City Block Distance*) [18]:

$$D_{Manh.}(A_i, A_j) = \sum_{l=0}^{N-1} \left| A_i(l) - A_j(l) \right|. \tag{5}$$

Развитием меры Манхэттенского расстояния являются его взвешенные модификации, такие, как *Canberra Distance*, для которой вычисляется сумма взвешенных модулей разностей координат двух векторов, и *Bray Curtis Distance*, определяемая как взвешенная сумма модулей разностей координат [18]. Реже применяются меры различия, основанные на корреляционной зависимости, такие как *Angular Distance* и *Correlation Distance*, используемые чаще всего как метрики подобия [17].

Таким образом, в качестве меры различия $D(A_i,A_j)$ адресных последовательностей используем арифметическое расстояние (5), позволяющее определить набор адресных последовательностей, которые имеют максимальное отличие между собой, и характеризующееся следующими достоинствами:

1. Расстояние Минковского, частным случаем которого является арифметическое расстояние (5), как правило, используется как мера различия, а не как мера подобия между объектами [18].

2. Вычислительная сложность получения численных оценок метрики (5) относительно невысока.

3. Эффективность использования данной характеристики доказана экспериментально для случая адресных последовательностей ОЗУ [16].

Очевидно, что для достижения максимальной полноты покрытия кодочувствительных неисправностей в результате многократного применения маршевых тестов необходимо, чтобы адресные последовательности, применяемые для каждого прохода, имели максимально возможные отличия друг от друга. Это в простейшем случае означает, что на одной и той же позиции двух последовательностей адресов должны быть значения, максимально отличные друг от друга. Подобное требование реализовывалось в классических маршевых тестах [2], когда в сопряженных фазах теста применялись возрастающая $A_{incr.}$=000…00, 000…01, 000…10, … , 111…11 (в десятичной системе счисления: 0, 1, 2, … ,2^m−1) и убывающая A_{decr}=111…11, 111…10, 111…01, …, 000…00 (2^m–1, 2^m–2, 2^m–3, … , 0), где $N=2^m$, последовательности адресов. Доказано, что данное сочетание адресных последовательностей является оптимальным с точки зрения покрывающей способности кодочувствительных неисправностей [2, 3, 5]. Рассматривая случай двухкратного тестирования ОЗУ, когда последовательно применяются адресные последовательности A_{incr} и A_{decr}, метрика различия принимает максимальное значение, которое определяется выражением [16]

$$D_{MAX}(A_{incr.}, A_{decr.}) = \sum_{i=0}^{2^m-1} \left| 2^m - 2i - 1 \right| = 2^{2m-1} = \frac{N^2}{2}. \quad (6)$$

Для случая, когда адресная последовательность A_j сформирована путем инверсии некоторых разрядов a_l, $l \in \{1,2,\ldots,m\}$, кода, представляющего собой адреса $A_i=a_1a_2a_3\ldots a_m$ ОЗУ емкостью $N=2^m$ бит, получены точные аналитические значения $D_{Manh}(A_i,A_j)$ [16]. Если $A_j=a_1a_2a_3\ldots a_{j-1}\, a_j{*}a_{j+1}^{\lambda j+1}\ldots a_{m-1}^{\lambda m-1}a_m^{\lambda m}$, то $D_{Manh}(A_i,A_j)=2^{2m-j}$. Максимальное значение величины $D_{MAX}(A_{incr},A_{decr})=N^2/2$ является ориентиром для формирования пар A_i, A_j оптимальных адресных последовательностей. Чем ближе значение $D_{Manh}(A_i,A_j)$ к величине $N^2/2$, тем более удаленными (различными) являются последовательности A_i и A_j, и соответственно значение полноты покрытия кодочувствительных неисправностей будет ближе к максимально возможному значению. Данное утверждение согласуется с экспериментальными данными для полноты покрытия *FC*(*PPSF*5) неисправностей *PPSF*5 двухкратным тестом *MATS*+ при различных модификациях исходной адресной последовательности A_i (табл. 5). Модификации последовательности A_i для ОЗУ емкостью 2^6 бит выполнялись путем инверсии разрядов $a_1a_2a_3a_4a_5a_6$ кода последовательных адресов.

Таблица 5

Полнота покрытия *FC*(*PPSF*5) неисправностей *PPSF*5

A_j	$a{*}_1a_2a_3a_4a_5a_6$	$a_1a{*}_2a_3a_4a_5a_6$	$a_1a_2a{*}_3a_4a_5a_6$
$D_{Manh}(A_i,A_j)$	2048	1024	512
$D(A_i,A_j)$	1	0,5	0,25
FC(*PPSF*5), %	6,035	5,335	4,455
A_j	$a_1a_2a_3a{*}_4a_5a_6$	$a_1a_2a_3a_4a{*}_5a_6$	$a_1a_2a_3a_4a_5a{*}_6$
$D_{Manh}(A_i,A_j)$	256	128	64
$D(A_i,A_j)$	0,125	0,0625	0,03125
FC(*PPSF*5), %	3,845	3,495	3,100

Приведенные результаты подтверждают работоспособность выбранной меры, определяющей отличие адресных последовательностей. Чем больше значение данной метрики $D_{Manh}(A_i,A_j)$ и ее нормированного значения $D(A_i,A_j)=D_{Manh}(A_i,A_j)/D_{MAX}(A_i,A_j)$, тем больше полнота покрытия кодочувствительных неисправностей.

Заключение

В настоящей работе показано, что оценкой, которая позволяла бы оценивать векторы начального состояния памяти ОЗУ с точки зрения их эффективности при многократном тестировании памяти, являются две из восьми рассмотренных характеристик различия векторов *Rogers–Tanmoto* и *Sokal–Michener*, а также Хэммингово расстояние между векторами. Для оценки эффективности адресных последовательностей с целью получения наибольшей покрывающей способности при тестировании ОЗУ целесообразно применять расстояние Минковского, которое при $\lambda=1$ принимает вид арифметического расстояния. В этом случае вычислительная сложность получения численных оценок метрики (5) относительно невысока. Эффективность применения данных метрик была доказана экспериментально.

Список литературы

1. Кулямин, В.В. Комбинаторика слов и построение тестовых последовательностей / В.В. Кулямин // Труды ИСП РАН. – 2004. – № 8(1). – С. 25–40.

2. Goor, A.J. Testing Semiconductor Memories, Theory and Practice / A.J. Goor. – UK, Chichester: John Wiley & Sons, 1991. – 487 с.

3. Chakraborty, K. Fault-Tolerance and Reliability Techniques for High-Density Random-Access Memory / K. Chakraborty, P. Mazumder. – Prentice Hall, 2002. – 424 p.

4. Hartman, A. Problems and Algorithms for Covering Arrays / A. Hartman, L. Raskin // Discrete Mathematics. – 2004. – № 284. – P. 149–156.

5. Cockburn, B. Tutorial on Semiconductor Memory Testing / B. Cockburn // JETTA. – 1994. – Vol. 5, № 4 – P. 321–336.

6. Hayes, J.P. Testing memories for single cell pattern sensitive fault / J.P. Hayes // IEEE Trans. on Computers. – 1980. – Vol. 29, № 2. – P. 249–254.

7. Franklin, M. Testing reconfigured RAM's and scrambled address RAM's for pattern sensitive faults / M. Franklin, K.K. Saluja // IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits. – 1996. – Vol. 15, № 9. – P. 1081–1087.

8. Nicolaidis, M. Theory of transparent BIST for RAMs / M. Nicolaidis // IEEE Trans. on Computers. – 1996. – Vol. 45, № 10. – P. 1141–1156.

9. Karpovsky, M.G. Pseudo-Exhaustive Word-Oriented DRAM Testing / M.G. Karpovsky, V.N. Yarmolik, A.J. Goor // Proc. EUROTEST Conference. – Munchen, Germany, 1995. – P. 126–132.

10. Yarmolik, S.V. Memory Address Generation for Multiple Run March Tests with Different Average Hamming Distance / S.V. Yarmolik, V.N. Yarmolik // Proc. of IEEE East-West Design & Test Workshop (EWDTW'06). – Sochi, Russia, 2006. – P. 212–216.

11. Yarmolik, S.V. Optimal Memory Address Seeds for Pattern Sensitive Faults Detection / S.V. Yarmolik, B. Sokol // Proc. of IEEE Workshop on Design и Diagnostics of Electronic Circuits and Systems (DDECS'2006). – Prague, Czech Republic, 2006. – P. 220–221.

12. Yarmolik, S.V. Multi background memory testing / S.V. Yarmolik, I. Mrozek // Proc. of the 14th International Conference Mixed design of integrated circuits and systems (MIXDES'07). – Ciechocinek, Poland, 2007. – P. 511–516.

13. Tubbs, J.D. Note on binary template matching / J.D. Tubbs // Pattern Recognition. – 1989. – Vol. 22, № 4. – P. 359–356.

14. Zhang, B. Binary vector dissimilarities for handwriting identification / B. Zhang, S.N. Srihari // Proc. SPIE, Document Recognition и retrieval X. – Santa Clara, California, USA, 2003. – P. 155–166.

15. Мак-Вильямс, Ф.Д. Теория кодов, исправляющих ошибки / Ф.Дж. Мак-Вильямс, Н.Дж. Слоэн; пер. с англ. – М.: Связь, 1979. – 744 с.

16. Ярмолик, В.Н. Многократные неразрушающие тесты с изменяемыми адресными последовательностями / В.Н. Ярмолик, С.В. Ярмолик // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 4. – С. 126–137.

17. Linear Time Euclidean Distance Transform Algorithms / H. Breu [et al.] // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1995. – Vol. 1, № 5. – P. 529–533.

18. Thompson, A.C. Minkowski Geometry / A.C. Thompson. – Cambridge, N.-Y., 1996. – 364 p.

Поступила 25.03.08

[1]Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники,
Минск, П. Бровки, 6
e-mail: yarmolik@cosmostv.by,
yarmolik10ru@yahoo.com

[2]Белорусский государственный университет,
Минск, пр.Независимости, 4
e-mail: kurb@unibel.by

S.V. Yarmolik, A.N. Kurbatski, V.N. Yarmolik

DISSIMILARITY MEASURE ANALYSIS FOR RANDOM ACCESS MEMORY TESTING

Dissimilarity and Similarity measures for optimal backgrounds and address sequence selection within the framework of multi run random access memory (RAM) testing have been analyzed. The efficiency of *Rogers–Tanmoto* and *Sokal–Michener* dissimilarity measures has been shown and experimentally validated. Both characteristics can be considered as the normalized *Hamming distance* between two binary vectors for two memory backgrounds. The address sequence selection to achieve a high level of memory faults detection should be done on the basis of *Minkowski Distance*.