

УДК 006.91

Н.В. Глухова

ГВУЗ «Национальный горный университет», Днепрпетровск, Украина

МЕТОД РАСЧЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В статье рассмотрены проблемы создания метрологического обеспечения методов измерений, основанных на получении и обработке результатов измерений визуального характера. Представлен анализ источников неопределенности измерений, возникающих при регистрации и преобразовании изображений газоразрядного излучения. Для экспериментального получения оценок неопределенности типа *A* предложено использование в качестве тест-объекта металлического цилиндра. При обработке результатов многократных измерений с использованием тест-объекта выполнена проверка гипотез об однородности и равномерности в группах экспериментальных наблюдений. Для объединенных в одну группу результатов оценки внутреннего диаметра цилиндра вычислена неопределенность типа *A*.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, неопределенность измерений, цифровая обработка изображений, газоразрядное излучение, статистическая гипотеза.

Постановка проблемы и анализ литературы

В настоящее время методы измерений, основанные на сборе и анализе визуальных данных, используются во многих областях науки, техники и медицины. Постоянно растущие возможности вычислительной техники способствуют устойчивой тенденции все большего распространения таких методов. Регистрация изображения, как результат экспериментального исследования состояния некоторого объекта, потенциально содержит в себе значительно больший объем измерительной информации, чем результат измерений, представляющий собой ограниченный набор количественных значений отдельных параметров.

Существуют такие практические задачи, для решения которых использование методов измерений, основанных на получении визуальных данных, является уникальным и зачастую единственным способом получения необходимой информации. Такая ситуация характерна, например, для технической диагностики и медицины.

Наряду с неоспоримыми преимуществами работы с визуальными данными, безусловно, остается немало трудностей, связанных со следующими аспектами. Во-первых, необходимость хранения, преобразования и обработки больших объемов данных. Во-вторых, сложность метрологической аттестации средств измерений, используемых для регистрации различного рода изображений. В-третьих, практически полное отсутствие фундаментальных метрологических исследований способов регистрации и методов обработки, анализа, параметризации изображений [1].

В данной работе рассматриваются проблемы разработки метрологического обеспечения методов измерений, основанных на регистрации изображе-

ний газоразрядного излучения [2]. Метод заключается в регистрации изображений газоразрядного излучения объектов, получаемых при внешнем воздействии импульсным электромагнитным полем высокой напряженности. На сегодняшний день предложено несколько способов практической реализации данного метода. Первый из них, известный еще примерно с середины XX в., предполагает использование в качестве сенсора фотоматериала – фотопленки либо рентгеновской пленки. В этом случае исследуемый объект помещают непосредственно на поверхность пленки, что позволяет зафиксировать картину свечения в электромагнитном поле [3].

Относительно недавно была предложена модификация метода регистрации изображений газоразрядного излучения, заключающаяся в использовании ПЗС-матриц для ввода картины свечения непосредственно в компьютер [4]. Несмотря на то, что последний вариант значительно сократил трудоемкость измерительных операций и позволил получать изображения в удобной цифровой форме, остается немало сторонников использования «классического» способа с применением фотоматериала. Это обусловлено рядом нерешенных проблем цифровой регистрации, в том числе и метрологического характера, подробно изложенных в работах [5, 6].

Главной проблемой цифрового варианта регистрации изображений с точки зрения метрологии является возможность получения изображений только в многоимпульсном режиме работы генератора, что обязательно вносит в результат измерений динамическую составляющую погрешности. Регистрация же на фотоматериале выполняется в моноимпульсном режиме, что сводит динамическую погрешность к нулю уже на этапе постановки измерительного эксперимента.

Анализ других составляющих погрешностей метода, основанного на регистрации изображений газоразрядного излучения, выполнен в работах [7 – 9].

Изложение основного материала

Поскольку классический метод регистрации изображений газоразрядного излучения не утрачивает актуальности ввиду неоспоримых преимуществ моноимпульсного режима воздействия на объект исследований, задача разработки метрологического обеспечения для него является актуальной.

На первом этапе следует проанализировать источники неопределенности, возникающие на стадиях регистрации, преобразования, передачи и анализа данных. Поскольку регистрация изображений происходит с использованием фотоматериала, то нужно учесть следующие моменты.

В том случае, если в качестве материала применяется рентгеновская пленка, следует принять во внимание, что с метрологической точки зрения важнейшим параметром пленки является разрешающая способность, которая напрямую влияет на точность воспроизведения на изображении газоразрядного излучения его геометрических параметров.

Разрешающую способность рентгеновской пленки обычно выражают числом параллельных линий (штрихов), которые можно воспринимать раздельно, на единицу длины. Типовые значения разрешающей способности современных рентгеновских пленок составляют 20 ЛП/мм, где ЛП – пар линий [10]. Что касается высокочувствительных видов фото- либо рентгеновской пленки, то этот параметр достигает значения 100 линий/мм. Также источниками неопределенности при использовании фотоматериалов являются условия их проявки и свойства используемых реактивов, которые всегда изменяются в некоторых пределах от опыта к опыту.

В настоящее время, даже если исследователь применяет для регистрации картины газоразрядного излучения фотоматериал, то, как правило, дальнейший анализ предусматривает применение компьютерных технологий обработки и анализа данных.

В этом случае зарегистрированные на фотоматериале изображения подлежат вводу в компьютер путем реализации процедуры аналого-цифрового преобразования, например, при помощи сканера.

На этом этапе также возникают несколько компонентов неопределенности, вносящих вклад в результирующую комбинированную неопределенность измерений [11].

В том случае, если для анализа изображений газоразрядного излучения используются спектральные методы (например, преобразование Фурье, вейвлет-разложение, фликкер-шумовая спектроскопия), то необходимо уделить внимание метрологическим аспектам используемых методов [12].

В общем случае, при необходимости оценки неопределенности геометрических параметров изображений газоразрядного излучения, следует провести многократные измерения с применением тест-объекта. Использование тест-объектов для исследования метрологических характеристик средств измерений и методов, базирующихся на регистрации изображений, является распространенной практикой во многих прикладных областях.

Для оценки характеристик точности метода, который предусматривает получение изображений газоразрядного излучения на рентгеновской пленке с последующим аналого-цифровым преобразованием фотографий, в качестве тест-объекта был использован металлический цилиндр с внутренним диаметром 14 мм.

Полученные на фотоматериале изображения подвергнуты аналого-цифровому преобразованию при разрешающей способности сканера 600 dpi. В результате они представляют собой полутоновые растровые изображения. При исследовании метрологических характеристик используемой модификации метода газоразрядного излучения была выполнена серия из 100 экспериментов в одинаковых условиях и с применением одинаковой аппаратуры. В результате получено 100 изображений тест-объекта, для каждого из которых величина внутреннего диаметра была оценена на основе построения шести профилей яркости изображений. Для получения профилей было использовано специально разработанное прикладное программное обеспечение.

Выборочно результаты программного анализа полученной серии фотографий тест-объекта представлены в табл. 1.

При использовании для оценки точности и воспроизводимости геометрических характеристик на изображениях газоразрядного излучения была выполнена проверка статистической однородности и равномерности.

Однородность проверялась по критерию Стьюдента (гипотеза, касающаяся нормального распределения геометрических параметров изображений газоразрядного излучения была подтверждена рядом авторов [13], а также на основе собственных исследований).

Выполнен расчет величины

$$t_{1-2} = \frac{\bar{d}_1 - \bar{d}_2}{\sqrt{(n_1 - 1) \cdot S_1^2 + (n_2 - 1) \cdot S_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}$$

и при $P=0,95$ установлена истинность равенства $|t_{1-2}| < t_v$, где t_v – табличная величина t-распределения Стьюдента.

Гипотезу равномерности во всех полученных группах экспериментальных наблюдений проверяли согласно критерию Фишера.

Таблица 1

Результаты расчета внутреннего диаметра металлического цилиндра (в мм)
для 8-ми тест-объектов по 6-ти профилями яркости

№ профиля/ № цилиндра	1	2	3	4	5	6	7	8	Суммарные показатели
1-й профиль	13,88536	14,05469	14,09703	14,01236	14,01236	14,01236	14,05469	14,01236	
2-й профиль	14,01236	14,35103	14,05469	14,05469	13,92769	13,84303	13,97003	13,71603	
3-й профиль	14,26636	14,01236	14,01236	13,92769	14,05469	13,84303	14,01236	13,84303	
4-й профиль	13,97003	14,01236	13,71603	14,01236	14,01236	14,09703	14,35103	14,01236	
5-й профиль	13,84303	13,97003	14,01236	13,80069	14,35103	14,01236	14,05469	13,92769	
6-й профиль	13,92769	14,13936	14,3087	14,05469	14,22403	14,3087	14,05469	14,1817	
Среднее арифметическое	13,98414	14,08997	14,03353	13,97708	14,09703	14,01942	14,08292	13,94886	14,02912
Среднее отклонение для выборки	0,150666	0,140191	0,190735	0,09807	0,158397	0,174374	0,135643	0,160085	0,151189
Стандартная неопределенность	0,061509	0,057233	0,077867	0,040037	0,064665	0,071188	0,055376	0,065355	0,061723

Экспериментальные оценки дисперсий расположились в вариационный ряд $S_{1d}^2 < S_{2d}^2 < \dots < S_{kd}^2$. Далее выполнили проверку значимости отношения S_{kd}^2 / S_{1d}^2 , воспользовавшись критерием Фишера. Гипотеза про равномерность групп наблюдений подтвердилась, поскольку отношение оценок дисперсий оказалось незначимым.

Проверка гипотез дала возможность объединения всех экспериментальных результатов в одну группу с оценкой наиболее вероятного значения внутреннего диаметра тест-объекта

$$\bar{d} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \bar{d}_i.$$

Соответствующее среднеквадратическое отклонение было вычислено согласно выражению:

$$S(\bar{d}) = \sqrt{\frac{n-1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^L S_i^2 + \frac{1}{L(N-1)} \sum_{i=1}^L (\bar{d}_i - \bar{d})^2},$$

где L – количество однородных групп, n – количество наблюдений в каждой группе, $N = \sum_{i=1}^L n_i$ – общее количество экспериментальных данных.

Комбинированная стандартная неопределенность оценки геометрических параметров цилиндра в данном случае была вычислена с учетом двух составляющих: неопределенности квантования (неопределенность типа В, проявляющаяся при аналогоцифровом преобразовании изображений [11]) и неопределенности типа А, вычисленной на основе обработки результатов многократных наблюдений:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n(n-1)}}.$$

Известно несколько подходов, которые используются для объединения компонент стандартной

неопределенности, связанных с квантованием измеряемых параметров и их случайным разбросом [14]. Наиболее распространенный вариант объединения базируется на вычислении согласно выражению:

$$u_{\Sigma}^{(1)} = \sqrt{u^2(\Delta) + u_A^2}.$$

Цифра 1 в верхнем индексе в скобках означает первый способ оценки. Для рассмотренного примера вычисления внутреннего диаметра цилиндра первый способ оценки дает величину

$$u_{\Sigma}^{(1)} = \sqrt{u_{600}^2(\Delta) + u_A^2} = \sqrt{(12,2)^2 + (61,7)^2} = 62,9 \text{ мкм}.$$

Второй вариант предполагает оценку суммарной неопределенности в виде использования максимальной из компонент, тогда

$$u_{\Sigma}^{(2)} = \max[u_{600}(\Delta), u_A] = 61,7 \text{ мкм}.$$

В третьем способе (который применим при количестве наблюдений более 30) расчет следует выполнять согласно правилу:

если $S(x_i) \leq 0,6 u_{600}(\Delta)$, то

$$u_{\Sigma}^{(3)} = \sqrt{\left(\frac{0,5r - \bar{x}_0}{\sqrt{3}}\right)^2 + \frac{(\max[u(\Delta), S(x_i)])^2}{n}},$$

если $S(x_i) > 0,6 u_{600}(\Delta)$, то $u_{\Sigma}^{(3)} = u_A$,

где $S(x_i)$ – оценка СКО отдельных результатов.

Для рассматриваемого примера оценки геометрических размеров цилиндра выполняется условие $S(x_i) > 0,6 u_{600}(\Delta)$, $61,7 > 0,6 \cdot 12,2$, тогда

$$u_{\Sigma}^{(3)} = u_A = 61,7 \text{ мкм}.$$

Результаты расчетов, выполненных согласно способам 2 и 3, совпали. Оценка согласно первому варианту формулы комбинированной неопределенности является завышенной. Такой вывод также согласуется с результатами численного моделирования на основе метода Монте-Карло, реализованного авторами работы [14].

Выводы

В настоящее время наблюдается постоянный рост применения методов измерений, основанных на использовании экспериментальной информации визуального характера. Поэтому разработка метрологического обеспечения таких методов является актуальной задачей.

Предложенный в статье подход к расчету неопределенности оценки геометрических параметров изображений газоразрядного излучения позволит обоснованно принимать решения относительно точности и воспроизводимости результатов экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Кондратов В.Т. Визуализация в метрологии: уровни, направления, цели, задачи, методы и программное обеспечение / В.Т. Кондратов // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. – 2011. – №1. – С. 7-21.
2. Коротков К.Г. Исследование физических процессов, протекающих при газоразрядной визуализации различных объектов: Автореф. дис. ... канд. физ. наук / Коротков К.Г. – Л., 1982. – 13 с.
3. Пісоцька Л.А., Мінцер О.П., Глухова Н.В. Пристрій для реєстрації зображення кірліан-світіння біологічних об'єктів. Патент на корисну модель. Пат. 100879 Україна: МПК А61В 5/05, G03В 41/00. Заявлено 13.03.2015; опубл. 10.08.2015, Бюл. №15.
4. Коротков К.Г. Основы ГРВ биоэлектрографии / К.Г. Коротков. – СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2001. – 360 с.
5. Бондарев В.М. Моноимпульсная плазмография. Регистрация тонкомерных образований и аномальных энергетических проявлений / В.М. Бондарев // *Тезисы докладов Второго Международного Конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине»*. – 2000. СПб., 2000. – С. 195-196.
6. Бондарев В.М. Кирлиан-фотография: цифровая и традиционная [Электронный ресурс] / В.М. Бондарев // *Режим доступа: <http://www.vadimbo.narod.ru/GDV.htm>*.
7. Коломієць Р.О. Біотехнічна система на основі ефекту Кірліан для аналізу рідиннофазних об'єктів // *Автореф. ... дис. канд. техн. наук / Р.О. Коломієць*. – Вінниця, 2011. – 19 с.
8. Александрова Р.А. Анализ систематических погрешностей и воспроизводимости данных в методе ГРВ / Р.А. Александрова, Г.Б. Федосеев, К.Г. Коротков, Н.А. Филиппова, Э.В. Крыжановский и др. // *Материалы 4-ого междунар. Конгресса «Наука, Информация, Сознание»*. – СПб., 2000. – С. 1-4.
9. Борисова М.В. Оценка погрешности экспериментальных результатов при исследовании методом ГРВ биоэлектрографии / М.В. Борисова, Э.В. Крыжановский, В.Л. Ткалич // *Приборостроение, том 49, № 2, СПбГУ ИТМО, 2006*. – С. 30-31.
10. Михайлов А.Н. Обеспечение качества рентгенографического изображения при наименьшем радиационном риске / А.Н. Михайлов, И.С. Абельская, Э.Е. Малевич // *Медицинские новости*. – 2015. – № 6. – С. 28-31.
11. Глухова Н.В. Розробка методу оцінки невизначеності аналого-цифрового перетворення зображень // *Тези 15-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» ВОТТ-15*. Одеса, 10-14 вересня 2015. – С. 73.
12. Глухова Н.В. Метрологічні аспекти спектрального аналізу напівтонових зображень / Н.В. Глухова // *Вестник Национального технического университета "ХПИ". Серия "Информатика и моделирование"*. – 2015. – №33(1142). – С. 20-27.
13. Коротков К.Г. Стабильность и воспроизводимость ГРВ параметров. От эффекта Кирлиан к биоэлектрографии / К.Г. Коротков. – СПб., 1997. – С. 94-95.
14. Водотыка С.В. Учет погрешности квантования при оценивании неопределенности результатов измерений с многократными наблюдениями / С.В. Водотыка, И.П. Захаров // *Системы обработки информации*. – Х.: ХУПС, 2011. – Вып. 8(98). – С. 39-44.

Поступила в редколлегию 18.04.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Корсун, ГВУЗ «Национальный горный университет», Днепропетровск.

МЕТОД РОЗРАХУНКУ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОРОЗРЯДНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Н.В. Глухова

У статті розглянуті проблеми створення метрологічного забезпечення методів вимірювань, заснованих на отриманні і обробці результатів вимірювань візуального характеру. Представлений аналіз джерел невизначеності вимірювань, що виникають при реєстрації і перетворенні зображень газорозрядного випромінювання. Для експериментального отримання оцінок невизначеності типу А запропоновано використання як тест-об'єкту металевого циліндра. При обробці результатів багатократних вимірювань з використанням тест-об'єкту виконана перевірка гіпотез про однорідність і рівнорозсіяність в групах експериментальних спостережень. Для об'єднаних в одну групу результатів оцінки внутрішнього діаметру циліндра обчислена невизначеність типу А.

Ключові слова: метрологічне забезпечення, невизначеність вимірювань, цифрова обробка зображень, газорозрядне випромінювання, статистична гіпотеза.

EVALUATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY OF GEOMETRIC PARAMETERS OF THE GAS-DISCHARGE EMISSION IMAGES

N.V. Glukhova

The article deals with the problem of creation of metrological support of measurement methods, based on obtaining and processing of measurement results that have visual character. The analysis of measurement uncertainty sources that arise during the registration and conversion of gas-discharge emission images is submitted. The metallic cylinder is proposed use as a test object for experimental estimation uncertainty type A. Hypothesis about the uniformity and equality of variances in groups of experimental observations is tested in processing the results of multiple measurements using the test object. The uncertainty type A is calculated for combined into one group of the evaluation results of the inner diameter of cylinder.

Keywords: metrological support, measurement uncertainty, digital image processing, gas-discharge emission, statistical hypothesis.