УДК 681.786.3

РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ УГЛОМЕРНЫХ ПРИБОРОВ С НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

© **2007 г.** **В. А. Мейтин**, канд. техн. наук

ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева", г. Красногорск, Московская обл.

E-mail: mva@zenit.istra.ru

В работе рассматривается применение метода разделения функций угловых мер и несущих конструкций для повышения точности крупногабаритных угломерных приборов. Представлены измерительные модули, позволяющие строить цепи точных передач произвольных угловых координат в условиях размещения модулей на несущих конструкциях с недетерминированной геометрией.

Коды OCIS: 120.0120, 230.0230, 080.0080, 120.1680.2304040, 080.2730, 080.2740.

Поступила в редакцию 07.05.2007.

В процессе работы крупногабаритных угломерных приборов, например, телескопов на многоосных монтировках [1, 2], из-за больших масс частей конструкции и наличия силовых передач возникают неустранимые случайные деформации конструкции и биения осей, в результате чего геометрия инструмента становится недетерминированной. В условиях применения абсолютного метода измерений эти неустранимые случайные деформации и биения осей оказываются принципиальным ограничением для существенного повышения инструментальной точности [3, 4]. Такая же проблема возникает при создании средств угловых измерений для высокоточных определений взаимных угловых положений разнесенных в пространстве систем координат или направлений при наличии деформирующихся, нестабильных механических связей между ними.

Принципиальное ограничение существенного повышения точности традиционных угломерных приборов с подвижной визирной линией определяется тем, что в каждом из них конструкция одновременно выполняет две противоречивые функции [5]. С одной стороны, она выполняет силовую функцию несущей конструкции – удерживает собственную массу, обеспечивает силовые передачи и из-за этого изменяется, деформируется случайным образом, т.е. несущая конструкция имеет недетерминированную геометрию. С другой стороны, при построении математической модели направления визирования осевая система, механика являются материальным носителем фиксируемых (детерминированных) параметров, углов или систем координат, необходимых для вычислений измеряемых угломерным прибором углов или направлений. В этом смысле конструкция выполняет функцию угловой меры, поэтому для обеспечения точности она не должна деформироваться или нарушать геометрию неоднозначным, случайным образом, т. е. несущая конструкция в процессе работы должна иметь детерминированную геометрию.

Известные работы, направленные на повышение точности рассматриваемых типов угломерных приборов [6–10], построены на измерении и учете, или компенсации, или устранении лишь части нарушений геометрии конструкции угломерного прибора, поэтому полностью не решают данную проблему. В цепи передач направления визирования от визирного устройства до системы координат, связанной с основанием угломерного прибора, остаются части конструкции с совмещенными противоречивыми функциями.

Поэтому для дальнейшего повышения точности угломерного прибора предлагается разделить эти функции [5, 11]. За осевой системой и механикой оставить функцию носителя массы и силовых передач – функцию несущей конструкции, а функцию угловой меры передать ненагруженным носителям систем координат и углов.

В настоящей работе описываются средства угловых измерений с преимущественным применением зеркально-призменных устройств коллинеарного переноса лучей (УКП) [12], эквивалентных по своему действию зеркальному ромбу или световозвращателю и позволяющих реализовать указанный метод разделения функций и снять принципиальное ограничение существенного повышения точности. Кроме того, они позволяют обеспечивать высокоточные (например, от десятых долей до единиц угловых секунд) определения взаимных угловых положений разнесенных в пространстве (до метров) и ориентированных произвольным образом систем координат или направлений при недетерминированной (до угловых минут) геометрии несущих конструкций.

Рассматриваемые угломерные приборы могут быть представлены математически в виде цепей

последовательно связанных между собой прямоугольных систем координат (СК). При этом известно, что если имеется ряд СК, для которых последовательно угловое положение одной СК определено относительно другой, то всегда можно определить угловое положение последней СК относительно первой СК, и наоборот – определить угловое положение первой СК относительно последней СК. Другими словами, если какое-либо визирное направление с ортом **a** определено в СК $X_nY_nZ_n$ как $\mathbf{a}_n$, где n – число последовательно связанных СК, то положение того же вектора **a** в СК $X_1Y_1Z_1$, т. е. $\mathbf{a}_1$, определяется как

$$\mathbf{A}_1 = S_1S_2\ldots S_{n-1}\,\mathbf{A}_n, \qquad (1)$$

где $\mathbf{A}_n$ – вектор-столбец из координат орта $\mathbf{a}_n$, $\mathbf{A}_1$ – вектор-столбец из координат орта $\mathbf{a}_1 = (a_{1x}, a_{1y}, a_{1z})$, $S_1, S_2, \ldots S_{n-1}$ – известные матрицы преобразования координат (если последовательно угловое положение одной СК известно относительно другой СК).

Затем, если, например, $X_1Y_1Z_1$ – горизонтальная СК, ось Z_1 совпадает с отвесной линией и направлена в зенит, то горизонтальный угол G и вертикальный угол H визирного направления, определяемого с помощью угломерного прибора, можно найти с помощью выражений

$$G = \arcsin a_{1y}(a_{1x}^2 + a_{1y}^2)^{-1/2}, \qquad (2)$$

$$H = \arcsin a_{1z}. \qquad (3)$$

Кроме того, общая цепь связанных между собой СК может быть представлена в виде последовательного ряда связанных между собой звеньев с последовательно определенными друг относительно друга системами координат $(X_1Y_1Z_1, X_2Y_2Z_2)_1$, $(X_2Y_2Z_2, X_3Y_3Z_3)_2$, $(X_3Y_3Z_3, X_4Y_4Z_4)_3$, ... , $(X_iY_iZ_i, X_{i+1}Y_{i+1}Z_{i+1})_i$, …, $(X_{n-1}Y_{n-1}Z_{n-1}, X_nY_nZ_n)_{n-1}$, где $i = 1, 2, \ldots, n-1$ – возможное число звеньев.

Также очевидно, если имеется ряд таких звеньев, то всегда можно составить полную цепь.

В общем случае каждым звеном может решаться задача передачи и преобразования одной, двух или трех угловых координат, причем как в малых, так и в больших диапазонах углов.

Рассмотрим базовые измерительные модули, предназначенные для решения таких задач. Особенностью модулей является то, что они позволяют определять с высокой точностью взаимное угловое положение двух или нескольких соседних СК, исключая влияние деформирующихся элементов конструкций, на которых они размещаются. Модули являются материальными носителями связываемых с ними определенных СК и углов, поэтому выполняют функции угловых мер. В дальнейшем, связывая эти модули, выполняющие функции угловых мер, в любых сочетаниях, можно получать различные угломерные цепи – "магазины угловых мер", оптические средства угловых измерений и угломерные приборы. Поэтому, с метрологической стороны, угломерный прибор можно рассматривать как цепь последовательно связанных между собой измерительных модулей.

В качестве примера рассмотрим звено (измерительный модуль) для высокоточных одно- и двухкоординатных определений взаимных угловых положений разнесенных в пространстве СК в малом диапазоне углов. Например, имеется протяженная несущая конструкция, один конец которой разворачивается и скручивается относительно другого конца из-за возникающих при эксплуатации деформаций (в общем случае по трем степеням свободы). С одним ее концом связана система координат $X_iY_iZ_i$, а с другим – $X_{i+1}Y_{i+1}Z_{i+1}$. Требуется знать с высокой точностью, какое угловое положение в процессе работы занимает одна СК относительно другой или как в процессе эксплуатации изменяется угловое положение одной СК относительно другой. На практике возникает множество подобных задач – от юстировки и монтажа оборудования до применений в качестве встраиваемых в изделия измерительных систем. Наиболее известная система (измерительный модуль) с УКП для решения этой задачи показана на рис. 1.

Для этого на концах деформирующейся конструкции *1* крепятся плоские зеркала *2* и *3*, ориентированные параллельно; устанавливается УКП *4* и автоколлиматор (АК) *5*. Зеркало *2* задает нормаль – ось X_i СК $X_iY_iZ_i$, а зеркало *3* задает нормаль – ось X_{i+1} СК $X_{i+1}Y_{i+1}Z_{i+1}$. Концевой отражатель УКП, находящийся в прямом пучке лучей из АК, имеет светоделительную грань, позволяющую наблюдать од-

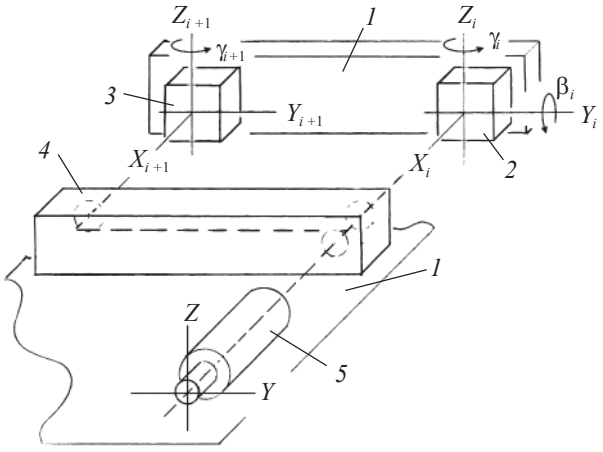


Рис. 1. Измерительный модуль – двухкоординатный преобразователь углов малого диапазона (пояснения см. с тексте).

новременно с автоколлимационным изображением от зеркала *3* и автоколлимационное изображение от зеркала *2*. Направления осей Y_iZ_i и $Y_{i+1}Z_{i+1}$ в плоскости зеркал *2* и *3* определяются направлениями осей измерительных координат АК *Y* и *Z* (в исходном положении они им параллельны). По разности отчетов с АК от двух зеркал получаются углы β и γ взаимных поворотов зеркал или связанных с ними СК, причем

$$\beta = \beta_{i+1} - \beta_i,\ \gamma = \gamma_{i+1} - \gamma_i, \qquad (4)$$

где β_i и γ_i, β_{i+1} и γ_{i+1} – углы поворотов зеркал *2* и *3* вокруг осей *Y* и *Z* от выбранного исходного положения, например, когда они параллельны. При отсутствии параллельности зеркал в исходном положении (или когда есть систематические погрешности у УКП) формулы (4) дополняются постоянными поправками, которые находятся по специальным методикам.

Так определяется взаимное угловое положение СК $X_{i+1}Y_{i+1}Z_{i+1}$ относительно $X_iY_iZ_i$ при разворотах по двум координатам. Точность измерений определяется точностью УКП и АК, причем прогибы корпуса АК не влияют на точность, так как определение углов строится по разностной схеме. Если измерения требуется выполнять в реальном времени при непрерывных изменениях угловых положений зеркал *2* и *3*, то для таких целей используются фотоэлектрические АК [13].

Однако определение взаимного углового положения связываемых систем координат по трем угловым координатам на основе рассмотренной измерительной системы требует наличия еще одного такого устройства. Поэтому была предложена сравнительно простая схема (рис. 2) [14], обеспечивающая одновременное определение или передачу трех угловых координат. Схема включает в себя УКП *1*, АК *2*, плоские зеркала *3*, *4*, *5*, *6*. Зеркала *5* и *6*, *3* и *4* жестко связаны между собой.

При измерениях по граням *4* и *5* определяются две угловые координаты β и γ, а при измерениях по зеркалу *3* – третья угловая координата α.

Аналогично устанавливаются связи между системами координат при применении в качестве носителей СК (измерительных модулей) многогранных призм и преобразователей углов. Связав со схемой рис. 1 преобразователь угла (датчик угла поворота), можно получить измерительный модуль для определения взаимного углового положения разнесенных в пространстве систем координат $X_iY_iZ_i$ и $X_{i+1}Y_{i+1}Z_{i+1}$ при отсутствии жесткой связи между ними и возможности осуществления произвольных поворотов вокруг одной из осей координат. Связав две такие системы, можно получить двухкоординатный преобразователь произвольных углов и далее –

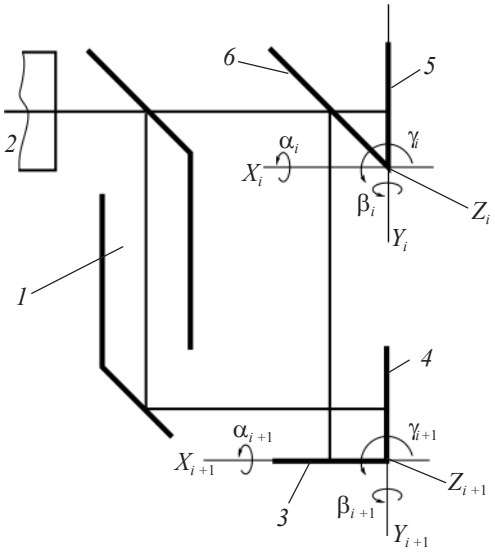


Рис. 2. Измерительный модуль – трехкоординатный преобразователь углов малого диапазона (пояснения см. с тексте).

трехкоординатный. Однако последние схемы получаются сравнительно громоздкими [15]. Если воспользоваться схемой трехкоординатного преобразователя малых углов (рис. 2) то можно предложить достаточно компактную схему двухкоординатного преобразователя произвольных углов [16], содержащую одно УКП и один АК (рис. 3).

Устройство содержит АК *1*, УКП *2* и шесть плоских отражателей. Первый отражатель *3* и второй отражатель *5* ориентированы параллельно друг другу и связаны между собой оптически с помощью УКП *2* и АК *1*. Третий отражатель *4* ориентирован под прямым углом ко второму отражателю *5*. Четвертый отражатель *6* образует со вторым отражателем *5* двугранный угол, равный половине двугранного угла, образованного вторым *5* и третьим *4* отражателями. При этом второй *5* и четвертый *6* отражатели жестко связаны между собой. Пятый отражатель *10* ориентирован под прямым углом ко второму отражателю *5*. Шестой отражатель *9* образует со вторым отражателем *5* двугранный угол, равный половине двугранного угла, образованного пятым *10* и вторым *5* отражателями. При этом шестой *9* и второй *5* отражатели жестко связаны между собой. Вместе с тем третий отражатель *4* связан оптически со вторым отражателем *5* автоколлиматором *1* и четвертым отражателем *6*. Пятый отражатель *10* связан оптически со вторым отражателем *5* автоколлиматором *1* и шестым отражателем *9*. Данное устройство содержит седьмой *8* и восьмой *7* плоские зеркальные отражатели. Оно также включает первый и второй датчики углов поворота, каждый из которых содержит роторную *11* (*12*) и статорную *13* (*14*) части; платформу *15*, на которой закреплены АК *1*, УКП *2*; статорные части

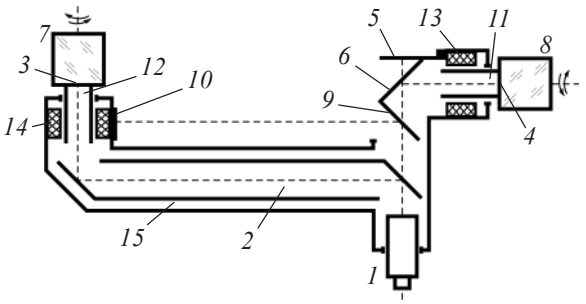


Рис. 3. Измерительный модуль – двухкоординатный преобразователь произвольных углов (пояснения см. с тексте).

13 и *14* первого и второго датчиков углов поворота соответственно.

Принцип действия устройства заключается в том, что зеркало *7* устройства (рис. 3) поворачивается вокруг осей датчиков углов в любое необходимое положение относительно углового зеркала, образованного зеркалами *4* и *8*. При этом снимаются отсчеты по первому и второму датчикам. Также снимают отсчеты по автоколлиматору при автоколлимации от зеркал *3*, *4*, *5*, *10*. По этим данным определяются углы между зеркалами *7* и *4*, *8*. Рассмотренное устройство позволяет определять в статическом и динамическом режимах взаимные угловые положения плоских отражателей при их произвольных поворотах вокруг двух взаимно перпендикулярных осей (или определять взаимные угловые положения систем координат, с ними связанных) при взаимной угловой нестабильности всех элементов устройства (УКП, АК и угловых биениях роторов относительно статоров датчиков).

Далее, воспользовавшись схемой двухкоординатного преобразователя [16], можно построить трехкоординатный преобразователь [17]. Все эти устройства являются различными видами измерительных модулей.

В качестве измерительных модулей также используются зеркально-призменные носители СК, искусственный горизонт, нерасстраивающийся коллиматор с маркой, расположенной в главной точке его объектива [18]. Применяя различные сочетания таких измерительных модулей, можно получать множество углоизмерительных цепей, работающих с высокой точностью на деформирующихся, нестабильных конструкциях. Например, можно разрабатывать угломеры с встроенными в конструкцию измерительными модулями [19] (рис. 4) и с навешиваемыми на традиционные конструкции угломеров измерительными модулями [20]. При этом такой инструмент становится точным угломерным прибором, деформации конструкции и биения осей которого не влияют на точность измерения углов.

В ряде случаев навешиваемую на трубу телескопа измерительную систему из последовательно связываемых между собой измерительных модулей применяют как средство аттестации вместо многотрубной коллиматорной установки [21], поскольку для проверяемого крупногабаритного изделия весьма сложно устанавливать высокоточную коллиматорную установку из-за проблем поддерживания ее точности, аттестации, поверки и размещения в ограниченном пространстве вокруг изделия.

На рис. 5 представлен угломерный комплект, навешиваемый на трубу телескопа (ТТ), в состав которого входят: *1* – кронштейн, *2* – объектив, *3* – УКП, *4*, *5* – прямые многоугольные призмы, *6* – по-

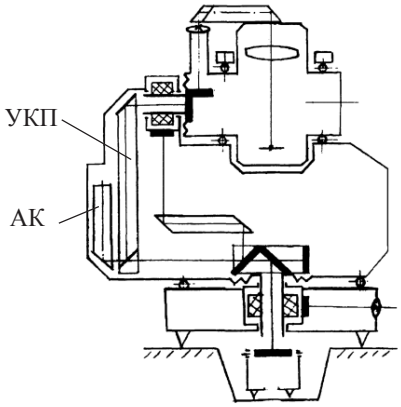


Рис. 4. Угломерный прибор с измерительными модулями, встроенными в несущую конструкцию (пояснения см. с тексте).

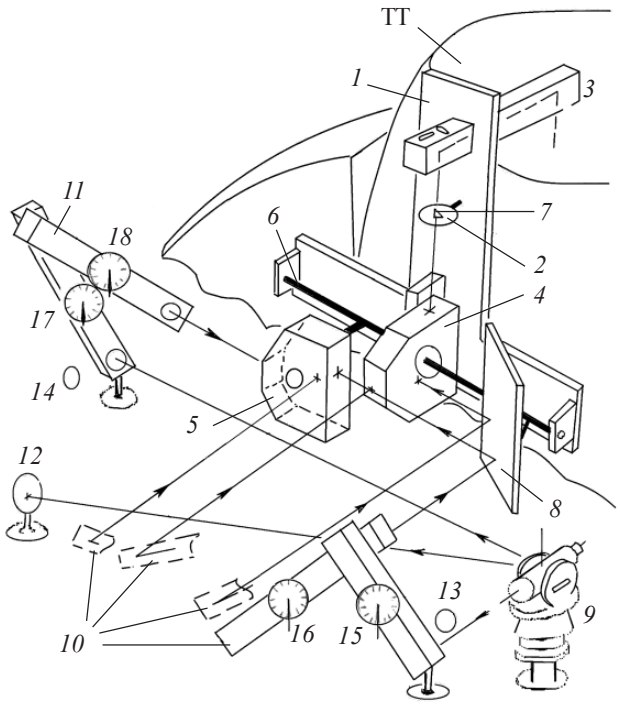


Рис. 5. Угломерный комплект с измерительными модулями, навешиваемыми на несущую конструкцию (пояснения см. с тексте).

воротный столик, *7* – марка, расположенная в главной точке объектива *2*; *8* – плоское зеркало, *9* – автоколлимационный теодолит, *10* и *11* – составные УКП (пантографы УКП), *12* – зеркало привязки на фундаменте, *13* и *14* – съемные зеркала привязки УКП, *15* и *16*, *17* и *18* – лимбы с отвесами на УКП.

Опыт разработки и эксплуатации таких приборов подтверждает эффективность применения метода разделения функций и нерасстраивающихся измерительных модулей для создания более точных средств угловых измерений с недетерминированной геометрией несущих конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Елисеев С.В*. Геодезические инструменты и приборы. М.: Недра, 1973. 256 с.
2. *Плотников В.С.* Геодезические приборы. М: Недра, 1987. 396 с.
3. *Подобед В.В.* Фундаментальная астрометрия. М: Наука, 1968. 452 с.
4. *Блажко С.Н*. Курс практической астрономии. М: Наука, 1979. 432 с.
5. *Мейтин В.А*. Детерминированная модель угломерного прибора и его погрешности // Оптический журнал. 1994. № 7. С. 60–62.
6. *Власов Б.И.* Устройство для автоколлимационного осуществления оси вращения трубы в любых азимутах // Новая техника в астрономии. 1970. В. 3. С. 157–161.
7. *Латыев С.М*. Компенсация погрешностей в оптических приборах. Л.: Машиностроение, 1985. 248 с.
8. *Усов В.С*. Исследование и синтез оптических систем приборов для высокоточных измерений // Автореф. докт. дис. М.: МИИГАиК, 1974. 40 с.
9. *Плотников В.С., Корнеев С.Н., Канашкин Р.О*. Устройство определения отклонения горизонтальной оси углоизмерительного прибора // Патент России № 1767331. 1992.
10. *Колосов М.П*. Оптика адаптивных угломеров. М.: ООО СКАН-1, 1997. 212 с.
11. *Мейтин В.А*. Разработка квазиидеальных оптических угломерных приборов на основе применения способа разделения функций // Материалы VI междун. конф. “Прикладная оптика-2004”. СПб., 2004. Т. 1. С. 7–11.
12. *Мейтин В.А.* Исследование и разработка зеркально-призменных систем для высокоточных устройств коллинеарного переноса // Автореф. канд. дис. М.: МИИГАиК, 1982. 22 с.
13. *Мейтин В.А., Великотный М.А., Кресюн Ю.В., Шапина Г.М.* Устройство определения взаимного углового положения двух отражателей // А.с. № 1744685. Бюл. изобр. 1992. № 24. С. 204.
14. *Мейтин В.А*. Измерительная система для квазиидеального оптического угломера // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 11. С. 42–46.
15. *Мейтин В.А*. Анализ погрешностей угломерного прибора с квазиидеальной системой координат // Оптический журнал. 1992. № 4. С. 47–51.
16. *Мейтин В.А., Бельский А.Б., Герасюк А.К., Майков Б.П.* Устройство для измерения взаимного углового положения отражателей // Патент России № 2186337. 2002.
17. *Мейтин В.А*. Разработка высокоточного оптического трехкоординатного преобразователя углов // Материалы VI междун. конф. “Прикладная оптика-2006”. СПб., 2006. С. 60–63.
18. *Мейтин В.А., Чернов В.С*. Угломерный инструмент с квазиидеальной системой координат // ОМП. 1983. № 10. С. 45–48.
19. *Мейтин В.А.* Теодолит // Патент России № 2209392. 2003.
20. *Мейтин В.А*. Система для определения погрешности направления визирования телескопа // А. с. 1610257. Бюл. изобр. 1990. № 44. С. 168–169.
21. *Мейтин В.А., Харламов В.Н*. Система для определения погрешности направления визирования телескопа // А. с. 1335805. Бюл. изобр. 1987. № 33. С. 138.