

А. И. ШИМАРОВ

**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ**

Рассматривается способ определения углового положения одного объекта относительно другого. Представлено теоретическое обоснование способа, приведены выражения для расчета углов поворота объекта и результаты экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** измерение, оптико-электронный способ, угловое положение объекта.

Задачи, связанные с разработкой способов и устройств для дистанционного контроля углового положения объектов, относятся к числу актуальных и требующих постоянного совершенствования и развития. Известный способ определения углового положения объекта, предложенный в работах [1—3], заключается в том, что с базового объекта (БО) на контролируемый объект (КО) проецируют измерительную диаграмму [1, 2]. Эту диаграмму формируют тремя расходящимися под заданными углами  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  веерообразными пучками световых лучей 7; далее определяют взаимное положение следов 8 этих лучей на экране 4, что позволяет вычислить угловое положение контролируемого объекта (рис. 1). Устройство, реализующее этот способ, содержит проектор 1, состоящий из источника света 2 и светоделительной оптической системы 3, а также экран 4 с двумя шкалами 5 и 6, нанесенными на его поверхность. Связь взаимного положения следов лучей 7 с величиной углов  $\beta$  и  $\mu$  поворота КО вокруг двух взаимно перпендикулярных осей  $O_K Z_K$  и  $O_K Y_K$ , соответственно описывается выражениями

$$\operatorname{tg} \beta = \pm \left\{ -\frac{m}{2} + \left[ \left( \frac{m}{2} \right)^2 + n \right]^{1/2} \right\}^{1/2}; \quad (1)$$

$$\sin \mu = C(1 - A^2) \cos \beta (4d \operatorname{tg} \varepsilon)^{-1}, \quad (2)$$

где

$$m = 1 - C^2 (1 - A^2)^2 (16d \operatorname{tg}^2 \varepsilon)^{-1} - n; \quad n = A^2 (\operatorname{tg}^2 \varepsilon)^{-1}; \quad A = (\Delta Z_1 - \Delta Z_2)(\Delta Z_1 + \Delta Z_2)^{-1};$$

$$C = (\Delta Z_3 + \Delta Z_4) - (\Delta Z_1 + \Delta Z_2);$$

$2d$  — расстояние между измерительными шкалами 5 и 6 экрана;  $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$  — угол между соседними пучками световых лучей;  $\Delta Z_1, \Delta Z_2, \Delta Z_3, \Delta Z_4$  — интервалы между точками пересечения следов световых лучей 7 со шкалами 5 и 6.

При измерениях данным способом, как это видно из выражений (1) и (2), вычисленное значение угла  $\beta$  является функцией ряда параметров:  $\beta = f(\Delta Z_i; \varepsilon; d)$ , т.е. точность определения угла  $\beta$  зависит не только от точности измерения интервалов  $\Delta Z_i, i = 1, 2, 3, 4$ , но и угла  $\varepsilon$  и расстояния  $d$ . Вычисленное значение угла  $\mu$  также является функцией нескольких параметров.

Анализ выражений (1) и (2) показывает, что наибольшее влияние на точность определения углов  $\mu$  и  $\beta$  поворота оказывает параметр  $\varepsilon$ . Выбор величины  $\varepsilon$  осуществляется в зависимости от диапазона измеряемых углов, расстояния  $S$  между базовым и контролируемым объектами, а также исходя из конструктивных требований к устройству, реализующему способ измерений. Например, увеличение  $\varepsilon$  ведет к повышению чувствительности измерительного устройства и, вместе с тем, к уменьшению диапазона измеряемых углов. Обычно меньшим значениям  $S$  соответствуют бóльшие значения  $\varepsilon$ . Задание параметра  $\varepsilon$  в процессе измерений

необходимо осуществлять с высокой точностью (до десятых или сотых долей градуса), что является сложной технической задачей. В связи с этим в процессе вычисления углов  $\beta$  и  $\mu$  параметр  $\varepsilon$  имеет действительное значение  $\varepsilon_d$ , которое отличается от номинального значения  $\varepsilon_n$ . Таким образом, измерение интервалов  $\Delta Z_i$  осуществляется при одном значении параметра  $\varepsilon = \varepsilon_d$ , а вычисление углов поворота  $\beta$  и  $\mu$  — при другом:  $\varepsilon = \varepsilon_n$ . Вторая составляющая погрешностей измерений по этому способу обусловлена отличием действительного значения  $d_d$  расстояния  $2d$  между шкалами 5 и 6 в момент проведения измерений от его номинального значения  $d_n$ , которое используется при вычислении углов поворота КО.

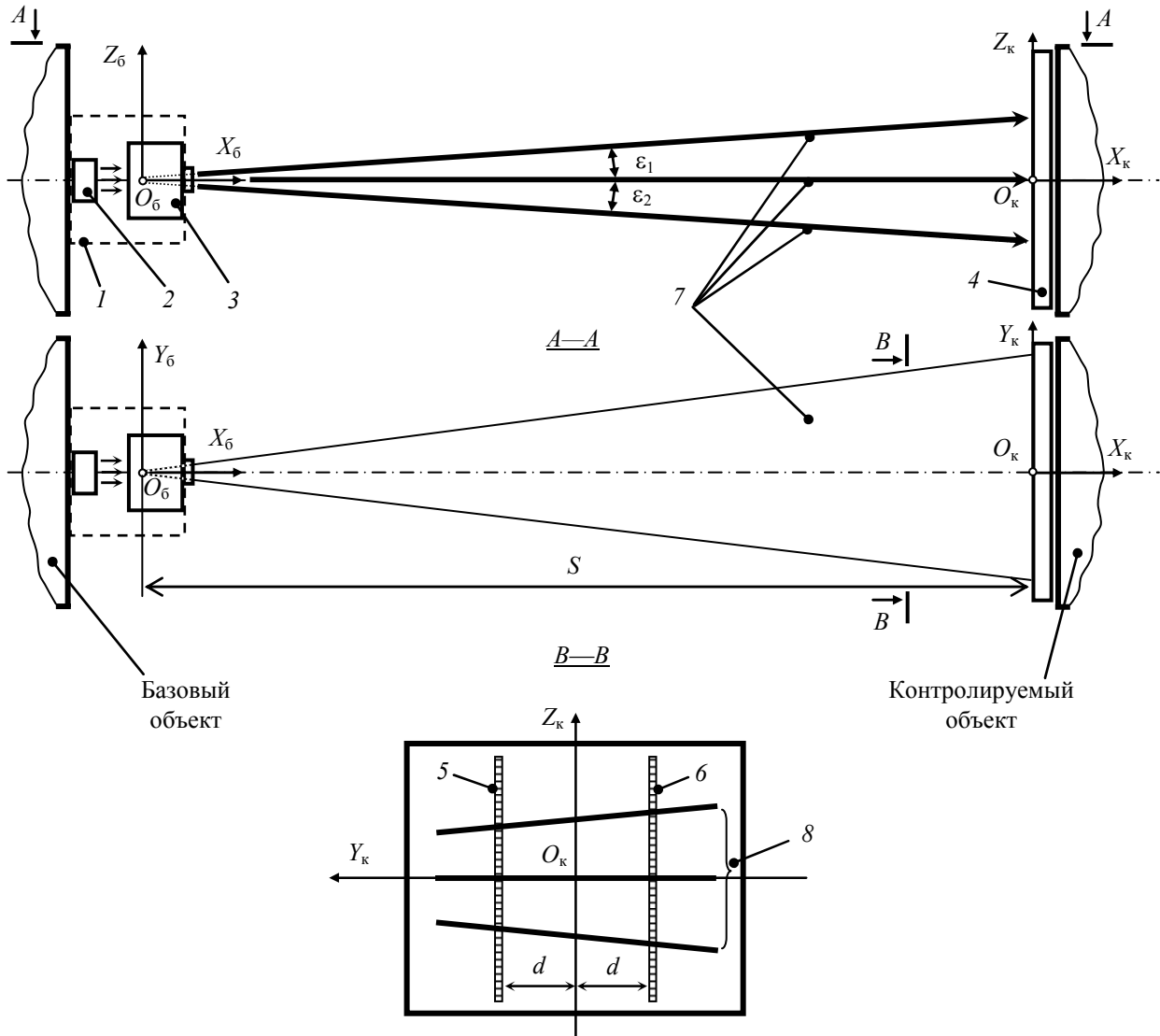


Рис. 1

Из вышеизложенного следует, что для обеспечения высокой точности определения углового положения КО необходимо повысить точность задания параметров  $\varepsilon$  и  $d$  или обеспечить независимость результатов от этих параметров. Предлагаемый в настоящей статье способ позволяет решить вторую задачу.

Этот способ заключается в следующем. После определения взаимного положения следов световых лучей на экране пучки лучей поворачивают на малый образцовый угол сначала вокруг оси, параллельной линии пересечения плоскостей этих пучков, и вторично определяют положение следов на экране. Затем их поворачивают вокруг оси, перпендикулярной указанной линии пересечения, и в третий раз определяют положение следов на экране.

Взаиморасположение следов 8 световых лучей 7 на каждом этапе определяют, измеряя интервалы  $\Delta Z_i$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ , между точками пересечения следов со шкалами 5 и 6:  $\Delta Z_1^{(j)}, \Delta Z_2^{(j)}, \Delta Z_3^{(j)}, \Delta Z_4^{(j)}$ , где  $j$  — номер этапа измерения. По результатам этих измерений вычисляют угловое положение объекта.

На рис. 2 приведены примеры взаимного положения следов световых лучей для трех промежуточных этапов определения углов поворота КО. Эти примеры для наглядности соответствуют такому положению КО, при котором  $\beta = 0, \mu = 0$ .

*Первый этап* (см. рис. 2, а): интервалы  $\Delta Z_i$  связаны с углами  $\beta$  и  $\mu$  следующими выражениями:

$$\Delta Z_1^{(j)} = \frac{D^{(j)}}{E^{(j)}} \operatorname{tg} \varepsilon; \quad \Delta Z_2^{(j)} = \frac{D^{(j)}}{F^{(j)}} \operatorname{tg} \varepsilon; \quad \Delta Z_3^{(j)} = \frac{G^{(j)}}{E^{(j)}} \operatorname{tg} \varepsilon; \quad \Delta Z_4^{(j)} = \frac{G^{(j)}}{F^{(j)}} \operatorname{tg} \varepsilon, \quad j = 1, \quad (3)$$

где

$$D^{(1)} = S \cos \mu - d \cos \beta \sin \mu; \quad G^{(1)} = S \cos \mu + d \cos \beta \sin \mu; \\ E^{(1)} = \cos \beta (\cos \beta + \operatorname{tg} \varepsilon \sin \beta \cos \mu); \quad F^{(1)} = \cos \beta (\cos \beta - \operatorname{tg} \varepsilon \sin \beta \cos \mu);$$

здесь  $S$  — расстояние между началами  $O_6$  и  $O_K$  систем координат  $X_6 Z_6 Y_6$  и  $X_K Z_K Y_K$  базового и контролируемого объектов.

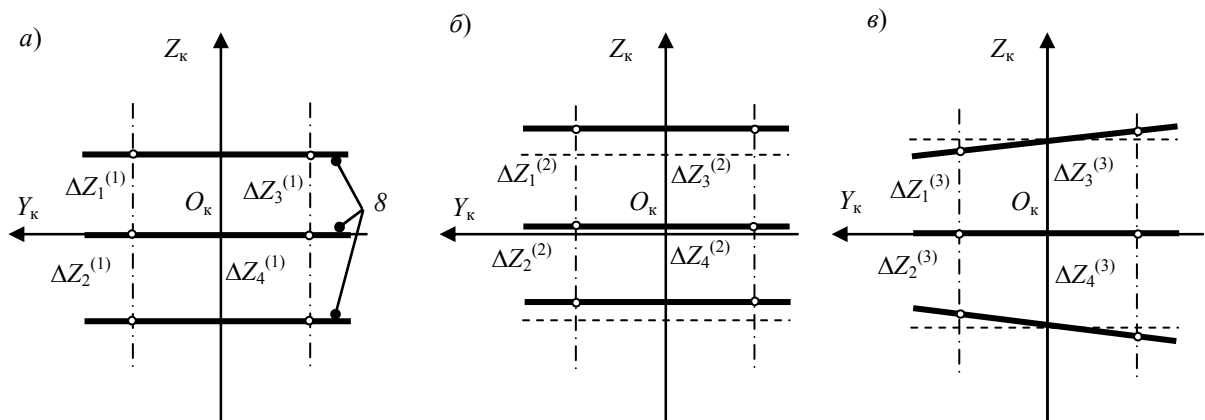


Рис. 2

*Второй этап* (см. рис. 2, б): пучки лучей поворачивают на малый образцовый угол  $\Delta \beta$  вокруг оси, параллельной линии пересечения плоскостей этих пучков (т.е. вокруг оси  $O_6 Y_6$  системы координат  $X_6 Z_6 Y_6$ ), и вторично определяют взаимное расположение следов лучей, измеряя интервалы  $\Delta Z_1^{(2)}, \Delta Z_2^{(2)}, \Delta Z_3^{(2)}, \Delta Z_4^{(2)}$ . Эти интервалы связаны с углами  $\beta$  и  $\mu$  соотношениями (3), в которых величины  $D^{(j)}, G^{(j)}, E^{(j)}$  и  $F^{(j)}$ ,  $j=2$ , определяются из выражений

$$\left. \begin{aligned} D^{(2)} &= S \cos \mu - d \cos (\beta + \Delta \beta) \sin \mu; \\ G^{(2)} &= S \cos \mu + d \cos (\beta + \Delta \beta) \sin \mu; \\ E^{(2)} &= \cos (\beta + \Delta \beta) (\cos (\beta + \Delta \beta) + \operatorname{tg} \varepsilon \sin (\beta + \Delta \beta) \cos \mu), \\ F^{(2)} &= \cos (\beta + \Delta \beta) (\cos (\beta + \Delta \beta) - \operatorname{tg} \varepsilon \sin (\beta + \Delta \beta) \cos \mu). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

*Третий этап* (см. рис. 2, в): световые пучки поворачивают на малый образцовый угол  $\Delta \mu$  вокруг оси, перпендикулярной линии пересечения плоскостей этих пучков (т.е. вокруг оси  $O_6 Z_6$ ), и в третий раз определяют положение следов лучей, измеряя интервалы  $\Delta Z_1^{(3)}, \Delta Z_2^{(3)}$ ,

$\Delta Z_3^{(3)}, \Delta Z_4^{(3)}$ . Эти интервалы связаны с углами  $\beta$  и  $\mu$  соотношениями (3), в которых величины  $D^{(j)}, G^{(j)}, E^{(j)}$  и  $F^{(j)}, j=3$ , определяются из выражений

$$\left. \begin{aligned} D^{(3)} &= S \cos(\mu + \Delta\mu) - d \cos\beta \sin(\mu + \Delta\mu); \\ G^{(3)} &= S \cos(\mu + \Delta\mu) + d \cos\beta \sin(\mu + \Delta\mu); \\ E^{(3)} &= \cos\beta [\cos\beta + \operatorname{tg}\varepsilon \sin\beta \cos(\mu + \Delta\mu)], \\ F^{(3)} &= \cos\beta [\cos\beta - \operatorname{tg}\varepsilon \sin\beta \cos(\mu + \Delta\mu)]. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

На четвертом этапе определяют угловое положение контролируемого объекта: из уравнений (3) и (4) следует формула для вычисления угла  $\beta$ , а из уравнений (3) и (5) — формула для вычисления угла  $\mu$ :

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{(M^{(2)} - 1) \pm \left[ (M^{(2)} - 1)^2 + 4M^{(2)} \operatorname{tg}^2(\Delta\beta) \right]^{1/2}}{2M^{(2)} \operatorname{tg}(\Delta\beta)}, \quad \operatorname{ctg}\mu = \frac{M^{(3)} - \cos(\Delta\mu)}{\sin(\Delta\mu)}, \quad (6)$$

где

$$M^{(2)} = \frac{(\Delta Z_4^{(2)} - \Delta Z_3^{(2)}) (\Delta Z_4^{(1)} + \Delta Z_3^{(1)})}{(\Delta Z_4^{(2)} + \Delta Z_3^{(2)}) (\Delta Z_4^{(1)} - \Delta Z_3^{(1)})}, \quad M^{(3)} = \frac{(\Delta Z_1^{(3)} + \Delta Z_2^{(3)}) - (\Delta Z_3^{(3)} + \Delta Z_4^{(3)})}{(\Delta Z_1 + \Delta Z_2) - (\Delta Z_3 - \Delta Z_4)}.$$

Поворот световых пучков на малый известный угол позволяет определить реальную передаточную функцию измерительного устройства в процессе вычисления углов поворота КО. Величина образцовых углов  $\Delta\beta$  и  $\Delta\mu$  выбирается в зависимости от диапазонов измеряемых углов, расстояния между объектами, а также ряда других факторов и составляет 1...10 % от указанных диапазонов. Следует отметить, что поворот пучков световых лучей вокруг оси  $O_6Y_6$ , параллельной линии пересечения плоскостей этих пучков, повышает точность определения угла  $\beta$ , а поворот вокруг оси  $O_kZ_k$ , перпендикулярной указанной линии, — точность определения угла  $\mu$ .

Рассмотренный способ имеет более высокие метрологические характеристики по сравнению с известным. При измерениях, осуществляемых в соответствии с данным способом, как это видно из выражений (6), вычисленные значения углов представляют собой функции  $\beta = f_1(\Delta Z_i^{(1)}; \Delta Z_i^{(2)}; \Delta\beta)$  и  $\mu = f_2(\Delta Z_i^{(1)}; \Delta Z_i^{(3)}; \Delta\mu)$ , которые не зависят от параметров  $\varepsilon$  и  $d$  измерительной системы, а также от текущего углового положения КО. Это свойство позволяет при определении углового положения КО устанавливать параметр  $\varepsilon$ , ориентируясь только на получение необходимых размеров измерительной диаграммы, не измеряя при этом величину  $\varepsilon$ . Чем больше размеры диаграммы (при заданных размерах экрана), тем выше точность измерения интервалов  $\Delta Z_i^{(j)}$ , а следовательно, выше точность определения углов  $\beta$  и  $\mu$ .

Таким образом, путем дополнительных поворотов пучков световых лучей можно определить действительное значение передаточной функции измерительной системы без вычисления значений ее конструктивных параметров, т.е. установить связь между выходными ( $\Delta Z_i^{(j)}$ ) и входными ( $\beta$  и  $\mu$ ) величинами в момент текущего измерения. Использование полученной информации и обработка результатов всех измерений позволяют определить угловое положение КО с точностью, не зависящей от точности задания  $\varepsilon$  и  $d$ .

Были проведены сравнительные испытания по определению углового положения объектов с использованием известного и предлагаемого способов. Контролируемый объект имитировался горизонтально расположенной плоскостью (1450×1450 мм) с двумя шкалами (с ценой деления 1 мм), нанесенными на ее поверхность на расстоянии 400 мм друг от друга. Угловое

положение плоскости задавалось посредством оптического квадранта типа КО-1М. Проектор был построен на базе полупроводникового лазерного диода, светоделительной призмы, цилиндрических линз и других элементов. Номинальное значение угла  $\varepsilon$  составляло  $35^\circ$ . Образцовые приращения углов, заданные с помощью специальной поворотной платформы, имели следующие значения:  $\Delta\beta = \Delta\mu = 2^\circ 30'$ . Для определения углов поворота КО использовалось вычислительное устройство на базе персонального компьютера. Результаты экспериментальных сравнительных исследований приведены в таблице.

Параметр	Заданное значение, ...°	Способ-прототип		Предлагаемый способ	
		Измеренное значение, ...°	Погрешность, %	Измеренное значение, ...°	Погрешность, %
$\beta$	15,0	15,6	3,7	14,9	0,6
	25,0	23,6	5,6	25,1	0,4
$\mu$	15,0	15,2	1,3	15,1	0,3
	25,0	25,6	2,4	24,9	0,4

Следует отметить, что разработанный способ прост в реализации, так как не требует высокой точности изготовления элементов оптической системы проектора и экрана, а также наличия специальных устройств для задания и периодического контроля величин  $\varepsilon$  и  $d$ . Этот способ может быть использован при создании систем для контроля углового положения труднодоступных объектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликовский К. Л., Шимаров А. И. Способ определения углового положения объектов // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1978. Т. 21, № 11. С. 116—120.
2. А. с. 659901 СССР. Устройство для измерения углов наклона / К. Л. Куликовский, В. Я. Купер, А. И. Шимаров // Б.И. 1979. № 16.
3. Шимаров А. И. Метод определения взаимного положения объектов // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1984. Т. 27, № 1. С. 89—93.

#### Сведения об авторе

**Александр Иванович Шимаров** — канд. техн. наук, доцент; Самарский государственный технический университет, кафедра теоретической и общей электротехники;  
E-mail: alexandr-shimarov@rambler.ru

Рекомендована кафедрой  
теоретической и общей электротехники

Поступила в редакцию  
02.04.11 г.