

Тестово-кодовая коррекция ошибок устройств хранения информации измерительных систем

А. А. ПАВЛОВ¹, А. А. БУРМИСТРОВ¹, А. Н. ЦАРЬКОВ², Д. А. КОРСУНСКИЙ²,
Д. Е. СОРОКИН², С. С. НЕУСТРОЕВ³, И. В. РОБЕРТ³

¹ Военная академия ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого, Серпухов, Россия, e-mail: svi-rv@mail.ru,

² Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики», Серпухов, Россия, e-mail: info@iifrf.ru,

³ Институт управления образованием Российской академии образования Москва, Россия, e-mail: iuorao.ru.

Предложен метод тестово-кодовой коррекции ошибок оперативных запоминающих устройств. Для обнаружения возникающих ошибок использован линейный код, а выявление скрытых ошибок, определение конфигурации (ошибочных разрядов) кратной ошибки и её коррекция проводятся по результатам анализа ответной реакции после тестового воздействия.

Ключевые слова: корректирующий линейный код, корректирующий циклический код, одиночные и двойные ошибки, скрытая ошибка, поправка на скрытую ошибку, тестовый вектор ошибок.

A technique of test-code correcting of RAM errors is suggested. To detect errors a linear code is used, and the revealing of hidden errors, identification of configuration (erroneous bits) which is times the error, and its correction are carried out on the basis of the analysed response after the test effect.

Key words: correcting linear code, correcting cyclic code, single and double errors, latent error correction for hidden bugs, test error vector.

Измерительные системы (ИС), в отличие от отдельных измерительных приборов с ограниченными функциональными возможностями, имеют в составе ЭВМ, которая осуществляет централизованное автоматизированное (автоматическое) управление объектом исследования, процессом измерения и обработкой информации [1].

Устройства хранения информации современных ИС, в частности оперативные запоминающие устройства (ОЗУ), характеризуются отказоустойчивостью и достоверностью функционирования [2]. Для повышения этих показателей на этапе разработки данных устройств необходимо выбрать методы, способные обеспечить обнаружение и корректировку ошибок требуемой кратности, наименьшие аппаратные затраты схем обнаружения и коррекции ошибок, а также высокую вероятность безотказной работы, снижение временных затрат на коррекцию ошибок и влияние средств контроля на быстродействие контролируемого устройства.

Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют корректирующие коды, обнаруживающие и исправляющие ошибки. Применение корректирующих кодов, в отличие от структурных методов резервирования, позволяет решать указанные задачи при меньшем количестве резервного оборудования. При этом целесообразно использовать линейные корректирующие коды, потому что циклические требуют больше времени на кодирование и декодирование информации [2, 3]. К недостаткам использования корректирующих кодов следует отнести информационную избыточность, т. е. избыточное число контрольных разрядов для коррекции ошибок заданной кратности и методическую ошибку декодирования, характерную для всех методов резервирования. В декодирующих устройствах реализован вероятностный подход «максимума правдоподобия», когда на $(2n-1)$ возможных ошибок приходится $2r$ значений синдромов, где $n = k+r$, k , r —

соответственно количество информационных и контрольных разрядов. Таким образом, на каждую корректируемую ошибку приходится $(2n-1)/(2m)$ одинаковых значений синдромов, где m — число корректируемых ошибок.

Достоинство алгоритмической (тестовой) коррекции заключается в возможности исправления ошибок произвольной кратности без увеличения информационной избыточности [4]. Алгоритмическая коррекция ошибок ОЗУ предполагает такие операции, как перезапись слова памяти в инверсном коде, сложение по mod2 прямого и инверсного значений слов памяти (формирование вектора ошибки), а также сложение инверсного результата суммирования с прямым значением слова памяти. Недостаток тестовой коррекции ошибок — ошибочная коррекция при скрытой ошибке.

Рассмотрим пример. Пусть $Y = 01101$ — безошибочное слово; $Y_{\text{ош}} = 01101^*$ (скрытая константная ошибка в пятом разряде); $\bar{Y}_{\text{ош}} = 10011$ — результат записи инверсного значения; $C_{\text{mod}2} = Y_{\text{ош}} \oplus \bar{Y}_{\text{ош}} = 11110$; $B = 00001$ — вектор ошибки; $Y_k = 01100^*$ — ошибочная коррекция. Для правильной коррекции (формирования правильного значения вектора ошибки) необходимо выявить скрытые ошибки и составить матрицу поправок, содержащую 2^k строк из k -разрядных значений поправок на скрытую ошибку. Это требует больших аппаратных затрат на построение декодирующего устройства, что ограничивает практическое применение метода.

Устранить указанные недостатки позволит организация тестово-кодовой коррекции ошибок, которая позволяет использовать синдром ошибки линейного кода и ответную реакцию, полученную после подачи тестового воздействия, для обнаружения и исправления возникающих ошибок.

Методический подход тестово-кодовой коррекции ошибок обеспечивает требуемую достоверность функциониро-

вания отказоустойчивых ОЗУ и основан на следующих положениях.

Гипотеза 1. Если для организации тестово-кодовой коррекции ошибок использовать линейный код, обнаруживающий ошибки требуемой кратности и с минимальной информационной избыточностью, то потребуются минимальные аппаратные затраты для хранения контрольных разрядов слов памяти.

Гипотеза 2. Если информационные разряды слова памяти разбить на w блоков информации (по b разрядов в каждом блоке), корректировать ошибки заданной кратности в одном блоке и обнаруживать ошибки, возникающие в произвольном числе блоков, то потребуются матрица поправок, содержащая 2^b строк из $(b+r)$ -разрядных значений поправок на скрытую ошибку. Это позволит существенно уменьшить аппаратные затраты на построение декодирующего устройства.

Опыт эксплуатации дискретных устройств показывает, что наиболее вероятно возникновение одиночных и двойных ошибок, т. е. на одиночные ошибки приходится 80—85 %, двойные — 20—25 %, ошибки прочей кратности — до 2 % [2]. Поэтому необходимо разработать научно-методический аппарат для тестово-кодowego обнаружения и коррекции одиночных и двойных ошибок (требуемый процент увеличения информационной, аппаратной и временной избыточности. Для решения этой задачи вычислим достоверность функционирования ОЗУ ИС:

$$D(t) = D_{\text{тр}}(t)/K_1; K_2 = K_{2\text{тр}}, C_{\text{мин}}, r_{\text{мин}}, t_{\text{т мин}},$$

где $D_{\text{тр}}(t)$ — требуемая достоверность функционирования устройства при организации тестово-кодовой коррекции ошибок; $K_1, K_2 = K_{2\text{тр}}$ — соответственно проценты коррекции одиночных и двойных ошибок (требуемый процент коррекции ошибок); $C_{\text{мин}}$ — минимальное количество аппаратных затрат на средства обнаружения и коррекции ошибок (по отношению к известным корректирующим кодам); $r_{\text{мин}}$ — минимальная информационная избыточность, т. е. минимальное число контрольных разрядов по отношению к известным кодам, корректирующим одиночные и двойные ошибки; $t_{\text{т мин}}$ — время подачи одного тестового воздействия.

Основные положения методики тестово-кодовой коррекции ошибок ОЗУ. Для сокращения информационной избыточности и аппаратных затрат на хранение значений поправок применим алгебраический линейный код, обнаруживающий одиночные и двойные ошибки и использующий два контрольных разряда [5—7]. Выбранный для контроля дискретной информации код реализует описанные ниже правила формирования двух основных контрольных разрядов (проверок).

Правило 1. Двоичный набор разбивается на блоки информации по три разряда в каждом блоке (число информационных разрядов кратно трём):

$$Y = x_1x_2x_3, y_1y_2y_3, \dots, z_1z_2z_3.$$

Правило 2. Контрольные разряды формируются по правилу

$$r_1 = x_1 \oplus x_2 \oplus y_1 \oplus y_2 \oplus \dots \oplus z_1 \oplus z_2;$$

$$r_2 = x_2 \oplus x_3 \oplus y_2 \oplus y_3 \oplus \dots \oplus z_2 \oplus z_3.$$

В результате получается кодовый набор

$$Y_k = x_1x_2x_3, y_1y_2y_3, \dots, z_1z_2z_3, r_1, r_2. \quad (1)$$

Если переданные контрольные разряды и сформированные относительно полученного двоичного набора неодинаковы, то присутствует ошибка.

Представленный линейный код позволяет обнаружить 100 % одиночных ошибок и, в зависимости от количества информационных разрядов, следующий процент двойных ошибок: $P_{06} = 75$; $P_{09} = 74,5$; $P_{012} = 74$; $P_{015} = 73$; $P_{018} = 72$; $P_{021} = 70$; $P_{024} = 69,5$; $P_{027} = 69$; $P_{060} = 67$ %, соответственно для 6-, 9-, 12-, 15-, 18-, 21-, 24-, 27-, 60-разрядного двоичных кодов. Следовательно, предложенный код имеет повышенную обнаруживающую способность, чем широко используемый для этих целей контроль по модулю три, который позволяет обнаружить лишь 50 % двойных ошибок и требует такого же числа контрольных разрядов при увеличенных временных затратах.

Каждому рабочему входному набору X_n соответствует кодовый набор (1). Вектор контрольных разрядов R является функцией информационных разрядов и определяется из правила кодирования информации выбранного кода:

$$R = \{r_1, r_2\} = f(x_1x_2x_3, y_1y_2y_3, \dots, z_1z_2z_3).$$

После приёма сообщения об информационных разрядах повторно формируется вектор контрольных разрядов R^n и определяется синдром ошибки $E_c = R \oplus R^n$.

Каждому рабочему входному набору X_n , обеспечивающему определенные значения сигналов в информационных и контрольных разрядах (1), поставим в соответствие тестовый набор $T_n = \{\bar{Y}_k, \bar{R}^n\} \Rightarrow Y_t$, порождающий противоположное значение сигналов в информационных и контрольных разрядах.

Определение 1. Инверсный результат суммирования значений информационных и контрольных разрядов (1), полученных на рабочем входном наборе с информационными и контрольными разрядами Y_t с тестового набора, будем считать тестовым вектором ошибки: $B = \bar{Y}_k \oplus Y_t$. Если ошибок нет,

то тестовый вектор ошибки принимает нулевые значения.

Определение 2. Кодирование блоков информационных разрядов тестового вектора ошибки b_{i1}, b_{i2}, b_{i3} по правилам рассматриваемого кода $r_{bi1} = b_{i1} \oplus b_{i2}$; $r_{bi2} = b_{i2} \oplus b_{i3}$ даёт код ошибки блоков тестовых разрядов $E_{i1}, E_{i2}, \dots, E_{in}$, где $E_{i1} = f(B_{i1})$ — коды ошибок i -блоков тестовых разрядов.

Определение 3. Ошибку, которая не проявляется на рассматриваемом входном рабочем наборе, будем называть скрытой.

Определение 4. Ошибочный кодовый набор будем называть «правильным», если он не содержит скрытых ошибок, и «неправильным» в противном случае.

Утверждение 1. Исправление «неправильного» ошибочного кодового набора на основе тестового вектора ошибки приводит к псевдокоррекции.

Доказательство. При подаче тестового воздействия, обеспечивающего противоположное значение информационных разрядов, обнаруживаются любые ошибки. В этом случае тестовый вектор ошибки указывает номера ошибочных информационных разрядов, в том числе и разрядов, содер-

жащих скрытые ошибки. Так как значения скрытых ошибок соответствуют рабочему входному набору, то их исправление на основе тестового вектора ошибки в свою очередь приведёт к ошибке в корректируемом кодовом наборе.

Следствие 1. Тестово-коддовая коррекция кратных ошибок возможна при условии выявления скрытых ошибок (формирования поправки к тестовому вектору ошибки).

Свойство 1. Матрица поправок тестово-коддового метода обнаружения и коррекции ошибок на основе линейного кода с двумя контрольными разрядами для i -го блока информации имеет вид

$$E_{pi} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}.$$

В этой матрице каждой скрытой ошибке поставим в соответствие значение поправки и соответствующий ей код адреса, где три разряда левой части матрицы определяют разряды вектора поправок, а два разряда правой части — код адреса поправки. Размерность данной матрицы (аппаратурные затраты на хранение поправок) значительно меньше, чем у матрицы поправок относительно всех информационных разрядов, что особенно проявляется при увеличении числа информационных разрядов.

Свойство 2. Результат суммирования синдрома ошибки и кода ошибки блоков тестовых разрядов определяет код адреса поправки на скрытую ошибку i -го блока информационных разрядов $E_{ki} = E_c \oplus E_{wi}$.

Правило 3. Для совокупности блоков информации 1, 2, 3, ..., w код адреса поправки на скрытую ошибку i -го блока информации определяют по правилу

$$E_{k1} = E_c \oplus E_{w1};$$

$$E_{k2} = E_c \oplus E_{w2};$$

$$\dots\dots\dots$$

$$E_{kw} = E_c \oplus E_{ww};$$

где $E_{w1}, E_{w2}, \dots, E_{ww}$ — коды ошибок i -х блоков тестовых разрядов.

Свойство 3. Каждому коду адреса поправок (правой группе элементов матрицы) соответствуют прямое и обратное значения разрядов вектора поправок

$$E_{pi} \Rightarrow \{c_1, c_2, c_3; \bar{c}_1, \bar{c}_2, \bar{c}_3\},$$

где c_i — прямое значение разряда вектора ошибки; $\bar{c}_i$ — инверсное значение разряда вектора ошибки.

Данное свойство вытекает из определения двойственного ошибочного кодового набора. Противоположным значениям ошибочного кодового набора соответствует одинаковое значение синдрома ошибки.

Следствие 2. Для выбора значений поправки необходимо сформировать признак поправки прямого или обратного значений её разрядов относительно рассматриваемого кода адреса.

Свойство 4. Поправка имеет обратное значение, если все значения разрядов вектора поправки совпадают со значениями соответствующих информационных разрядов тестового вектора ошибки, и прямое — в противном случае.

Следствие 3. При организации тестово-коддового метода коррекции ошибок вектор ошибки для i -го блока информационных разрядов имеет вид

$$\oplus \frac{b_{i1}b_{i2}b_{i3}}{E=e_1e_2e_3},$$

где $\tilde{c}$ — значение разряда прямого или обратного векторов поправки.

Правило 4. Стратегия декодирования включает следующие положения:

коррекция возможна, если контрольные разряды тестового вектора ошибки имеют нулевые значения;

при возникновении одиночных и двойных ошибок в одном блоке информационных разрядов и отсутствии ошибок в остальных блоках возможна коррекция, причём единичные значения сигналов имеет только один из блоков тестового вектора ошибок;

передача информационных разрядов осуществляется без коррекции, если тестовый вектор ошибки содержит нулевые значения в информационных и контрольных разрядах;

передача информационных разрядов без коррекции разрешается, если тестовый вектор ошибки содержит нулевые значения в информационных разрядах и единичные (ошибки) — в контрольных;

коррекция запрещается и формируется сигнал «Отказ устройства», когда все разряды i -го блока тестового вектора ошибки, соответствующие информационным разрядам, имеют единичные значения, т. е. существует 3-кратная ошибка, а также при единичных значениях сигналов одновременно в информационных и контрольных разрядах тестового вектора ошибки;

при возникновении скрытой ошибки вектор ошибки формируется путём добавления поправки к тестовому вектору ошибки.

Свойство 5. Тестово-коддовый метод обнаружения ошибок на основе линейного кода с двумя контрольными разрядами позволяет обнаружить все возможные ошибки в информационных и контрольных разрядах кодового набора.

Свойство 6. Тестово-коддовый метод коррекции ошибок на основе линейного кода с двумя контрольными разрядами позволяет корректировать одиночные и двойные ошибки в одном произвольном блоке информационных разрядов при условии отсутствия ошибок в других блоках.

Рассмотрим процедуру коррекции ошибок тестово-кодвым методом для информационного набора

$$Y = \{x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3\} \Rightarrow 000\,001.$$

В этом случае проверочные разряды имеют значения $r_1r_2 \Rightarrow 01$. Таким образом, кодовый набор передается в виде $Y_k = 000\,001\,01$.

Если ошибка не возникла, то инверсия значений разрядов кодового набора даст следующий тестовый набор:

$$Y_T = \{x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3\} \Rightarrow 11111010.$$

При поразрядном сложении по mod2 значений кодового и тестового наборов получится инверсное значение разрядов тестового вектора ошибки:

$$\bar{B} = 111\ 111\ 11.$$

Прямое значение тестового вектора ошибки имеет вид:

$$B = 000\ 000\ 00.$$

Согласно правилу декодирования (*Правило 4*), кодовый набор передается без коррекции. Действительное значение переданного кодового набора $Y_K = 000\ 001\ 01$ равно скорректированному значению кодового набора $Y_K^* = 000\ 001\ 01$ на основе тестового вектора ошибки, имеющего нулевые значения в информационных и контрольных разрядах.

Пусть при передаче сообщения возникла «правильная» ошибка в первом информационном разряде, обозначенная символом «*»: $Y_K^* = 1^*00\ 001\ 01$. Используя для данного случая полученные правила, запишем:

$$B = 100\ 000\ 00; E_C = 10; E_{i1} = 10;$$

$$E_{k1} = 00; E_{k2} = 00; C_1 = 000; E = 100\ 000.$$

Вектор ошибки равен тестовому вектору ошибки, указывающему на ошибку в первом информационном разряде.

Допустим, в кодовом наборе возникла «правильная» ошибка в первом информационном разряде и скрытая ошибка — во втором, причём скрытая ошибка помечена символом «+»:

$$Y_K^* = 1^*0^+0\ 001\ 01.$$

Тогда

$$B = 110\ 000\ 00; E_C = 10; E_{i1} = 01;$$

$$E_{k1} = 11; C_1 = 010; E = 100\ 000.$$

Так как обратное значение поправки $C = 101$, полученное из таблицы поправок по коду адреса поправок $E_{k1} = 11$ [8], не совпадает со значением третьего информационного разряда тестового вектора ошибки, то надо взять прямое значение поправки $C = 010$, потому что второй разряд тестового вектора ошибки тоже имеет единичное значение. Аналогичным образом происходит декодирование при возникновении ошибок произвольной кратности.

Заключение. Полученные научные результаты существенно отличаются от известных подходов в организации тестово-кодовой коррекции ошибок и превосходят по эффективности отечественные и зарубежные методы обеспечения отказоустойчивости и достоверности функционирования ОЗУ.

Предложенный метод тестово-кодовой коррекции ошибок даёт возможность:

корректировать 100 % одиночных ошибок, двойные ошибки в одном блоке информации (по три информационных разряда в каждом блоке), а также обнаруживать некорректируемые ошибки при использовании двух контрольных разрядов в отличие от известного метода тестово-кодовой коррекции [8—11]. Новый метод позволит более чем в три раза сократить информационную избыточность. Использование двух контрольных разрядов позволяет:

существенно сократить аппаратные затраты для хранения контрольных разрядов слова памяти в ОЗУ, особенно большой ёмкости; применить минимальную матрицу поправок размерностью 5×4 , в то время как для обычного алгебраического линейного кода, корректирующего одиночную ошибку и используемого в тестово-кодовой коррекции, потребуется матрица поправок размерностью $(2^{k+r} \times 2^k)/2$. Применение минимальной матрицы существенно снизит аппаратные затраты на её построение и обеспечит существенный выигрыш в вероятности безотказной работы резервированного ОЗУ [8—10].

В разработанном авторами методе тестово-кодовой коррекции ошибок ОЗУ сохранены все известные ранее достоинства коррекции ошибок. Использование метода позволяет исключить методическую ошибку декодирования, характерную для большинства устройств, где реализован метод «максимума правдоподобия», при котором ошибки разной кратности, но имеющие одинаковый синдром и принадлежащие одному смежному классу, корректируются исходя из кодового расстояния выбранного линейного кода. Рассмотренный метод даёт возможность:

обнаруживать скрытые ошибки;
минимизировать аппаратные затраты на построение декодирующего устройства, при этом не надо хранить таблицы синдромов ошибок;

свести к минимуму временные затраты на коррекцию ошибок, так как требуется подача лишь одного тестового воздействия, которое может подаваться только при обнаружении ошибок.

Л и т е р а т у р а

1. Куликовский К. Л., Купер В. Я. Методы и средства измерений. М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Щербак Н. С. Достоверность работы цифровых устройств. М.: Машиностроение, 1989.
3. Саголович Ю. Л. Кодовая защита оперативной памяти ЭВМ от ошибок // Автоматика и телемеханика. 1991. № 5. С. 4—40.
4. Коган Б. М., Мкртумян И. Б. Основы эксплуатации ЭВМ. М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. Павлов А. А., Павлов П. А., Царьков А. Н., Хоруженко О. В. Функционально-кодированный контроль ошибок в автоматизированных системах измерительной техники // Измерительная техника. 2009. № 9. С. 3—5.
6. Павлов А. А., Царьков А. Н., Хоруженко О. В., Павлов П. А. Метод контроля ошибок в устройствах хранения и передачи информации автоматизированных систем измерительной техники // Измерительная техника. 2010. № 11. С. 21—25.
7. Павлов П. А. Обнаружение и коррекция ошибок в устройствах хранения и передачи данных телекоммуникационных систем // Известия института инженерной физики. 2012. № 1 (23). С. 51—57.

8. Павлов А. А., Павлов Ал. А. Принципы построения отказоустойчивых микропроцессорных средств измерительной техники с апостериорной коррекцией кратных ошибок // Измерительная техника. 2000. № 4. С. 27—35.

9. Павлов А. А., Романенко Ю. А, Павлова А. А., Шандриков А. В. Тестово-кодированный метод обнаружения и коррекции ошибок оперативных запоминающих устройств специализированных ЭВМ // Контроль. Диагностика. 2001. № 8 (38). С. 14—17.

10. Павлов Ал. А., Павлов А. А., Павлов П. А., Царьков А. Н., Хоруженко О. В. Метод контроля ошибок в устройствах хранения и передачи информации автоматизированных систем измерительной техники // Измерительная техника. 2010. № 11. С. 3—32.

11. Пат. 211492 РФ. Отказоустойчивое оперативное запоминающее устройство / А. А. Павлов, А. В. Шандриков // Изобретения. Полезные модели. 2003.

Дата принятия: 20.10.2015.

ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.2.531.71

Цифровой растровый фотоэлектрический компаратор

В. Н. ЯНУШКИН, Ю. Б. КОЛЯДА, Н. Т. КРУШНЯК

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
Москва, Россия, e-mail: yura_kolyada@mail.ru

Рассмотрена возможность создания компаратора для поверки растровых решеток. В качестве образцового средства использована прецизионная растровая фотоэлектрическая экстремальная счётно-интерполяционная система измерений линейных перемещений с высокими показателями по точности, надёжности и быстродействию.

Ключевые слова: компаратор, поверка, растровая система, точность, надёжность, быстродействие.

The article discusses the possibility of creating a comparator for verification of raster grids. In an exemplary means proposed to use extreme precision photoelectric scanning countable interpolation linear displacement measurement system, which has high levels of accuracy, reliability and performance.

Key words: comparator, calibration, scanning system, accuracy, reliability, performance.

Современные требования к точности измерений линейных и угловых величин удовлетворяются в основном фотоэлектрическими методами и средствами. Применение растров в измерительной технике позволило по-новому решить многие задачи высокоточных измерений линейно-угловых перемещений в машиностроении, автоматизировать процесс, повысить точность, быстродействие и надёжность в этой области.

В подавляющем большинстве контрольно-измерительных устройств (до 90 %), входящих в измерительные системы координатных перемещений, использованы растровые фотоэлектрические преобразователи как наиболее полно отвечающие всем требованиям по точности и быстродействию [1]. В конструкции таких преобразователей включены плоские параллельно-линейные растровые решётки с одинаковой шириной штрихов и зрачков. При сопряжении в пространстве мелкопериодических растров формируется информационная периодическая шкала, погрешность шагов

которой в $\sqrt{n}$ раз меньше, чем у растров [2]. По этой шкале отсчитывают значения сдвигов при взаимном перемещении решёток в перпендикулярном направлении к штрихам. В зависимости от угла скрещивания штрихов сопрягаемых растров рассматривают муаровое или обтюрационное сопряжение растровых решёток, широко используемое при измерениях. При этом сопряжения растров имеют эффект оптического усиления (увеличения), описанный в 1874 г. Рэлеем:

$$G = g/[2 \sin (\varphi/2)],$$

где G, g — шаги комбинационных полос муаровой картины и растровых решёток, соответственно; φ — угол скрещивания штрихов растровых решёток.

Еще одно важное свойство растрового сопряжения, заключающееся в том, что «комбинация двух растров может оказаться чувствительным индикатором слабых сигналов», отмечено в [3].