

Таким образом, разработанный алгоритм работы созданных эталонных систем позволяет не только воспроизводить единицу средней мощности оптического излучения, но и выполнять одну из ключевых операций ее передачи поверяемым средствам измерений — калибровку фотоэлектрического ваттметра из состава эталонной системы в качестве проходного средства измерений этого параметра.

Выводы. Опыт эксплуатации созданной эталонной калориметрической системы воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП показал, что автоматизация процессов управления входящей в ее состав аппаратурой, а также измерений и обработки получаемой информации в соответствии с рассмотренным алгоритмом, позволяют снизить погрешности воспроизведения до 0,1 %, обеспечивая при этом значительное повышение надежности, эффективности и производительности метрологических работ при одновременном снижении их трудоемкости.

Рассмотренный алгоритм измерений и обработки полученной информации может быть успешно использован не только в сфере эталонных калориметрических систем воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП, но и в области лазерного излучения, а также при создании высокоточных калориметрических рабочих эталонов и даже рабочих средств измерений средней мощности излучения ВОСП и лазеров в случае возникновения необходимости значительного повышения требований к точности ее измерений.

Л и т е р а т у р а

1. Глазов А. И. и др. Обеспечение единства измерений средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи // Измерительная техника. 2000. № 8. С. 31—35; Glazov A. I. et al. Unification of measurements of the average power of optical radiation in fiber-optic transmission systems // Measurement Techniques. 2000. V. 43. N. 8. P. 679687.
2. Глазов А. И. и др. Обеспечение единства измерений средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи // Метрология и измерительная техника в связи. 1999. № 4. С. 20—24.
3. Tihomirov C. V. et al. Comparison of reference standards for measurements of optical-fibre power // Metrology. 2000. N. 37. P. 347—350.
4. ГОСТ 8.575—2005. Государственная поверочная схема для средств измерений длины и скорости распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для волоконно-оптических систем связи и передачи информации.
5. Глазов А. И. е. а. Погрешности высокоточных измерений средней мощности оптического излучения в ВОСП и пути их минимизации // Измерительная техника. 2014. № 4. С. 12—15.

Дата принятия 18.03.2014 г.

62.503.51

Оптоэлектронное устройство дистанционных измерений геометрических параметров профильных объектов

Б. В. СКВОРЦОВ, А. Н. МАЛЫШЕВА-СТРОЙКОВА, И. Ю. ЖИГАНОВ

Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С. П. Королева (национальный исследовательский университет) Самара, Россия, e-mail:aps@ssau.ru

Рассмотрено оптоэлектронное лазерно-телевизионное устройство дистанционных измерений геометрических параметров изделий сложной пространственной конфигурации. Приведена структурная схема и основные математические соотношения, описывающие процедуры калибровки и измерений, основанные на обработке изображений контролируемого объекта, сделанных под разными углами. Получена возможность проводить полный анализ геометрических размеров изделия.

Ключевые слова: геометрические параметры, сложные профили, дистанционное измерение, калибровка, угол съемки, лазерно-телевизионное устройство.

The optoelectronic laser-television device for remote measurements of complex spatial configuration products geometric parameters is considered. The block diagram of the device and the basic mathematical relations describing the calibration and measurement procedures based on the processing of controlled object images taken at different shooting angles is presented. The possibility to carry out the complete analysis of product geometric dimensions was received.

Key words: geometric parameters, complex profiles, remote measurement, calibration, shooting angles, laser-television device.

Важной задачей приборостроения является создание средств высокопроизводительного контроля геометрических параметров изделий сложной формы, к которым относятся трубы, емкости, лопадки двигателей, корпуса и эле-

менты летательных аппаратов, строительные конструкции. Измерение геометрических параметров данных изделий контактными методами достаточно затруднительно. Под геометрическими параметрами подразумевают линейные

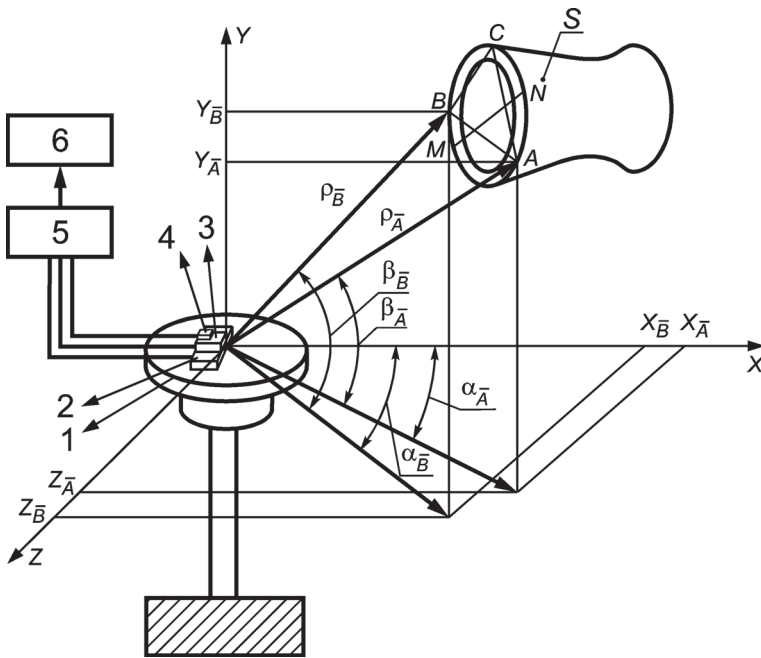


Рис. 1. Структурная схема оптоэлектронного устройства дистанционных измерений размеров профильных изделий:

1 — платформа; 2 — телекамера; 3 — лазерный дальномер; 4 — датчик азимутальных углов; 5, 6 — устройства обработки и видеоконтроля; S — объект

и угловые величины, а также соотношения между ними, характеризующие форму объекта и взаимное расположение его элементов.

С развитием технологий обработки материалов и сборки крупногабаритных изделий складывается такая ситуация, что значительно быстрее можно изготовить изделие сложной формы, чем проконтролировать его форму традиционными средствами. Причем контролировать надо каждое изделие несколько раз на разных стадиях. Качество изделий определяется точностью средств контроля их геометрии.

В России геометрические параметры изделий сложной конфигурации, в частности труб, лопаток и авиационных конструкций, измеряют, в основном, контактными механическими или оптико-механическими методами, которые громоздки, имеют малое быстродействие и трудно применимы в

реальных условиях производства, транспортировки и хранения.

В мировом приборостроении разрабатывают средства дистанционного лазерно-оптического контроля геометрических параметров изделий. Особенно активно этим занимаются фирмы «Autech», «Rtticon», «Machinery» (США); «Siemens», «Schneider», «Ferster» (ФРГ); «Ларицу» (Япония); «Zumbach», «Boveri» (Швейцария). Достаточно активно распространены фотографические измерительные системы V-STARs компании Geodetic System Inc. (США) и ATOS (Германия), теодолитные и интерферометрические измерительные системы (Axyz MTM-STM, Axyz LTD, фирмы Leica Geosystems AG). Все они используют лазерные дальномеры и специальные программы обработки изображений, являющиеся строго охраняемой интеллектуальной собственностью указанных фирм.

На основе известных технических решений, изложенных в [1—6], авторами предложено лазерно-телевизионное устройство (рис. 1), которое потенциально может конкурировать с изделиями перечисленных фирм. Устройство состоит из телекамеры 2, закрепленной на платформе 1, вращающейся в горизонтальной (угол α) и вертикальной (угол β) плоскостях. На поверхности платформы установлены лазерный дальномер 3, оптическая ось которого параллельна оптической оси камеры, и датчик азимутальных углов 4, формирующий сигналы, пропорциональные углам α , β . Вращение платформы задается вручную специальным микрометрическим механизмом, который на рис. 1 не показан. Выходы телекамеры, дальномера и датчика угла соединены с входом устройства обработки 5, выход которого подключен ко входу видеоконтрольного устройства 6.

Устройство устанавливают в зоне обзора камеры. На объекте выбирают три произвольные точки A, B, C, находящиеся на контролируемой поверхности (плоскости, линии). С помощью поворотного стола на т. A наводят лазерный дальномер, фиксируют углы α_A , β_A положения поворотного стола, соответствующие этой точке, измеряют расстояние от камеры до т. A, делают съемку объекта при полученных углах, получая изображение $S_A = S(\alpha_A, \beta_A)$ (рис. 2, а).

Затем поочередно наводят дальномер на т. B и C, строят изображение объекта при углах, соответствующих выбранным точкам $S_B = S(\alpha_B, \beta_B)$, $S_C = S(\alpha_C, \beta_C)$ (см. рис. 2, б, в). Таким образом получают три плоских изображения объемного изделия, по которым вместе с лазерными измерениями можно проводить полный анализ геометрических размеров изделия.

На рис. 2 координаты μ , η определяют точки на плоскости фотоматрицы телекамеры и, следовательно, видеоконтрольного устройства. При разных углах съемки изображение объекта формируется в разных точках фотоматрицы и, значит, отображается в разных точках экрана видеоконтрольного устройства.

Каждое изображение имеет свой масштаб на экране. Определение этого масштаба — одна из промежуточных задач процедуры измерений.

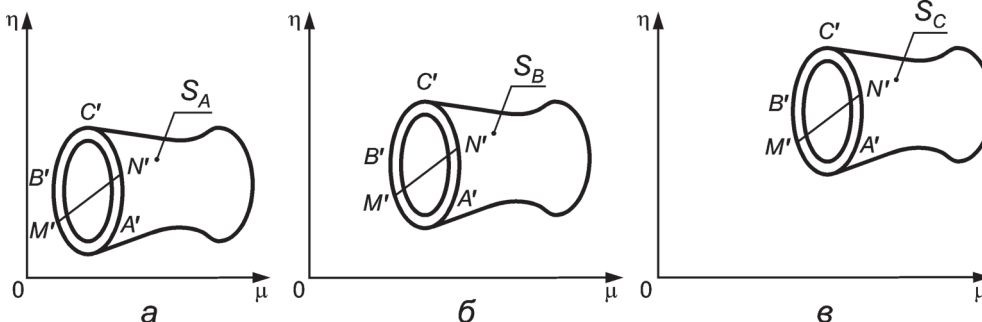


Рис. 2. Изображения изделия на экране при разных углах съемки:

а, б, в — соответственно наведение лазера на точки A, B, C; μ , η — координаты на плоскости фотоматрицы

Для ее выполнения необходимо соотнести реальные размеры отрезков AB , AC и BC с их длиной на экране. Реальные размеры указанных отрезков в пространстве определяют по формулам

$$AB = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2}; \quad (1)$$

$$AC = \sqrt{(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 + (z_A - z_C)^2}; \quad (2)$$

$$BC = \sqrt{(x_B - x_C)^2 + (y_B - y_C)^2 + (z_B - z_C)^2}, \quad (3)$$

где $x_A = \rho_A \cos \beta_A \cos \alpha_A$; $x_B = \rho_B \cos \beta_B \cos \alpha_B$; $x_C = \rho_C \cos \beta_C \cos \alpha_C$; $y_A = \rho_A \cos \beta_A \sin \alpha_A$; $y_B = \rho_B \cos \beta_B \sin \alpha_B$; $y_C = \rho_C \cos \beta_C \sin \alpha_C$; $z_A = \rho_A \sin \beta_A$; $z_B = \rho_B \sin \beta_B$; $z_C = \rho_C \sin \beta_C$; ρ_A , ρ_B , ρ_C — расстояния от центра излучения (начало координат) до соответствующей точки объекта, их измеряют лазерным дальномером, а α_A , α_B , α_C , β_A , β_B , β_C — определяют датчиком углов.

На экране видеоконтрольного устройства расположенные в пространстве отрезки AB , AC и BC преобразуют в расположенные на плоскости экрана отрезки $A'B'$, $A'C'$ и $B'C'$ (см. рис. 2). Длину указанных отрезков на экране дисплея находят через их координаты как

$$A'B' = \sqrt{(\mu_A - \mu_B)^2 + (\eta_A - \eta_B)^2}; \quad (4)$$

$$A'C' = \sqrt{(\mu_A - \mu_C)^2 + (\eta_A - \eta_C)^2}; \quad (5)$$

$$B'C' = \sqrt{(\mu_B - \mu_C)^2 + (\eta_B - \eta_C)^2}. \quad (6)$$

Для измерений реального объекта по его плоскому изображению необходимо определить масштаб, т. е. цену деления одного пиксела изображения по координатам μ , η , соответствующим реальным размерам объекта в пространстве. Для этого вводим коэффициенты масштабирования по координатам и сравниваем реальные отрезки (1)–(3) с их плоскими изображениями на экране (4)–(6).

Из условий $AB = A'B'$ и $AC = A'C'$ получаем следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} AB^2 &= (x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2 = \\ &= R_\mu (\mu_A - \mu_B)^2 + R_\eta (\eta_A - \eta_B)^2; \\ AC^2 &= (x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 + (z_A - z_C)^2 = \\ &= R_\mu (\mu_A - \mu_C)^2 + R_\eta (\eta_A - \eta_C)^2, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где R_μ , R_η — масштабирующие коэффициенты по координатам μ , η .

Совместное решение этих уравнений дает значения R_μ , R_η , определяющие метрологическое соответствие между реальными размерами объекта в пространстве и его плоским изображением на экране.

Из системы (7) находим $R_\mu = \Delta\mu/\Delta$, $R_\eta = \Delta\eta/\Delta$, здесь

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{(\mu_A - \mu_B)^2 (\eta_A - \eta_B)^2}{(\mu_A - \mu_C)^2 (\eta_A - \eta_C)^2} = \\ &= (\mu_A - \mu_B)^2 (\eta_A - \eta_C)^2 - (\eta_A - \eta_B)^2 (\mu_A - \mu_C)^2; \\ \Delta\mu &= \frac{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2 (\eta_A - \eta_B)^2}{(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 + (z_A - z_C)^2 (\eta_A - \eta_C)^2} = \\ &= \left[(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2 \right] (\eta_A - \eta_C)^2 - \\ &\quad - \left[(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 + (z_A - z_C)^2 \right] (\eta_A - \eta_B)^2; \\ \Delta\eta &= \frac{(\mu_A - \mu_B)^2 (x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2}{(\mu_A - \mu_C)^2 (x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 + (z_A - z_C)^2} = \\ &= (\mu_A - \mu_B)^2 \left[(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 + (z_A - z_C)^2 \right] - (\mu_A - \mu_C)^2 \times \\ &\quad \times \left[(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2 \right]. \end{aligned}$$

Любой произвольный размер MN между произвольными точками на контролируемом объекте можно определить как

$$MN = \sqrt{R_\mu (\mu_M - \mu_N)^2 + R_\eta (\eta_M - \eta_N)^2},$$

при этом вычисление размера можно делать по любому из изображений на рис. 2.

Очевидно, что измерения будут точнее, если провести вычисления по нескольким изображениям объекта, а результат усреднить, т. е. истинную длину L отрезка MN опреде-

лить по формуле $L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i$, где n — число изображений

объекта, используемых при вычислении контролируемого размера.

Усреднение результата также способствует уменьшению ряда оптических искажений (дисторсии, хроматизма положения, комы), связанных с удалением изображения от оптической оси объектива.

Вывод. Предложенное техническое решение позволяет практически полностью избавиться от влияния перекосов контролируемого объекта относительно оптической оси камеры. При этом, если камера захватывает все изображение объекта, устройство обработки можно запрограммировать не только для измерений каких-то размеров, но и анализа формы, вычисления центра тяжести, момента сопротивления и прочее. Также значительно повышается точность оперативных дистанционных измерений геометрических параметров объектов, которые стали независимыми от взаимного расположения телекамеры и контролируемого объекта при использовании в широком диапазоне измерений.

Литература

1. Жиганов И. Ю. Многоканальный телевизионный способ дистанционного измерения геометрических параметров // Вестник Самарского госуд. аэрокосмич. ун-та. 2009. № 2. С. 110—114.
2. Скворцов Б. В., Жиганов И. Ю. Метрологический анализ многоканальных телевизионных методов измерений геометрических параметров объектов // Измерительная техника. 2009. № 9. С. 5—8; Skvortsov B.V., Zhiganov I. Yu. Metrological analysis of multichannel TV methods of measuring object geometrical parameters // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N. 9. P. 902—907.

3. Скворцов Б. В., Жиганов И. Ю., Малышева-Стройкова А. Н. Методы дистанционных измерений геометрических параметров объектов // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. 2012. № 1. С. 313.

4. Пат. 73069 РФ. Телевизионное устройство измерения геометрических параметров объектов / Жиганов И. Ю., Скворцов Б. В. / Изобретения. Полезные модели. 2008. № 13.

5. Нестеров В. Н., Мухин В. М., Мещанов А. В. Метод многомерных тестовых объектов в оптических измерительных системах: Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2013.

6. Карасик В. Е., Орлов В. М. Лазерные системы видения. М.: Изд-во МВТУ им. Баумана, 2001.

Дата принятия 09.04.2014 г.

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

621.317.08

Анализ неустойчивости частоты группового сигнала ансамбля активных водородных стандартов

С. Д. ПОДОГОВА*, К. Г. МИШАГИН**, И. Н. ЧЕРНЫШЕВ*, В. Г. ВОРОНЦОВ*

* ЗАО «Время-Ч», Н. Новгород, Россия, e-mail: podogova@vremya-ch.com

** Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Н. Новгород, Россия, e-mail: mishagin@rf.unn.ru

Проанализированы характеристики группового сигнала, полученного с помощью вспомогательного генератора, подстраиваемого под среднюю частоту сигналов ансамбля активных водородных стандартов частоты и времени. Для анализа использованы данные реальных измерений, проведенных в ЗАО «Время-Ч» в 2013 г.

Ключевые слова: стандарт частоты и времени, групповой эталон времени и частоты, неустойчивость частоты, вариация Аллана.

The analysis of frequency instability of group signal produced by auxiliary oscillator synchronized to the average frequency of active hydrogen maser ensemble is presented. Real measurements data obtained in JSC «Vremya-CH» in 2013 were used for the analysis.

Key words: ensemble of atomic clocks, atomic clock, frequency instability, Allan variance.

Современные эталоны времени и частоты представляют систему из нескольких стандартов. Основная задача эталона — хранение и воспроизведение единиц времени и частоты, а также формирование непрерывного высокочастотного сигнала с высокими показателями стабильности и надежности. Формирование выходных сигналов эталона, как правило, осуществляется с помощью небольшого ансамбля активных водородных стандартов [1]. В России в настоящее время ансамбли водородных стандартов являются основой для вторичных и рабочих эталонов времени и частоты. За рубежом в качестве рабочих эталонов часто применяют ан-

самбли цезиевых стандартов частоты (на цезиевой атомно-лучевой трубке) или цезиевые и водородные стандарты вместе [2].

С целью повышения точностных характеристик эталонов рассчитывают поправки на фазу и частоту формируемых высокочастотных сигналов и сигналов шкалы времени. С учетом данных поправок реализуются групповая шкала времени и групповая частота в аналитическом виде. В публикациях зачастую представлены или результаты моделирования алгоритмов групповой шкалы и частоты, или групповые характеристики эталонов, полученные в результате постобработ-