

ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В. Л. СКРИПКА, М. В. ЗЕЛЕНКОВА

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

Представлен оригинальный подход к осуществлению калибровки средств измерений геометрических параметров пространственных поверхностей с использованием существующих цифровых телекоммуникационных сетей, основанный на получении виртуальной модели реального контрольного образца. Проведена оценка точности идентификации этой модели реальному образцу. Описана методика выполнения предлагаемого подхода, проанализирована возможность и целесообразность создания виртуальных моделей для калибровочных работ.

Ключевые слова: калибровка, единство измерений, виртуальная модель, сложно-профильные поверхности.

The original approach to implementation of calibration of instruments for spatial surfaces geometry measurements using the existing digital telecommunication networks based on receiving of the real control sample is presented. The estimation of accuracy of model identification with real control sample is carried out. The procedure of proposed approach realization is described and the possibility and utility of virtual models creation for calibration works are analysed.

Key words: calibration, uniformity of measurements, virtual model, complex geometry surfaces.

Повышение качества жизни, глобализация экономических процессов, развитие международной торговли, обороноспособности и безопасности страны, строительство, охрана окружающей среды, информатизация общества предъявляют все более высокие требования к измерениям и

обеспечению их единства. Вместе с тем, отечественная система обеспечения единства измерений (СОЕИ) нуждается в разрешении системной проблемы, заключающейся в технико-технологическом и организационно-экономическом несоответствии ее потенциала и масштаба для получения необходимого количества объективных, достоверных и сопоставимых результатов измерений. При этом продолжает расти диспропорция между потребностями экономики и возможностями метрологической инфраструктуры, обеспечивающей единство измерений [1].

Один из основных элементов СОЕИ – проведение поверочно-калибровочных работ (около 50 % нормативных технических документов в области ОЕИ посвящено этому вопросу). Их эффективность во многом определяется состоянием эталонной базы, которая не только стремительно устаревает, но и не позволяет обеспечить требуемое качество калибровки (поверки) вводимых в практику измерений современных методов и средств. Поэтому необходим поиск нетрадиционных подходов к осуществлению поверки и калибровки.

Рассмотрим вопрос о возможности создания на основе использования современных информационных технологий «виртуальных» рабочих эталонов (ВРЭ) и используем их в качестве опорных значений согласно стандарту [2] для калибровки (поверки) средств измерений (СИ) геометрических параметров пространственных поверхностей (турбинных лопаток, зубчатых колес и т. п.).

Формирование ВРЭ заключается в следующем. Берется реальный объект измерения или его физическая модель (контрольный образец), геометрические параметры которой определяются в организациях государственной метрологической службы с помощью высокоточных средств (например, координатно-измерительной машины) на основе аттестованных методик выполнения измерений. Согласно полученным результатам измерений фиксируется «сетка» оцифрованных координат реперных точек измеренной поверхности, по которым может виртуально воспроизводиться конфигурация этой поверхности, т. е. виртуальная модель образца, выполняющая роль ВРЭ.

При этом образец может быть выполнен с невысокой степенью точности, т. е. будет экономичен. Затем его отправляют потребителю (или потребитель сам изготавливает контрольный образец и присылает его на аттестацию) и используют в качестве рабочего квазиэталона

для калибровки или поверки СИ, т. е. его геометрические параметры оценивают рабочими средствами, измеряющими или контролирующими аналогичные изделия. Результаты этих измерений по каналам связи передают в метрологическую организацию, где хранятся в электронном виде характеристики ВРЭ. Там их сравнивают с характеристиками ВРЭ и выносят решение о метрологической пригодности рабочего СИ. Следует отметить, что для одного и того же контрольного образца может быть получен набор ВРЭ, например, для разных температурных или других внешних воздействий. Они должны периодически корректироваться по контрольному образцу в процессе его эксплуатации.

Возможность практического использования ВРЭ определяется точностью цифровой идентификации контрольного образца. Поэтому его можно рассматривать как градуировочную характеристику, точность которой определяется погрешностью измерений и конфигурацией «сетки», а также инвариантностью ее реперных точек. Поскольку одну и ту же поверхность по одним и тем же реперным точкам можно аппроксимировать различными методами, то и ВРЭ может быть получено множество. Следовательно, встает задача сокращения этого множества и выбора лучшего ВРЭ по метрологическим характеристикам.

Рассмотрим особенности формирования погрешности преобразования пересечения линий «сетки» в численные значения координат ВРЭ реперной точки. С метрологической точки зрения доминирующей составляющей погрешности оценки координат реперных точек является неоднозначность координат пересечения линий «сетки», вызванная неточностью измерений совокупности указанных координат.

Выражения $y_1 = f_1(x)$ и $y_2 = f_2(x)$, описывающие пересекающиеся линии «сетки», в общем случае являются нелинейными функциями со случайными аргументами. Однако в сравнительно малом диапазоне изменений аргументов, характерном для зоны неустойчивости реперных точек, степень их нелинейности можно уменьшить и получить аналитические выражения погрешностей фиксации положения координат линии пересечения «сетки». Для этого заменим y_1 , y_2 , описывающие пересекающиеся линии «сетки» в окрестности реперной точки A , касательными $y'_1 = f'_1(x_0) + a_1$, $y'_2 = f'_2(x_0) + a_2$ (рис. 1), где x_0 – действительное значение координаты реперной точки; $f'_1(x_0)$, $f'_2(x_0)$ – производные y_1 , y_2 в точке x_0 (т. е. угловые коэффициенты касательных); a_1 , a_2 – начальные значения касательных (аддитивные погрешности значений y_1 , y_2); x – текущее значение координаты.

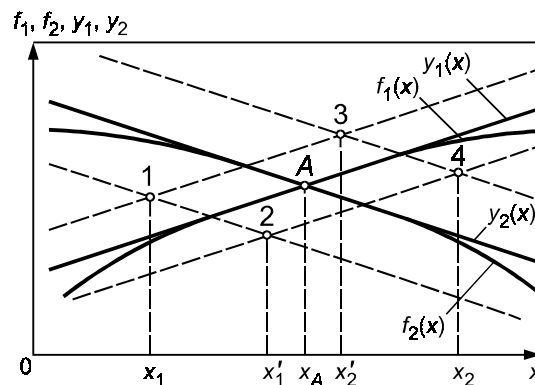


Рис. 1. Окрестности точки пересечения линий сетки, аппроксимирующей пространственную поверхность

Из этих выражений следует, что при $y_1 = y_2$ координату пересечения (точка A) можно представить в виде

$$x_A = \frac{a_2 - a_1}{f'_1(x_0) - f'_2(x_0)}. \quad (1)$$

Таким образом, инвариантность положения x_A зависит как от аддитивных погрешностей a_1, a_2 , так и от мультипликативных погрешностей (угловых коэффициентов) $f'_1(x_0), f'_2(x_0)$ и представляет собой сложную нелинейную функцию случайных аргументов. Поэтому при известных законах распределения аддитивных и мультипликативных погрешностей определение закона распределения x_A затруднено и сводится к нахождению числовых характеристик (дисперсии и математического ожидания) по числовым характеристикам случайных аргументов.

При реализуемости выражения (1) можно считать, что $x_A \approx x_0$, что соответствует точке пересечения f_1, f_2 . Для подобного рассматриваемому случаю пересечения линий «сетки» в [3] показано, что для усеченных законов распределения погрешностей аргументов область положения точки пересечения A можно ориентировочно ограничить параллелограммом 1–2–3–4 (рис. 2), а интервал нестабильности координаты x_A — значениями x_1, x_2 для некоррелированных и x'_1, x'_2 для жестко коррелированных погрешностей. При этом из геометрических соображений показано, что соотношение между погрешностями Δ_1, Δ_2

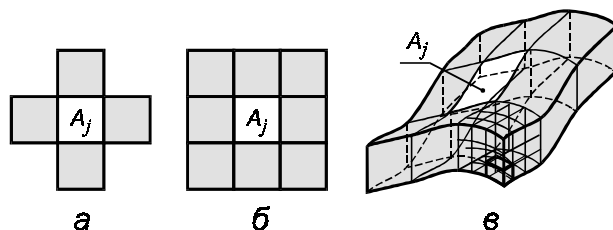


Рис. 2. Окрестности точки пересечений линий сетки в виде топологии клеточного автомата на плоскости (а, б) и в пространстве (в)

положения точки A , оцениваемого согласно $f_1(x)$, $f_2(x)$ и возможным значением погрешности инвариантности $(x_2 - x_1)$ и кривизной пересекающихся линий (значением угловых коэффициентов $f'_1(x)$, $f'_2(x)$) имеет вид

$$\frac{\Delta_2 + \Delta_1}{x_2 - x_1} \leq 0,5 |f'_1(x_0) - f'_2(x_0)|.$$

Однако данное выражение не учитывает трехмерный характер пересечения линий сетки и влияние на точность оценки положения точки A , а также инвариантность и точность оценки совокупности соседних точек пересечения, непосредственно связанных с ней. Описание этого влияния с помощью традиционных подходов, базирующееся на многомерных вероятностных представлениях, как правило, не позволяет использовать полученные модели на практике из-за сложности или невозможности получения реальных многомерных законов распределения или хотя бы их числовых характеристик. Поэтому, как альтернативный вариант моделирования, сформулируем адекватное описание влияния на инвариантность оценки координат точки A соседних точек пересечения «сетки» в терминах клеточного автомата [4].

Окрестность точки A может быть определена различными способами, например, показанными на рис. 2, а, б, где заштрихованные квадраты представляют собой элементы клеточного автомата, характеризующие действительные значения положения соседних с A точек пересечения «сетки». При этом вообразим, что элементы представляют собой ячейки «трехмерной сети», уложенной на моделируемую поверхность (рис. 2, в). Если считать, что в каждой объемной ячейке «сетки» находится точка A_j , то возможное расположение центра этой ячейки можно рассматривать как доверительную область действительного значения координат

реперной точки ВРЭ. Пронумеруем соседние с точкой A элементы от 1 до N и n -е состояние j -го элемента A_j (j -й ячейки) обозначим $A_j^{(n)}$, а состояние соседних i -х элементов $A_i^{(n)}$.

Вариант перехода ячейки из состояния $A_j^{(n)}$ в состояние $A_j^{(n+1)}$ зависит от точности определения $A_j^{(n)}$ и суммы состояний соседних с ней i -х ячеек, т. е.

$$A_j^{(n+1)} = F \left[A_j^{(n)}, \sum_{i=1}^N A_i^{(n)} \right]. \quad (2)$$

Если число возможных состояний A_j ячейки равно K (задается числами 0, 1, ..., $K-1$) и она имеет r соседей, а значение состояний $A_j^{(n+1)}$ определяется комбинацией двух чисел — $A_j^{(n)}$, $\sum_{i=1}^N A_i^{(n)}$, то первое из них может принимать K значений, а второе — rK значений. Тогда при фиксированных значениях K и r количество возможных комбинаций взаимовлияния на оценку точности расположения j -й ячейки равно K^{rK^2} .

Во многих случаях возможные состояния элемента $K=2$, так как реперная точка ВРЭ воспроизводит координаты положения действительной идентифицируемой точки реальной физической поверхности с заданной точностью или не воспроизводит, т. е. каждая ячейка представляет собой бистабильный элемент. При этом число r будет зависеть от структуры и значения параметров «сетки». Например, для ячейки, изображенной на рис. 2, а, $r=4$. В этом случае возможное количество вариантов формирования реперных точек ВРЭ составит $2^{4 \cdot 2^2} = 2^{16}$, а при $r=8$ (рис. 2, б) — 2^{32} , что не представляет принципиальных проблем для того, чтобы с помощью машинного эксперимента найти требуемый вариант построения ВРЭ.

Учитывая, что каждый из K^{rK^2} различных комбинаций аргументов функции $F(\cdot)$ в (2) ставится в соответствие лишь K ее возможных значений, то некоторое значение $A_j^{(n+1)}$ не может определяться единственным набором $A_j^{(n)}$, $A_i^{(n)}$. Формирование набора $A_j^{(n)}$, $\sum_{i=1}^N A_i^{(n)}$, который бы обеспечил ВРЭ требуемой точности, тесно связано с состоянием бистабильных элементов $A_j^{(n)}$, $\sum_{i=1}^N A_i^{(n)}$.

Рассмотрим ячейку «сетки» как бистабильный элемент, погрешность которого может скачкообразно меняться как за счет точности измерения параметров контрольного образца, так и за счет взаимосвязи с соседними ячейками.

В случае погрешности оценки координат ячейки Δ меньшей некоторого критического значения $\Delta_{кр}$ достоверность параметров ВРЭ не вызывает сомнений, а при $\Delta \geq \Delta_{кр}$ происходит скачкообразный переход к их недостоверности. Аппроксимация точно заданной поверхности сопряжена с принципиальными проблемами и трудно выполнима с достаточной точностью. Это связано с отсутствием единственной поверхности на множестве оцифрованных точек, а не с алгоритмами обработки данных. Однако, если предположить, что «взаимообмен» погрешности Δ с погрешностями соседних ячеек пропорционален их разности, то состояние бистабильной среды может быть описано полиномом третьего порядка [4]. Учитывая, что фактические значения погрешностей фиксации реперных точек ВРЭ различны, описание моделируемой ВРЭ поверхности задается на множестве уравнений третьей степени, т. е. представляет собой некий функционал. Выбор его профилей, приводящих к решениям, обеспечивающим $\Delta < \Delta_{кр}$ позволяет скорректировать погрешность ВРЭ и определить возможность его использования. Следовательно, неточность ВРЭ – случайный процесс с малой долей случайной составляющей и неизвестной по величине и систематической по природе ошибкой интерполяции, которая может быть уменьшена путем использования нескольких ВРЭ, опорная сеть реперных точек которых определяется с помощью различной измерительной аппаратуры, имеющей близкую друг к другу точность.

Таким образом, алгоритмическое описание идентификации контрольных образцов пространственных поверхностей позволяет с известной степенью точности построить их виртуальные модели, позволяющие:

- существенно сократить количество анализируемых вариантов, возможных при идентификации, и тем самым упростить численные алгоритмы выбора наиболее рациональных из них;

- выбрать в зависимости от кривизны поверхности и требуемой точности ее идентификации шаг квантования (размер ячейки);

- корректировать точность формируемого ВРЭ исходя из фактических значений координат реперных точек, полученных в результате высокоточных измерений.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Приказ** Минпромторга РФ от 17.06.09 № 529 «Об утверждении стратегии обеспечения единства измерений в России до 2015 года» //Российская газета. 2013. № 5988.
2. **ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002.** Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 1. Основные положения и определения.
3. **Волков В. А., Рыжаков В. В.** Метрологические и надежность характеристики датчиков: методы оценивания. М.: Энергоатомиздат, 1993.
4. **Чуличков А. И.** Математические методы нелинейной динамики. М.: Физматлит, 2000.

Дата принятия 24.05.2012 г.

