

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 629.973

ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА В ПРОСТРАНСТВЕ И СРЕДСТВО ЕГО КОНТРОЛЯ

© 2008 г. С. Г. Славнов

НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт Петербург

Приведены описания способа построения оптического датчика положения объекта в пространстве и средства его контроля. Способ основан на методике формирования плоского и телесного углов светового пучка, образованного множеством лучей, вышедших из площадки ограниченных размеров. Предлагаются принципиальные оптические схемы датчика и средства контроля и аналитические выражения для вычисления координат объекта. Средство контроля позволяет учитывать погрешности работы источника в процессе измерений координат объекта. Приводятся результаты эксперимента для случая визуальной оценки угловых и линейных координат с точностью 3" и 0,07 мм соответственно.

Коды OCIS: 350.6090, 350.1260.

Поступила в редакцию 15.10.2007.

Проблема ориентации в пространстве существует как для космических, так и для наземных объектов. Известны средства решения этой проблемы [1]. Однако сложность технического исполнения большинства известных способов требует поиска новых и в первую очередь таких способов, которые обеспечивали бы наиболее простые решения. В предлагаемой работе делается попытка найти решение указанной проблемы с помощью несложных оптико-механических схем – датчика и средства контроля.

В основе построения схем лежит способ формирования и измерения плоского и телесного углов [2] светового пучка, образованного множеством лучей, выходящих из площадки ограниченных размеров [3]. Согласно этой модели (модель С.Г. Славнова) пучок представляет собой совокупность лучей, соответствующих волновому фронту (ВФ) произвольной формы, характеризующемуся радиусом кривизны при вершине, равным R (рис. 1), причем каждый луч перпендикулярен ему в каждой точке. Среда распространения ВФ предполагается однородной и изотропной с показателем преломления $n = 1$ (воздух). Ограничим пучок лучей некоторой излучающей площадкой диаметром d и участком ВФ в ее пределах (рис. 1). Определим световой треугольник как равнобедренный, основанием которого служит диаметр световой площадки источника излучения d , а сторонами – радиусы кривизны ВФ R . Тогда плоским световым углом φ будет угол при вершине светового треугольника

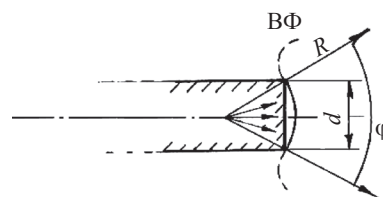


Рис. 1. Многолучевой источник с ограниченной световой площадкой. ВФ – волновой фронт, R – радиус кривизны волнового фронта, d – диаметр световой площадки, φ – плоский угол.

$$\sin(\varphi/2) = d/(2R), \quad (1)$$

а телесный угол Ω , соответствующий плоскому углу, определится как

$$\Omega = 2\pi[1 - \cos \arcsin(d/(2R))]. \quad (2)$$

Оптическая схема датчика, формирующего световой треугольник и позволяющего реализовать соотношения (1) и (2), приведена на рис. 2. Световой пучок лампы 1 (с конденсором, не показанным на рис. 2), ограниченный диафрагмой 2, проходит объектив 3 и выходит наружу через диафрагму 4. Что касается размера диафрагмы 4, то следует рассмотреть два случая: 1) когда распределение энергии по сечению пучка равномерно, ее размер определяется размером световой площадки источника; 2) когда в источнике распределение энергии по се-

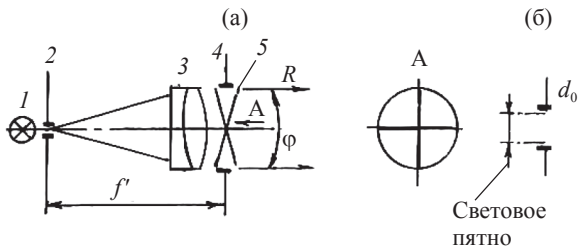


Рис. 2. Оптическая схема датчика. а – устройство датчика и перекрестия, б – вид светового пятна и диафрагмы d_0 . 1 – лампа накаливания, 2 – диафрагма d_0 , 3 – объектив, 4 – диафрагма d , 5 – перекрестие, f' – фокусное расстояние объектива 3, φ – плоский угол, R – радиус кривизны волнового фронта.

чению пучка неравномерно, ее размер должен быть немного больше диаметра светового пучка, который определяется размером площадки источника. В данной работе рассматривается случай, когда распределение энергии по сечению пучка неравномерно.

Пучок лучей, выходящий из диафрагмы 4, предполагается осесимметричным, и его главный луч совпадает с осью средства контроля. Диафрагма 2 располагается в фокальной плоскости объектива 3, а на оправе объектива установлено перекрестие нитей (вид А). Датчик является принадлежностью объекта, координаты которого должны быть измерены.

Воспользуемся известной формулой отрезков [4]

$$-\frac{1}{R} + \frac{1}{f' \pm \Delta} = \frac{1}{f'}, \quad (3)$$

где Δ – допустимая расфокусировка объектива 3, откуда находим

$$R = \frac{f'}{d_0} (d_0 \pm d), \quad (4)$$

где d_0 – размер диафрагмы 2. Подставляя значение радиуса R в формулу (1), получаем выражение для светового плоского угла

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{f'} \frac{d_0 d}{d \pm d_0} \right). \quad (5)$$

Тогда формула для телесного угла принимает вид

$$\Omega = 2\pi \left[1 - \cos \arcsin \frac{1}{2} \left(\frac{1}{f'} \frac{d_0 d}{d \pm d_0} \right) \right]. \quad (6)$$

Знаки + или – относятся соответственно к случаям предфокального или зафокального пересечения лу-

чей. Смена знака и связанное с этим изменение диаметра светового пятна (рис. 2б) будет означать изменение угла φ .

Световое пятно, формируемое вспомогательной оптической системой (конденсором), должно быть меньше диаметра диафрагмы d_0 , а изменение диаметра светового пятна должно постоянно отслеживаться средством контроля, чтобы отделить информацию об изменении угла φ от координат датчика.

Оптическая схема средства контроля [5] приведена на рис. 3. Световой пучок направляется на частично прозрачную пластинку 3. Половина пучка проходит через нее на объектив 4, а другая половина отражается от пластины 3 в объектив 11. Объектив 4 настраивается на бесконечность, вследствие чего изменение размера светового пятна d_1 в фокальной плоскости б соответствует изменению угла φ . Объектив 11, наоборот, настраивается на конечное расстояние. Предметной плоскостью этого объектива служит световая площадка источника, ограниченная диафрагмой d так, что изображение этой площадки с линейным увеличением V проецируется в плоскость 10 с диаметром $d_2 = Vd$. Плоский угол φ рассчитывается в блоке обработки информации 8 по измеренным d_1 и d_2 согласно соотношению [6]

$$\varphi \approx \frac{1}{f_1} \left(\frac{d_1 d_2}{d_2 \pm d_1} \right). \quad (7)$$

Знак + или – берется в зависимости от того, где происходит пересечение лучей – за фокусом или перед фокусом объектива 4, а два оптических клина, расположенных вблизи от объектива 4, служат для определения знака [2]. В плоскости светового пятна, ограниченного диафрагмой d_2 , располагается сетка в виде двойных штрихов (вид Б, рис. 3), служащая для оценки угла поворота датчика.

Рассмотрим совместную работу оптического датчика и средства контроля при определении координат объекта. Расположим систему координат x, y, z в центре объектива 3 оптического датчика (рис. 4). В общем случае положение датчика в пространстве определяется шестью степенями свободы: поворотами вокруг осей x, y, z (углами α, β, γ соответственно) и перемещениями вдоль осей x, y, z ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$ соответственно). При определении координат в плоскости 9 необходимо принимать во внимание, что при отражении от частично прозрачной пластины 5 система координат x, y, z поворачивается на угол 90° вокруг оси x против часовой стрелки. Будем считать, что перемещения и наклоны датчика осуществляются в малых пределах. При этих условиях, а также при $d_0 < d, d_1 < d_2$ вы-

ражения (5) и (7) заменяются приближенными, что в результате дает

$$\varphi \approx d_0/f' \approx d_1/f_1. \quad (8)$$

Соотношение (8) означает, что при повороте датчика вокруг оси x на угол $\alpha > \varphi$ линейное смещение пятна d за объективом b составит

$$x_1 = \pm(d_1/2 + f_1\alpha). \quad (9)$$

При повороте датчика вокруг оси z на угол β (на рис. 4 не показан) пятно d_1 за объективом b сместится на

$$z_1 = \pm(d_1/2 + f_1\beta). \quad (10)$$

Знак + или – берется в зависимости от направления смещения пятна относительно соответствующей оси. Как отмечалось выше, при измерении координат x_1 и z_1 должен осуществляться постоянный контроль диаметра пятна d_1 .

В случае продольного перемещения датчика вдоль оси x на $\pm \delta x$ смещение изображения пятна в плоскости d_2 составит

$$x_2 = \pm(d_2/2 + \delta xV), \quad (11)$$

где $V = l_2/l$ – линейное увеличение объектива δ , l – расстояние от главной плоскости объектива 3 до главной плоскости объектива 8 , l_2 – расстояние от главной плоскости объектива 8 до плоскости d_2 .

Аналогично при перемещении датчика вдоль оси z на $\pm \delta z$ (на рис. 4 не показано) смещение края изображения пятна в плоскости d_2 составит

$$z_2 = \pm(d_2/2 + \delta zV). \quad (12)$$

Смещение датчика вдоль оси y приведет к смещению диаметра d_2 в соответствии с выражением

$$d_2 = dl_2/l = dV. \quad (13)$$

Диаметр d_2 является изображением световой площадки в плоскости l (рис. 3), и он должен постоянно контролироваться приемником 9 , чтобы учесть в блоке 8 изменение его размера при определении координат x_2, z_2, d_2 .

Кроме того, в процессе работы источника может происходить отклонение формы распределения энергии по сечению пучка от начальной. Информация об этом передается с помощью приемника 9 в блок 8 (см. рис. 3), где она в графическом виде изображается в системе координат x, z . Вращение перекрестия на объективе 3 (рис. 4) датчика вокруг оси y на угол $\pm \delta y$ в плоскости d_2 будет зарегистрировано приемником 9 .

Таким образом, по измеренным значениям x_1 и z_1 определяются координаты наклонов датчика во-

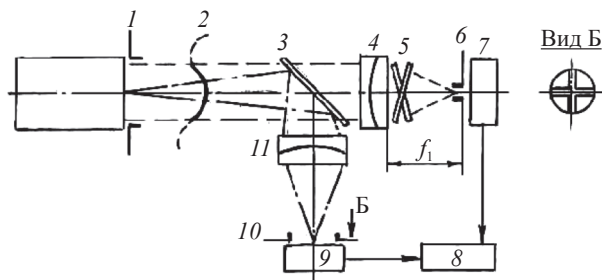


Рис. 3. Оптическая схема средства контроля. 1 – диафрагма d , 2 – волновой фронт, 3 – частично прозрачная пластина, 4, 11 – объективы; 5 – оптические клинья, 6 – световое пятно диаметром d_1 , 7, 9 – приемники; 8 – блок обработки информации, 10 – световое пятно диаметром d_2 , f_1 – фокусное расстояние объектива 4.

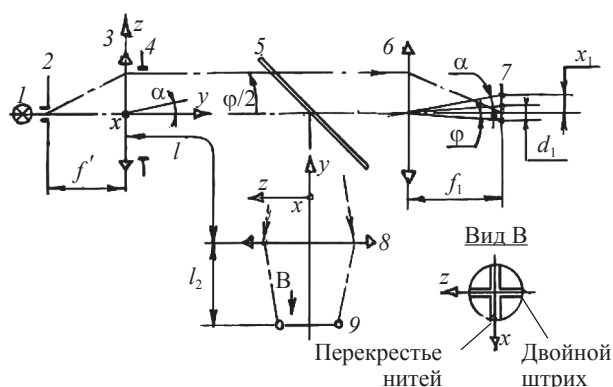


Рис. 4. Схема определения координат объекта. 1 – лампа накаливания, 2 – диафрагма d_0 , 3 – объектив, 4 – диафрагма d , 5 – частично прозрачная пластина, 6 – объектив, 7 – световое пятно d_1 , 8 – объектив, 9 – световое пятно d_2 , φ – плоский угол, α – угол поворота датчика вокруг оси x , f' – фокусное расстояние объектива 3 , f_1 – фокусное расстояние объектива 6 , x_1 – координата наклона датчика вокруг оси x , l_2 – расстояние от главной плоскости объектива 8 до плоскости d_2 , l – расстояние от плоскости диафрагмы d до главной плоскости объектива 8 , x, y, z – система координат.

круг соответствующих осей x и z . Координата наклона на угол δy вокруг оси y определяется путем прямых измерений в плоскости d_2 взаимного поворота перекрестия датчика и двойных штрихов средства контроля. Координаты перемещений датчика вдоль осей x и z определяются значениями x_2 и z_2 , а вдоль оси y – диаметром d_2 . В предельном случае, когда углы наклонов α и β отсутствуют, координаты x_1 и z_1 в соответствии с формулами (9) и (10) определяются размером светового пятна d_1 , а при отсутствии разворота на угол δy – путем прямого его измерения. Отсутствие продольных смещений вдоль осей x, y, z в соответствии с формулами (11)–(13) будет

означать, что линейная координата определяется размером светового пятна d_2 . В итоге такое взаимное положение датчика и средства контроля (которое условно можно назвать стационарным), будет отвечать критерию (критерий С.Г. Славнова), выраженному формулой (1).

С целью упрощения средство контроля может быть выполнено по оптической схеме [7], в которой вместо двух объективов используется один, расположенный на двойном фокусном расстоянии от световой площадки источника.

В эксперименте был испытан оптический датчик, воспроизводящий параметры d и R светового плоского и телесного углов. Средство контроля, работающее в малом диапазоне углов и перемещений, подтвердило возможность оценки углов и перемещений по соответствующим размерам пятен. Результаты эксперимента приведены в работе [2]. Оценка перемещений и наклонов осуществлялась визуальным способом. Для обеспечения высокой чувствительности оценки углов разворота $\delta\gamma$ сетка в плоскости d_2 выполнялась в виде двойных штрихов. Это позволило вести наблюдение вращения объектива 3 относительно двойных штрихов с наибольшей остротой зрения (нониальной), достигающей 3", что согласуется с данными [8]. Минимальный размер пятен, определяющий линейное перемещение с расстояния наилучшего видения 250 мм при разрешающей способности глаза 1' [8], составил 0,075 мм. В случае необходимости формирования и измерения предельно малых значений координат (например, по углу – сотые доли угловых секунд) датчик и средство контроля могут быть построены по интерференционной схеме [2].

В заключение необходимо отметить, что предложенный способ позволяет задать положение объекта в пространстве с помощью трех линейных и трех угловых координат, а средство контроля – обеспечивает непрерывный контроль этих пара-

метров с учетом погрешности работы источника измерения.

В общем случае работа источника не зависит от работы оптического датчика и, если не приняты специальные меры по стабилизации его работы, погрешность источника может превосходить погрешность определения координат. В частном случае, когда работа источника стабилизирована, средство контроля упрощается благодаря отсутствию необходимости контроля размеров световых пятен, пропорциональных параметрам d и R . В этом случае простая методика определения координат объекта будет способствовать практической реализации предложенного способа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селезнев В.П., Курст М.Л. Системы навигации космических летательных аппаратов. М.: Воениздат, 1965. 208 с.
2. Славнов С.Г. Способ формирования и измерения светового плоского и телесного угла // Измерит. техн. 2006. № 11. С. 25–27.
3. Славнов С.Г. Многолучевой источник с ограниченной световой площадкой и его применение в угловых измерениях // Метрология. 2007. № 5. С. 18–23.
4. Бегунов Б.Н. Геометрическая оптика. М.: Изд. МГУ. 1966. 209 с.
5. Славнов С.Г. Способ измерения угла расходимости светового пучка // А. с. № 1592721. Бюл. изобр. 1990. № 34. С. 194.
6. Славнов С.Г. Способ измерения угла расходимости пучка лучей // Патент России № 2086945. 1997.
7. Славнов С.Г. Измерение светового плоского и телесного угла с помощью упрощенной оптической системы // ПТЭ. 2007. № 4. С. 129–130.
8. Кругер М.Я., Панов В.А., Кулагин В.В., Погорев Г.В., Кругер Я.М., Левинзон А.М. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Л.: Машиностроение, 1968. 760 с.