

## **Принципы построения метрологического комплекса для аттестации высокоточных оптико-электронных угломеров**

**Ю. Б. ПАРВУЛЮСОВ, Ю. Г. ЯКУШЕНКОВ**

*Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия,  
e-mail: yakush@miigaik.ru*

*Рассмотрена геометрическая схема стенда для определения инструментальных погрешностей высокоточных двумерных оптико-электронных угломеров. Эти погрешности находят измерением углов между известными зафиксированными в пространстве опорными (референтными) направлениями и сравнением полученных значений с величинами тех же углов, измеренных с помощью автоколлиматоров, ориентированных на специальный калибр, фиксирующий точку пересечения геометрических осей контролируемого угломера. Калибр-эталон представляет собой многогранную призму с зеркальными гранями, нормали к которым образуют в пространстве требуемую геометрическую схему*

**Ключевые слова:** высокоточный оптико-электронный угломер, стенд для аттестации, двумерные угломеры.

*The geometrical diagram of stand for determination of high accuracy two-coordinate electro-optical angle measuring devices instrumental errors is considered. These errors would be found by measuring of angles between known reference directions to be fixed in space and by comparing of their sizes with values of the same angles measured by means of autocollimators oriented to the special caliber (calibrating prism) fixing the point of intersection of geometrical axis of electro-optical angle measuring device. The prism has many mirror surfaces. Perpendiculars to these surfaces forms in space the geometrical diagram to be demanded.*

**Key words:** electro-optical angle meter, stand for attestation, two-coordinate angle meters.

Одной из важнейших составляющих процессов производства и эксплуатации высокоточных оптико-электронных угломеров (ВОЭУ) является определение их метрологических характеристик и, прежде всего, показателей точности. Эта задача решается различными методами, в основе которых лежат измерения испытуемым или поверяемым ВОЭУ угловых отклонений от некоторого референтного направления либо углов между несколькими референтными направлениями с известными значениями.

Реализация указанных методов возможна как в натурных, так и лабораторных (нормальных) условиях. В первом случае при оценке суммарной погрешности ВОЭУ учитывают влияющие факторы, во втором – методическую и инструментальную составляющие суммарной погрешности, включающей, в свою очередь, теоретическую и технологическую составляющие. Однако именно инструментальная составляющая является доминирующей, и по её значению определяют точностные возможности ВОЭУ.

В [1, 2] и другой литературе по оптическим и оптико-электронным методам и средствам аттестации ВОЭУ описаны схемы и приборы, предназначенные для определения пространственного (углового) разрешения испытуемых или поверяемых оптических и оптико-электронных систем и приборов. Однако достигаемая с их помощью точность оценки углового разрешения сегодня часто оказывается недостаточной. Кроме того, такие приборы зачастую не обеспечивают в полной мере оценку всей номенклатуры метрологических характеристик, предусмотренных соответствующими нормативными документами. Поэтому закономерно стремление к созданию универсального метрологического комплекса для

аттестации ВОЭУ.

Задача настоящей статьи – рассмотрение универсальной схемы стенда для аттестации ВОЭУ и обобщённой методики проведения исследований и испытаний ВОЭУ с помощью данного стенда.

При выборе принципов построения стенда необходимо исходить из следующего. Оптические и оптико-электронные приборы для угловых измерений можно разделить на три группы. Первую группу составляют приборы, предназначенные для высокоточных измерений малых углов: автоколлиматоры, приборы контроля прямолинейности и соосности и др. Значения измеряемых углов лежат в пределах углового поля объектива и не превышают единиц или десятков угловых минут. К этой же группе относятся устройства точного наведения на цель (визирные устройства). Ко второй группе относятся угломеры, позволяющие определять углы и направления в пределах полных окружности и сферы или их частей: гониометры, геодезические приборы, системы ориентации и навигации и др. У таких приборов оптическая ось объектива последовательно совмещается с направлением на объект измерения, а углы между направлениями на объекты определяются с помощью входящих в состав приборов рабочих мер. Приборы третьей группы – высокоточные электронные теодолиты, приборы для траекторных измерений – сочетают принципы построения приборов двух первых групп. Малые перемещения объектов измеряются как отклонения от оптической оси объектива, а положение этой оси определяется как и в угломерах второй группы. Результат измерения является алгебраической суммой результатов измерений, полученных в обоих измерительных каналах.

Таким образом, стенд для аттестации ВОЭУ необходимо строить с учётом контроля метрологических характеристик приборов третьей группы с включением в него функциональных блоков, специфичных для исследований ВОЭУ первой группы. В структуре стенда можно выделить два основных измерительных канала: канал для измерения малых угловых отклонений относительно референтного направления и канал для измерения углов между зафиксированными в пространстве референтными направлениями. В ряде ВОЭУ измеряется дальность до наблюдаемого объекта, поэтому в структуру стенда целесообразно включить канал для воспроизведения заданных значений дальности.

При аттестации ВОЭУ первой группы и оптико-электронных устройств третьей группы следует руководствоваться документом [3], согласно которому нормируются следующие характеристики: номинальная статическая характеристика; систематическая и случайная составляющие основной погрешности; вариация выходного сигнала.

Для ВОЭУ большое значение имеют также энергетические характеристики. Для обеспечения нормальной работы ВОЭУ эффективный поток излучения, приходящий на его вход, должен превосходить в заданное число  $\mu$  раз энергетический порог чувствительности прибора  $\Phi_n$  [4, 5]. Если это условие не соблюдается, то измерение координат либо вообще невозможно, либо возможно с малой статистической надёжностью. От значения  $\Phi_n$  во многом зависят и другие метрологические характеристики – основная погрешность, вариация и др. Поэтому представляется целесообразным в первую очередь нормировать  $\Phi_n$  ВОЭУ, и исследования точности начинать именно с его определения.

Номинальную статическую характеристику для ВОЭУ часто называют пеленгационной. Она представляет зависимость информативного параметра сигнала  $U$  на выходе прибора или его системы первичной обработки информации от угла прихода оптического сигнала (рассогласования)  $\alpha$  на вход прибора, т. е. для одномерных ВОЭУ зависимость вида  $U=f(\alpha)$ .

Семейство отдельных реализаций пеленгационных характеристик можно рассматривать как случайную функцию угла рассогласования. Поэтому пеленгационная характеристика является в сущности математическим ожиданием этой случайной функции. Погрешность измерения любого угла в пределах углового поля ВОЭУ определяется доверительной областью  $\pm \epsilon$  пеленгационной характеристики. Под доверительной областью  $\pm \epsilon$  следует понимать семейство доверительных интервалов для среднего значения информативного параметра выходного сигнала при различных углах рассогласования [2]. Под порогом угловой чувствительности ВОЭУ следует понимать минимальный угол рассогласования на входе ВОЭУ, вызывающий такое изменение информативного параметра выходного сигнала  $U$ , которое в  $\mu$  раз превышает сигнал, соответствующий случайной составляющей погрешности ВОЭУ. Стандарт не предписывает нормировать эту характеристику для ВОЭУ, хотя она и удобна на практике. То же самое можно сказать и об угловой чувствительности ВОЭУ – крутизне его пеленгационной характеристики [5].

Можно предложить обобщённую методику определения точностных характеристик ВОЭУ при заранее известном законе распределения погрешностей наведения на визирную цель для различных углов рассогласования. Для наиболее распространённого на практике гауссового закона эта методика сводится к следующему:

определяется порог чувствительности ВОЭУ  $\Phi_n$ ;

исходя из заданных значений доверительного интервала  $\xi$  и соответствующей этому интервалу статистической надёжности вычисляется минимальное число опытов  $n$ , необходимое для надёжного определения средней квадратической погрешности единичного измерения  $\sigma$  [3];

определяется значение  $\sigma$  для ряда дискретных углов рассогласования в пределах всего углового поля ВОЭУ;

выбираются значения дискретности задания углов при измерениях пеленгационных (статических) характеристик ВОЭУ и экспериментально определяются эти характеристики;

строится семейство отдельных реализаций пеленгационных характеристик и находится осреднённая характеристика;

по отклонениям  $\Delta U_i$  информативного параметра выходного сигнала для каждого  $i$ -го дискретного угла рассогласования можно вычислить систематическую и случайную составляющие основной погрешности ВОЭУ и вариацию выходного сигнала [3].

Следует отметить, что применение изложенной выше обобщённой методики для двухкоординатных угломеров, работающих в большом диапазоне углов, может явиться нецелесообразным в силу большого объёма измерений. Наиболее достоверно точностные характеристики прибора могут быть оценены при его исследовании на специальном стенде (группе специальных технологических стендов).

Контролировать точность исследуемого двумерного ВОЭУ можно измерением углов между известными зафиксированными в пространстве опорными (референтными) направлениями и сравнением полученных значений со значениями тех же углов, измеренных с помощью более точных эталонных средств, если таковые имеются. Фиксированные опорные направления можно задавать длиннофокусными коллиматорами, оптические оси которых пересекаются в одной точке, совпадающей с точкой пересечения основных геометрических осей поверяемого ВОЭУ [6].

Однако при высоких требуемых показателях точности измерения направлений целесообразно вместо коллиматорного метода использовать автоколлимационный метод, обладающий повышенной чувствительностью к угловым рассогласованиям.

В этом случае задание в пространстве опорных направлений, фиксирующих эталонные углы, осуществляется с помощью автоколлиматоров, ориентированных на специальный калибр, фиксирующий точку пересечения геометрических осей контролируемого прибора. Калибр-эталон представляет собой многогранную призму с зеркальными гранями, нормали к которым образуют в пространстве требуемую геометрическую схему [7]. В качестве устройств фиксации

опорных направлений необходимо использовать двухкоординатные фотоэлектрические автоколлиматоры, сориентированные по нормальям соответствующих граней калибра.

Рассмотрим принципиальную геометрическую схему стенда для аттестации двумерных ВОЭУ, в которой используются автоколлиматоры, задающие опорные направления, а также вспомогательный двухкоординатный автоколлиматор с вертикально ориентированной оптической осью, предназначенный для установки в штатное положение призмённого калибра-эталона [7]. Для расширения метрологических возможностей стенда в его схему и конструкцию можно включить дальномерный канал. Изменение измеряемой дальности выполняется перемещением отражателя вдоль оси или применением нескольких отражателей, установленных на разных дистанциях [8]. Аттестации ВОЭУ на стенде предшествует его настройка и калибровка. После установки калибра-эталона на посадочное место его точно ориентируют по вертикали. Ориентация эталона в горизонтальной плоскости может осуществляться с меньшей точностью в связи с применением автоколлимационного метода работы. Автоколлиматоры обнуляются по соответствующим граням калибра-эталона. Таким образом, стенд выполняет функцию компаратора, сохраняющего систему опорных (референтных) направлений, и готов к выполнению основных функций.

На место калибра устанавливается контролируемый ВОЭУ. При этом он должен быть сориентирован в пространстве с помощью собственных установочных приспособлений таким образом, чтобы его геометро-оптический центр с допустимыми погрешностями совпадал с точкой О стенда. В соответствии с установленной методикой последовательно измеряются углы  $H_{и}$ ,  $V_{и}$  между соответствующими опорными направлениями.

Результаты измерений обрабатываются с помощью математической модели в виде системы уравнений, выражающих зависимость горизонтальной и вертикальной составляющих суммарной погрешности измерения угла от инструментальных погрешностей аттестуемого прибора [8]:

$$\begin{aligned} \Delta H &= H_{и} - H_0 = c \cos \alpha - i \operatorname{tg} \alpha + v \operatorname{tg} \alpha \cos A + \\ &+ e_H [\sin(H_{и} - P_V)] / R_H + \Delta_{\Sigma H}; \\ \Delta V &= V_{и} - V_0 = v \sin A + e_V [\sin(V_{и} - P_V)] / R_V + \Delta_{\Sigma V}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Delta H$ ,  $\Delta V$  – разности горизонтальных и вертикальных углов  $H_{и}$ ,  $V_{и}$ , измеряемых контролируемым прибором, и эталонных углов  $H_0$ ,  $V_0$ , фиксируемых стендом;  $\alpha$  – угол наклона оптической оси прибора его горизонтальной оси;  $i$  – неперпендикулярность горизонтальной и вертикальной осей;  $v$  – отклонение вертикальной оси от отвесного положения;  $e_H$ ,  $e_V$  – значения эксцентриситетов вертикального и горизонтального лимбов;  $P_H$ ,  $P_V$  – угловые величины эксцентриситетов;  $R_H$ ,  $R_V$  – радиусы лимбов;  $A$  – угол между коллимационной плоскостью и горизонтальным направлением, относительно которого совершен наклон  $v$ ;  $\Delta_{\Sigma H}$ ,  $\Delta_{\Sigma V}$  – суммарные случайные состав-

ляющие погрешностей измерения горизонтальных и вертикальных углов.

Выражения (1) содержат десять неизвестных величин:  $c$ ,  $i$ ,  $v$ ,  $A$ ,  $e_H$ ,  $e_V$ ,  $P_H$ ,  $P_V$ ,  $R_H$ ,  $R_V$ ,  $\Delta_{\Sigma H}$ ,  $\Delta_{\Sigma V}$ . Для определения указанных величин требуется составить систему уравнений, число которых является необходимым и достаточным. При этом, поскольку уравнения существенно упрощаются при  $\alpha=0$ , т. е. при измерении углов в горизонтальной плоскости, на стенде должен быть зафиксирован такой угол. При многократных измерениях этого угла с последовательными перестановками лимба могут быть определены составляющие  $v$ ,  $A$ ,  $e_H$ ,  $P_H$ ,  $\Delta_{\Sigma H}$ ,  $\Delta_{\Sigma V}$ . Для определения остальных составляющих погрешностей необходимо измерять горизонтальный угол между направлениями с  $\alpha \neq 0$ . Поэтому стенд включает автоколлиматоры, с помощью которых задаются направления с разными зенитными расстояниями. Анализ математической модели показывает, что для полной определённости необходимо иметь не менее пяти задающих автоколлиматоров [10].

Наведение испытуемого прибора на опорные направления с применением автоколлимационного метода позволяет автоматизировать эти операции и процесс аттестации в целом. С этой целью на объектив прибора необходимо установить насадку с полупрозрачным зеркалом, нормаль которого совмещается с оптической осью испытуемого прибора с помощью юстировочных устройств при наблюдении с помощью одного из горизонтальных автоколлиматоров. При этом погрешность совмещения носит аддитивный характер, и при измерении угла между двумя направлениями будет исключаться.

Поскольку в предложенном методе автоколлиматоры используются в двух режимах (коллимационном и автоколлимационном) требуется применение специальных автоколлиматоров, в которых должны быть сопряжены нуль-пункт осветительного канала и начальный отсчёт, даваемый анализатором приёмного канала.

Таким образом, рассмотренный в статье метрологический комплекс может обеспечить существенное повышение точности аттестации ВОЭУ, а также позволит автоматизировать процесс их поверки.

#### Л и т е р а т у р а

1. Дубиновский А. М., Панков Э. Д. Стендовые испытания и регулировка оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1986.
2. Аникст Д. А., Константинович К. М., Меськин И. В., Парвулюсов Ю. Б., Солдатов В. П., Хорошев М. В., Якушенков Ю. Г. Высокоточные угловые измерения / Под ред. Ю. Г. Якушенкова. М.: Машиностроение, 1987.
3. ГОСТ 8.009–84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
4. Якушенков Ю. Г. Основы оптико-электронного приборостроения: учебник. М.: Логос, 2013.
5. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Введение в проектирование оптико-электронных приборов: системный подход: Учебник / Под ред. Ю. Г. Якушенкова. М.: Изд-во «Университетская книга», 2016.

6. Солдатов В. П. Сканирование изображения объекта в фотоэлектрических датчиках перемещений с многоэлементными приемниками излучения // Измерительная техника. 2015. № 3. С. 26–28.

7. Парвулюсов Ю. Б., Жеболдов Г. В. Обоснование принципа построения стенда для контроля точности геодезических приборов // Известия вузов. Приборостроение. 1996. № 2. С. 20–22.

8. Парвулюсов Ю. Б., Шкаманова М. В. Принципы модульного проектирования метрологических угломерных

стендов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 5. С. 117–122.

9. Филоненко А. С., Шипицын Н. Г. Практикум по высшей геодезии. М.: Недра, 1965.

10. Парвулюсов Ю. Б., Гончар Б. В. Стенд для метрологической аттестации высокоточных угломерных приборов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2000. № 6. С. 157–162.

Дата принятия: 06.04.2017.

## ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

551.501.793

### Использование ненормализованных моментов для определения статистических параметров несферических частиц по их изображениям

Г. П. АРУМОВ, А. В. БУХАРИН

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия, e-mail: tumbul@iki.rssi.ru

*Рассмотрены две стадии статистической обработки сечений несферических частиц. Сечения получены по изображениям частиц с использованием ненормализованных моментов. Первая стадия основана на связи между ненормализованными моментами первого и второго порядков с коэффициентом пропускания и угловым размером ореола рассеяния оптического излучения вперед. На второй стадии по ненормализованным моментам до четвертого порядка с применением логнормального распределения восстановлены параметры распределения размеров частиц по площади поперечных сечений.*

**Ключевые слова:** ненормализованный момент, сечение, несферические частицы, перфорированный экран.

*Two stages of processing the nonspherical particles images using the nonnormalized moments of cross-sections measured according to these particles images. The first stage is based on the relationship between the nonnormalized moments of the first and second order with the transmission coefficient and the angular size of the halo from the forward scattering respectively. That relationship is determined by calibration. At the second stage the nonnormalized moments up to fourth order allow to restore the parameters for the distribution of cross-sections, using the lognormal distribution.*

**Key words:** nonnormalized moment, cross section, nonspherical particles, perforated screen.

Лидар упругого рассеяния предназначен для измерения сигнала обратного рассеяния от распространяющегося в среде пучка оптического излучения [1]. Разработка методов измерения, позволяющих связать параметры сигнала и частиц (размеры и концентрацию) рассеивающей среды, является проблемой для метрологии. Для контактных методов [2], базирующихся на принципах светорассеяния и реализуемых, например, в лазерных анализаторах частиц, определение размеров частиц основано на решении обратной задачи [3] с использованием априорной информации об оптических и геометрических характеристиках сферических частиц (действительная и мнимая части показателя преломления). Для несферических частиц обратная задача является некорректной, поэтому требуется заменить несферические частицы

сплюснутыми или вытянутыми сфероидами [4]. Упомянутые методы можно условно отнести к методологической программе полного восстановления [5]. В рамках этой программы маловероятно выполнение нескольких последовательных калибровок для измерения геометрических параметров частиц (линейных размеров, сечения, объема). Необходимым условием таких калибровок является разработка средств измерений, позволяющих связать микроструктуру частиц с трансформацией пучка. Тогда не требуется решать некорректную обратную задачу. Подобные методы можно отнести к методологической программе эффективного восстановления с использованием индикатора размера частиц – углового размера ореола пучка в рассеивающей среде [6]. Угловому размеру ореола можно поставить в соответствие эквива-