

Методы обнаружения и исправления ошибок данных, основанные на нетрадиционном представлении результатов измерений образами-остатками

С. С. КУКУШКИН, А. С. СУПРУН

ОАО «Военно-инженерная корпорация»,
Москва, Россия, e-mail: npp-kedr@yandex.ru

Рассмотрены нетрадиционные методы обнаружения и исправления ошибок данных, передаваемых по каналам связи в условиях помех. Основу синтеза этих ошибок составляет математический аппарат прикладной теории конечных полей. На примере информационно-телеметрического обеспечения испытаний летательных аппаратов показана возможность использования этих методов для комплексного решения проблем телеизмерений.

Ключевые слова: передача данных, помехи, образы-остатки, инварианты, достоверность измерений.

Non-conventional methods for detecting and correcting errors of measurement data transmitted via communication channels having interferences are described, the basis of the synthesis of which is a mathematical tool of the applied theory of finite fields. An example of information-telemetry software testing of aircraft shows the possibility of their application for an integrated solution of the existing telemetry problems.

Key words: data transmission, interference images-the remains of the invariants, the accuracy of the measurements.

Метрологические измерения характеризуются большой представительностью выборки, тщательностью выполнения операций и учётом факторов, оказывающих влияние на результат [1—3]. Поэтому выборка, на получение которой временные затраты не ограничены, может считаться статистически однородной.

Однако эти условия не могут быть выполнены при технических измерениях в динамических системах, так как осуществляются в условиях множества ограничений, например, на время проведения измерений при лётных испытаниях летательных аппаратов (ЛА) [4]. Их отличительная особенность заключается в стремительном росте требований, предъявляемых к объёмам данных, получаемых в ходе таких экспериментов. Каждое испытание характеризуется различными внешними условиями, в которых оно проводится. К тому же возрастает доля измеряемых внутренних и внешних параметров, определяемых как уникальные, так как повторить их не представляется возможным. В настоящее время метрология не ориентирована на подобные ситуации, но количество руководящих документов, посвящённых аттестации результатов испытаний ЛА, постоянно увеличивается. Отмеченная парадигма наиболее чётко просматривается на примере информационно-телеметрического обеспечения (ИТО) испытаний ЛА.

Анализ основных причин низкой эффективности ИТО.

Традиционная метрология направлена на сведение к минимуму погрешностей измерений при обеспечении условий их стационарности и накопления большой выборки полученных данных. В условиях лётных испытаний ЛА этого достичь невозможно. Прежде всего, потому, что оператор, определяющий условия проведения измерений, при телеизмере-

ниях, проходящих в автоматическом режиме, из процесса исключается. Тогда единственное условие обеспечения адекватности получаемых результатов реальному состоянию объекта контроля заключается в использовании адаптивных принципов измерений [4—6]. Их основная задача — обеспечить требуемые условия автоматически, без участия человека, используя подстройку режимов функционирования телеметрических систем под изменившиеся условия формирования и передачи телеизмерений. Для этого необходимо выбрать временные интервалы измерений, близкие к стационарным. Кроме того, нужно использовать проблемно-ориентированные методы с пониженной чувствительностью к различным возмущающим факторам, порождающим погрешности измерений.

Основными ошибками телеизмерений являются:

не правильно выбранная шкала представления результатов, из-за чего наблюдается эффект, получивший название «зашкаливание значений телеметрируемых параметров»;

частота опроса телеметрируемых параметров, не соответствующая реальному значению, наблюдаемому в ходе лётных испытаний ЛА.

Одно из решений проблемы предполагает использование адаптивного опроса контролируемого параметра $x(t)$, но в этом случае существенно снижаются показатели надёжности, достоверности передачи, а также восстановления данных телеизмерений. Для их повышения нужно использовать помехоустойчивое кодирование [4], что приводит к увеличению объёмов передаваемых данных и уменьшению показателей оперативности.

Многие из показателей эффективности ИТО испытаний современных ЛА, приведённые на рис. 1, уже близки к пре-



Рис. 1. Основные показатели и характеристики информационно-телеметрического обеспечения испытаний летательных аппаратов

делам физической реализуемости на основе традиционных подходов. Поэтому требуются новые конструктивные теории, применение которых позволило бы найти методы разрешения существующих противоречий. От многих классических теорий они отличаются не только возможностью постановки новых задач, но и обеспечением их практической реализуемости.

К подобным теориям относится конструктивная теория конечных полей [4—6]. Её классический аналог — теория конечных полей Э. Галуа — одно из величайших достижений абстрактной математической мысли. Однако расширенному внедрению основных положений теории конечных полей мешают некоторые фундаментальные понятия, на которых была построена теория Э. Галуа, в частности «мультипликативно-обратная» величина.

Теоретические основы достижения нового комплексного положительного эффекта. Возможности одновременного удовлетворения противоречивых требований при существующем традиционном подходе ограничены. В ряде случаев подобные задачи уже нельзя решить на основе аппаратных средств, так как они не обладают требуемой гибкостью, а достигнутые характеристики близки к пределу физической реализуемости. Новые открытия, которые можно применять в измерительной технике, в настоящее время отсутствуют. Остаётся единственный резерв — реконструкция традиционно используемой системы счисления и применение новой конструктивной математической теории [5, 6].

Существующая позиционная система счисления имеет существенный недостаток: она является неоптимальной при передаче информации. Это проявляется в различном вкладе каждого символа слова, искажённого помехами, в результат приближения восстановленного сообщения к истинному значению. Например, в результате телеизмерений сформировано байтовое слово-измерение: $x_i = \langle 116 \rangle_{10} = \langle 0111.0100 \rangle_2$. Помеха с равной вероятностью может исказить любой двоичный символ этого слова. Предположим, что им оказался первый — самый младший символ: $\langle 0111.0101 \rangle_2$. Тогда можно получить восстановленное значение $x_i^* = \langle 0111.0101 \rangle_2 = \langle 117 \rangle_{10}$. Ошибка $\varepsilon = |x_i - x_i^*| = 1 = 2^0$.

Если же искажению подвергся старший символ слова, то $x_i^* = \langle 1111.0100 \rangle_2 = \langle 244 \rangle_{10}$ и ошибка уже составит $\varepsilon = |x_i - x_i^*| = 128 = 2^7$. Искажение любого другого j -го символа приведёт к ошибке $\varepsilon = 2^{j-1}$. Таким образом, основной недостаток традиционного представления данных заключается в неравномерном вкладе искажённых символов в получаемый результат телеизмерений $x_i^* = x_i + \varepsilon$.

В основу теории Галуа положена основная теорема арифметики, представленная в сжатом виде. Согласно этой теореме всякое число x можно представить в виде

$$x = ml + b, \quad (1)$$

где m — делитель (модуль); l — неполное частное от деления; b — остаток.

В терминах теории сравнений, являющейся системообразующей частью теории конечных полей, это утверждение можно представить как [4]:

$$x \equiv b \pmod{m}. \quad (2)$$

Выражение (2) является сжатой формой (1), так как отсутствует неполное частное l . На эффекте синтаксического сжатия, определяемого формулой (2), базируются методы безыбыточного помехоустойчивого кодирования. Математическую основу их синтеза составляет следующая система сравнений, имеющая порядок, равный двум ($i = 2$):

$$\left. \begin{aligned} x &\equiv b_1 \pmod{m_1}; \\ x &\equiv b_2 \pmod{m_2}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

При использовании традиционного избыточного помехоустойчивого кодирования увеличивается порядок систем сравнения. Например, он может быть равен трём ($i = 3$):

$$\left\{ \begin{aligned} x &\equiv b_1 \pmod{m_1}; \\ x &\equiv b_2 \pmod{m_2}; \\ x &\equiv b_3 \pmod{m_3}. \end{aligned} \right.$$

Однако при таком представлении для однозначного восстановления числа-сообщения x не существует информации о неполном частном l . Для его восстановления служат теоремы об остатках [4].

Теоремы об остатках — фундамент для многочисленных приложений модулярного представления чисел при решении задач, относящихся к областям вычислений и передачи информации. Идея применяемого при этом метода основана на представлении целых чисел $x \in Z$ остатками $b_i \in Z/(m_i; z)$, $i = 1, 2, \dots, k$, получающимися при делении на модули сравнения m_i и применении к этим остаткам той последовательности арифметических операций, которая первоначально должна применяться к числам x [4]. Это область простых полей Галуа — $GF(m)$. Основное понятие $GF(m)$ — сравнимость x по модулю m_i : $x \equiv b_i \pmod{m_i}$. Такая сравнимость является отношением эквивалентности на множестве целых

чисел Z , поскольку обладает свойствами рефлексивности, симметричности и транзитивности. При сравнении осуществляется разбиение множества Z на классы эквивалентности, называемые классами вычетов по модулю m_i . При этом любое число из класса вычетов называется вычетом по модулю m_i и связано отношением эквивалентности с любым другим числом из этого класса, а два числа из разных классов этим отношением не связаны. В результате сравнения при взаимно простых модулях $m_1, m_2, \dots, m_k$ получается отображение $\psi: \psi(n) = [\psi_1(n), \psi_2(n), \dots, \psi_k(n)]$ при всех $n \in Z$, где $\psi_i(n)$ — отображение из Z в Z/m_{iZ} , представляющее естественный гомоморфизм. При этом равенство $(b_1, b_2, \dots, b_n) = \psi(n)$, где b_i — вычеты по модулю m_i , выполняется тогда и только тогда, когда $\psi_i(n) = b_i, i = 1, 2, \dots, k$, а $n \equiv b_i \pmod{m_i}$. Теоремы об остатках гарантируют, что такое n существует. Известные алгоритмы восстановления, позволяющие выполнить обратный переход от модулярного представления результата вычислений к традиционному позиционному, основаны на китайской теореме об остатках и теореме Гарнера [4]. Китайская теорема об остатках имеет два формализованных представления:

$$x = \sum_{s=1}^k M_s M'_s b_s \left(\bmod \prod_{i=1}^k m_i \right);$$

$$x = \sum_{i=1}^k b_i M_i \varphi(m_i) \left(\bmod \prod_{i=1}^k m_i \right),$$

где $\prod m_i = M_s m_s; M'_s M'_s \equiv 1 \pmod{m_s}; i = 1; M'_s$ — мультипликативно-обратный элемент; где $\varphi(m_i)$ — функция Эйлера.

Из теоремы Гарнера следует алгоритм восстановления [4]:

$$x = \vartheta_k m_{k-1} + \dots + \vartheta_3 m_2 m_1 + \vartheta_2 m_1 + \vartheta_1,$$

где $\vartheta_1 = b_1; \vartheta_2 = (b_2 - \vartheta_1) C_{12} \pmod{m_2}; \vartheta_3 = [(b_3 - \vartheta_1) C_{13} - \vartheta_2] C_{23} \pmod{m_3}; \vartheta_k = [\dots (b_k - \vartheta_1) C_{1k} - \vartheta_2] C_{2k} - \dots - \vartheta_{k-1} \times C_{(k-1)k} \pmod{m_k}; C_{ij} m_i \equiv 1 \pmod{m_j}; C_{ij}$ — мультипликативно-обратный элемент.

Основные недостатки известных теорем об остатках: возможность использования только при взаимно простых модулях сравнения $(m_i, m_j) = 1$; необходимость нормализации результата вычислений, который можно найти как остаток

по модулям $m_i, i = 1, 2, \dots, k$ или произведению модулей $\prod_{i=1}^k m_i$;

сложность алгоритмов восстановления; значительное время вычислений.

Отмеченных недостатков лишена конструктивная теорема об остатках (КТО) [4]. Данная теорема приводит к следующему решению задачи. Пусть существует совокупность значений x , удовлетворяющих системе сравнений (3) и представляющих гомоморфизм $Z \rightarrow Z/m_{1Z} \oplus Z/m_{2Z}$. В данной системе $m_1 - m_2 = n$. Указанный гомоморфизм определяется многозвенным выражением адаптивной формулы:

$$x = \begin{cases} \left\{ m_1 \frac{\Delta}{n} + b_1, \Delta = b_1 - b_2 \geq 0, m_1 < m_2 \right\} n \mid \Delta; \\ \left\{ m_1 \left(m_2 + \frac{\Delta}{n} \right) + b_1, \Delta < 0 \right\} n \mid \Delta; \\ m_1 \frac{(m_2 + \Delta)}{n} + b_1, \Delta < 0, \Delta > 0, n \nmid \Delta, n \mid (m_2 + \Delta); \\ m_1 \frac{[m_2 - (m_2 - \Delta)]}{n} + b_1, \Delta < 0, \Delta > 0, n \nmid \Delta, n \mid (m_2 - \Delta); \\ m_1 \frac{(2m_2 + \Delta)}{n} + b_1, \Delta < 0, \Delta > 0, n \nmid \Delta, n \mid (2m_2 + \Delta); \\ m_1 \frac{[m_2 - (2m_2 - \Delta)]}{n} + b_1, \Delta < 0, \Delta > 0, n \nmid \Delta, n \mid (2m_2 - \Delta); \\ \dots\dots\dots \\ (2k+1)m_1 \frac{(km_2 + \Delta)}{n} + b_1, \Delta < 0, \Delta > 0, n \nmid \Delta, n \mid (km_2 + \Delta); \\ (2k+2)m_1 \frac{[m_2 - (km_2 - \Delta)]}{n} + b_1, \Delta < 0, \Delta > 0, n \nmid \Delta, n \mid (km_2 - \Delta), \end{cases} \quad (4)$$

где m_i — модули сравнения; b_i — образы-остатки; $n = |m_1 - m_2|$ — абсолютная разность между модулями сравнения.

Приведённые обозначения $n \mid \Delta; n \mid (km_2 \pm \Delta), k = 0, 1, \dots$ читаются как Δ делится на n без остатка и $(km_2 \pm \Delta)$ делится на n без остатка, соответственно. Обозначение $n \nmid \Delta$ трактуется как Δ делится на n с остатком, не равным нулю.

Алгоритм КТО является адаптивным, так как количество его звеньев $(K = n + 1)$, которые необходимо использовать для восстановления данных в традиционном виде, определяется числом $n = |m_1 - m_2|$. Значение коэффициента k , обеспечивающее делимость $n \mid (km_2 + \Delta)$ или $n \mid (km_2 - \Delta)$, определяется Δ .

Например, если $n = 1$ и выполняется делимость вида $n \mid \Delta$, то необходимо использовать только два звена формулы (4):

$$x = \begin{cases} m_1 \frac{\Delta}{n} + b_1, \Delta = b_1 - b_2 \geq 0, m_1 < m_2; \\ m_1 \left(m_2 + \frac{\Delta}{n} \right) + b_1, \Delta < 0. \end{cases}$$

При абсолютной разности, равной $2(|m_1 m_2| 2)$, для получения однозначного результата в выражение, описывающее алгоритм восстановления с использованием КТО, нужно добавить ещё одну вычислительную структуру в виде звена

$$x = \begin{cases} \left\{ m_1 \frac{\Delta}{n} + b_1, \Delta = b_1 - b_2 \geq 0, m_1 < m_2; \right\} n \mid \Delta; \\ \left\{ m_1 \left(m_2 + \frac{\Delta}{n} \right) + b_1, \Delta < 0 \right\} n \mid \Delta; \\ m_1 \frac{(m_2 + \Delta)}{n} + b_1, \Delta < 0, \Delta > 0, n \mid (m_2 + \Delta). \end{cases}$$

Применение алгоритмов КТО для декодирования (восстановления) данных повышает эффективность вычислений, связанных с передачей и защитой информации. Данные предполагается восстанавливать в виде $x_i = m_i l_i + b_i$.

Кроме меньшей сложности, определяемой размерностью n , приведённый алгоритм не связан с требованием жёсткого выполнения условий взаимной простоты m_1, m_2 .

Нетрадиционное представление результатов измерений образами-остатками. Если перейти к нетрадиционному представлению результатов измерений их образами-остатками $x \equiv b_i \pmod{m_i}$, то при той же разрядности передаваемых данных можно создать принципиально новую избыточ-

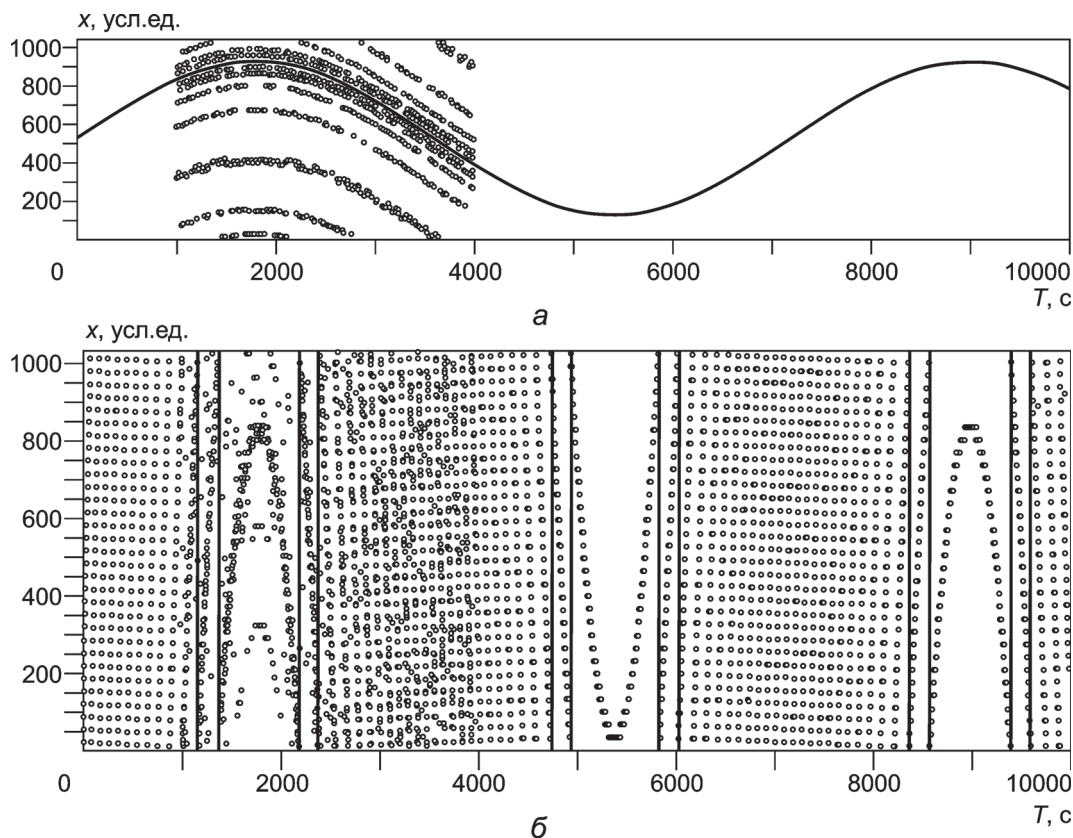


Рис. 2. Восстановленные результаты телеизмерений при их представлении традиционным позиционным кодом с имитацией искажения помехой принятых значений на временном интервале 1000—4000 (а) и образами-остатками (б) (вертикальными линиями выделены видимые графические фрагменты с признаками инвариантности в виде групповых свойств равноостаточности)

ность символов кода. Если ранее она представляла проверочные символы помехоустойчивого двоичного кода, то новое (закодированное) значение x_n не предполагает их введение. Для введения избыточности используются внутренние резервы при представлении данных двумя и более образами-остатками b_i , $i = 2, 3, 4$. При этом возможен вариант при $i = 2$, когда новое представление может не требовать увеличения разрядной сетки данных. Пример такого преобразования приведён на рис. 2, а где представлен телеметрируемый параметр $x(k\Delta T)$. Причём ΔT — интервал дискретизации, выбранный в соответствии с теоремой В. А. Котельникова, $k = 1, 2, \dots$ — счётное множество. Телеметрируемый параметр $x(k\Delta T)$ передаётся традиционным позиционным двоичным кодом с имитацией его искажения в радиоканале помехой на одном из временных участков передачи телеметрической информации. На рис. 2, б представлен тот же телеметрируемый параметр, принятый на фоне тех же по-

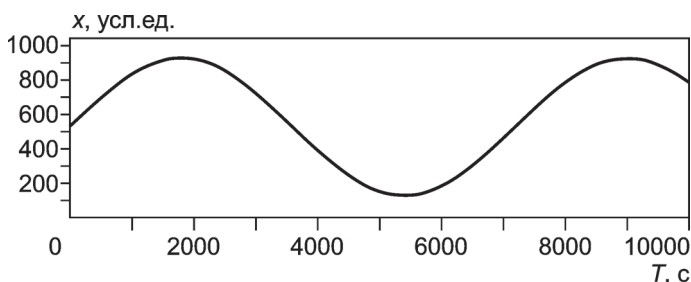


Рис. 3. Результаты обнаружения и исправления ошибок телеизмерений при предлагаемом нетрадиционном безызыточном кодировании с использованием образов-остатков

мех, что и ранее (см рис. 2, а), но при использовании предложенного дополнительного кодирования его значений образами-остатками. При этом разрядность представления слов-измерений осталась прежней, равной 10 ($2n = 10$), о чём свидетельствует шкала передачи $\mathcal{W}_n = [0 - (2^n - 1)] = (0 - 1023)$.

Выбранные модули сравнения: $m_1 = 2^n - 1 = 31$, $m_2 = 2^n + 1 = 33$. Они являются оптимальными, поскольку произведение $m_1 \times m_2 = 1023$. Следовательно, при их выборе перекрывается вся первоначальная шкала представления данных $\mathcal{W}_n = [0 - (2^n - 1)] = (0 - 1023)$. В результате дополнительного кодирования было сформировано кодовое расстояние d , характеризующее обнаруживающую и исправляющую способность кода. Оно увеличилось с $d_T = 1$ при традиционном позиционном представлении данных (см. рис. 2, а) до $d_c = 2^n + 1 = 33$ (см. рис. 2, б). Появляющаяся при этом корректирующая способность обеспечивает возможность обнаружения и исправления ошибок передачи, что показано на рис. 3.

Дополнительные преимущества нетрадиционного представления данных образами-остатками обеспечиваются при появлении групповых свойств равноостаточности в графических фрагментах преобразованных телеметрируемых параметров, заключённых между разрывами, составляющими не менее 80 % относительно шкалы представления данных, ограниченной разрядной сеткой. На рис. 2 она определяется как $\mathcal{W}_n = [0 - (2^n - 1)] = (0 - 1023)$. Необходимо отметить, что групповые свойства равноостаточности — не единственные инварианты, которые можно применять при нетрадиционном представлении результатов телеизмерений их образами-остатками для дополнительного контроля достоверности принятой телеметрической информации.

При этом более рационально использована возможность представления результатов телеизмерений при разрядной сетке, ограниченной 10 двоичными разрядами, о чём свидетельствует более плотное применение всей шкалы $Ш_n = [0 - (2^n - 1)] = (0 - 1023)$, отведённой под передачу значений телеметрируемых параметров.

Заключение. Приведённые результаты исследований и прикладного использования нетрадиционного представления данных телеизмерений образами-остатками показали возможность достижения комплексного положительного эффекта. Этот эффект проявляется в обеспечении контроля достоверности передаваемой информации на основе инвариантов в виде групповых свойств равноостаточности, обнаружении и исправлении ошибок и рациональном использовании ограниченной разрядной сетки представления результатов кодирования значений телеметрируемых параметров.

Л и т е р а т у р а

1. ГОСТ 16263–70. ГСИ. Метрология. Термины и определения.

2. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем. М., СПб.: МГУ–ГРИФ, 1998.

3. Мироновский Л. А., Слаев В. А. Инварианты в метрологии и технической диагностике // Измерительная техника. 1996. № 6. С. 12–16.

4. Булычёв Ю. Г., Васильев В. В., Джуган Р. В., Кукушкин С. С., Манин А. П., Мацыкин С. В., Насенков И. Г., Потюпкин А. Ю., Челахов Д. М. Информационно-измерительное обеспечение натурных испытаний сложных технических комплексов / Под ред. А. П. Манина, В. В. Васильева. М.: Машиностроение-Полет, 2016.

5. Кукушкин С. С. Теория конечных полей и информатика: В 2 т. Т. 1. Методы и алгоритмы, классические и нетрадиционные, основанные на использовании конструктивной теории об остатках. М.: Военная академия ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого Министерства обороны РФ, 2003.

6. Кукушкин С. С. Конструктивная теорема об остатках и результаты её прикладного использования // Измерительная техника. 1993. № 12. С. 24–28.

Дата принятия: 05.06.2016.

539.25+537.533.35+620.187

Калибровка растровых электронных микроскопов в широком диапазоне увеличений

Р. В. КИРТАЕВ^{1,3}, А. Ю. КУЗИН², В. Г. МАСЛОВ¹, В. Б. МИТЮХЛЯЕВ¹,
П. А. ТОДУА^{1,3}, М. Н. ФИЛИППОВ^{1,3,4}

¹ Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума, Москва, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия

³ Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская обл., Россия

⁴ Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия, e-mail: fgupnicpv@mail.ru

Предложен новый метод калибровки растровых электронных микроскопов в диапазоне увеличений 10–50000 $\times$ с использованием концевой меры и вспомогательной структуры. Применение поверенной концевой меры обеспечивает прослеживаемость результатов калибровки к первичному эталону метра. Для увеличений 1000, 10000 и 50000 $\times$ при калибровке растрового электронного микроскопа S-4800 относительная расширенная неопределённость измерений составила менее 0,14 %.

Ключевые слова: калибровка растрового электронного микроскопа, концевая мера, шаговая структура, прослеживаемость результатов калибровки.

We propose a new method of calibration of SEM magnification in the range of from 10 to 50 000X using the gage block of 4 mm size and auxiliary structure. Auxiliary structure was made as relief structure on the silicon chip and comprises two pitch structures of 100 μ m and 2 μ m pitch value provided that total length of the first pitch structure is 4mm. The use of verified gage block assures traceability of calibration results to the primary standard of meter. Expanded uncertainty of our measurements for 1K, 10K and 50K magnification calibration is not more than 0,14% for SEM S-4800.

Key words: calibration of SEM magnification, gage block, pitch structure, traceability of calibration results.

Для формирования изображений в растровых электронных микроскопах (РЭМ) используют различные режимы их работы: регистрация медленных вторичных электронов; регистрация обратнорассеянных электронов; построение карт распределения химических элементов по интенсивности их характеристического рентгеновского излучения [1]. Детекти-

рование медленных вторичных электронов позволяет реализовать предельное пространственное разрешение РЭМ, при этом увеличения обычно составляют более 1000 $\times$. При детектировании обратнорассеянных электронов и построении карт распределения элементов по интенсивности их характеристического рентгеновского излучения, простран-