

О РОЛИ ПОЛОЖЕНИЯ ЗРАЧКОВ В НЕРАССТРАИВАЕМЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ УГЛОМЕРОВ С КАНАЛОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ЭТАЛОНА

© 2012 г. М. П. Колосов, доктор техн. наук; А. Я. Гебгарт, канд. техн. наук; А. Ю. Карелин

ОАО “НПП “ГЕОФИЗИКА-КОСМОС”, Москва

E-mail: mikomiko43@mail.ru

Проведен анализ влияния положения зрачков на работу нерасстраиваемых оптических угломеров, снабженных каналом геометрического эталона. Эти приборы широко используются в качестве датчиков систем ориентации космических аппаратов. На основе указанного анализа показано наиболее рациональное решение исключения влияния несовпадения зрачков каналов на работу высокоточных угломеров с каналом геометрического эталона.

Ключевые слова: оптическая система, угломер, канал геометрического эталона, входной зрачок, точностной стенд, калибровка.

Коды OCIS: 120.4570, 220.4830

Поступила в редакцию 01.11.2010

Для уменьшения влияния изменения геометрической схемы высокоточных угломерных приборов на их точность используют нерасстраиваемые каналы геометрического эталона (КГЭ) [1, 2]. Такие КГЭ широко применяются в статических звездных приборах – датчиках систем ориентации космических аппаратов (КА) [3]. Для этих приборов характерно то, что в общем случае в их оптических системах зрачки КГЭ не совпадают со зрачками объекта основного (звездного) канала.

Поэтому сначала рассмотрим влияние указанного несовпадения зрачков оптической системы (ОС) звездного прибора на построение КГЭ, формирующего не менее двух точечных изображений. Затем проиллюстрируем, каким образом использование КГЭ позволяет наиболее рационально учитывать условия космического пространства на процесс угловых измерений прибора и как исключать влияние несовпадения зрачков каналов прибора на его работу.

Для наглядности рассмотрим указанную задачу с некоторыми упрощениями. Ограничимся ее рассмотрением только в плоскости объектива звездного канала, которая проходит через его оптическую ось. Будем считать, что координаты главных лучей в плоскости матрицы пикселей матричного приемника излуче-

ния (МПИ) являются координатами точечных изображений, измеряемых прибором в этой плоскости, хотя известно, что координатами этих изображений являются координаты центров их функций распределения точки (например, центров тяжести – центроидов изображений) [3]. Прибор работает при температуре t и атмосферном давлении p , отличными от нормальной температуры и давления, при которых проводилась его паспортизация на точностном стенде. Современные приборы ориентации КА не герметичны и для них можно принять, что при работе в космическом пространстве $p = 0$ атм.

На рис. 1 приведена ОС звездного прибора с КГЭ [1–3]. Объектив звездного канала 3 имеет апертурную диафрагму 8 и соответственно входной и выходной зрачки 9, 10. В фокальной плоскости объектива установлена матрица пикселей 2-МПИ-1. КГЭ состоит из осветителя 7, коллиматора 5, в фокальной плоскости которого размещена диафрагма 6, например, с тремя точечными отверстиями 14, 15, 16. Их изображения на матрице 2 будут соответственно 17, 18, 19. Будем считать, что центральное точечное изображение 18 совпадает с оптической осью объектива звездного канала и оно вместе с объективом формирует визирную линию прибора.

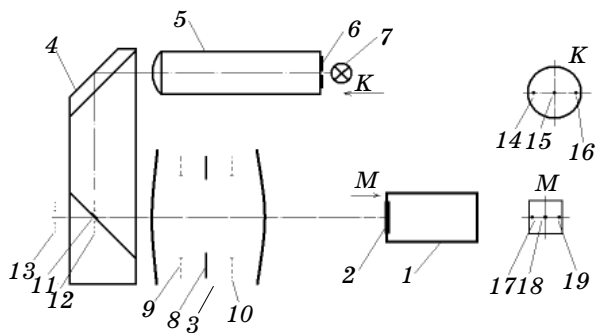


Рис. 1. Оптическая система звездного прибора с каналом геометрического эталона. 1 – матричный приемник излучения, 2 – матрица пикселей, 3 – объектив, 4 – зеркально-призменная система, 5 – коллиматор, 6 – сетка с тремя точечными отверстиями, 7 – осветитель, 8 – апертурная диафрагма объектива, 9, 10 – входной и выходной зрачки объектива, 11 – зеркальная зона (апертурная диафрагма КГЭ), 12, 13 – входной и выходной зрачки КГЭ, 14, 15, 16 – точечные отверстия в сетке коллиматора, 17, 18, 19 – изображения точечных отверстий.

Коллиматор жестко связан с посадочным местом прибора и по существу определяет его приборную систему координат (ПСК), относительно которой определяются угловые координаты звезд [3]. На рис. 1 коллиматор 5 и объектив 3 показаны упрощенно. Будем считать, что конструкция коллиматора выполнена, например, в виде нерасстраиваемого зеркального моноблока [1, 3].

Перед объективом и коллиматором расположена нерасстраиваемая зеркально-призменная система (ЗПС) [1–3], моноблок призм 4 которой представляет собой призму БкР – 180° (угловоый световозвращатель) и прямоугольную призму, которая дополняет ЗПС до плоскопараллельной пластины вдоль оптической оси объектива 3. Внутри плоскости склейки этих призм симметрично относительно оптической оси напылено небольшое плоское зеркало 11 эллиптической формы. Это зеркало является апертурной диафрагмой КГЭ и формирует дополнительный входной 12 и выходной 13 зрачок. Таким образом, можно считать, что в объективе 3 имеются две пары разнесенных вдоль его оптической оси зрачков: для лучей от звезды зрачки 9, 10, для лучей КГЭ зрачки 12, 13.

Следует подчеркнуть, что такой нерасстраиваемый КГЭ обеспечивает неизменность отно-

сительно ПСК углового положения выходящих из него трех параллельных пучков лучей, как при изменении температуры, так и при изменении давления. При этом визирная линия прибора в пространстве предметов его ОС проходит через центральное точечное изображение 18 и главные точки объектива 3, формируя одну из осей ПСК. Предположим, что объектив 3 ортоскопический и в нем исправлены aberrации в зрачках, то есть к нему применима оптика нулевых лучей.

На рис. 2 показано прохождение главных лучей через зрачки 12, 13 и 9, 10. Угол в пространстве изображений объектива 3 между главным лучом КГЭ и его оптической осью – W'_3 . Угол в пространстве изображений объектива между главным лучом звездного канала и указанной оптической осью – W' . Для этих углов справедливы соотношения

$$\operatorname{tg}W'_3 = \operatorname{tg}W_3/B_{3p3}; \operatorname{tg}W' = \operatorname{tg}W/B_{3p3},$$

где W_3, W – соответственно угол в пространстве предметов объектива 3 между главным лучом КГЭ и оптической осью объектива, главным лучом звездного канала и оптической осью объектива; B_{3p3}, B_{3p} – соответственно увеличение в зрачках 12, 13 и 9, 10.

Примем допущение, что при изменении температуры t и атмосферного давления p $\operatorname{tg}W'_0 \approx \operatorname{tg}W'_{tp}$, $\operatorname{tg}W'_{30} \approx \operatorname{tg}W'_{3tp}$, где индекс “0” относится к нормальным условиям, а “ tp ” характеризует значения при изменении температуры и атмосферного давления. Тогда искомая угловая координата звезды W_{tp} определяется выражением

$$W_{tp} = \arctg(B_{3p tp} \operatorname{tg}W'_{tp}) = \arctg [B_{3p 0} y'_{tp} / (s'_0 + \Delta s')], \quad (1)$$

где s'_0 – расстояние от выходного зрачка 10 до матрицы 2 при нормальных условиях;

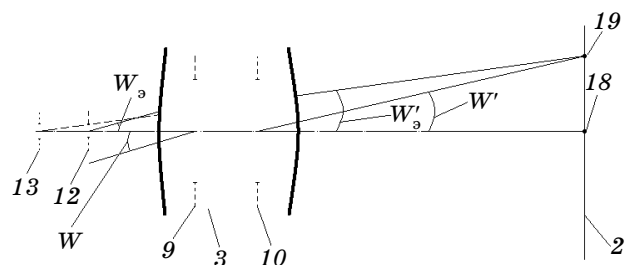


Рис. 2. Ход главных лучей в объективе. Приведенные позиции раскрыты на рис. 1.

$\Delta s'$ – линейное расстояние (смещение) вдоль оптической оси объектива между матрицей 2 и его фокальной плоскостью (плоскостью наилучшей установки), появляющееся при изменении температуры t и атмосферного давления p . При изменении давления матрица остается на месте, а смещается только фокальная плоскость. Изменение температуры вызывает смещение и матрицы, и фокальной плоскости;

y'_{tp} – измеряемое звездным прибором линейное расстояние на матрице от центрального точечного изображения КГЭ до изображения звезды при температуре t и давлении p .

При изготовлении угломерного звездного прибора обязательной операцией бывает паспортизация (калибровка) параметров прибора на точностном стенде, включающем имитатор звезды. В процессе калибровки устанавливается соответствие между задаваемыми на стенде угловыми координатами W^* имитатора звезды и линейными координатами y'^* изображения этого имитатора на МПИ прибора. Определяются также линейные координаты y'_s^* изображений от КГЭ на МПИ (здесь и далее индекс “*” относится к параметрам калибровки прибора на стенде). Проведя простые преобразования выражения (1), получим вид W_{tp} , удобный для проведения анализа

$$W_{tp} = \arctg \{y'_{tp}[y'_0^*/\text{tg}W_0^* + B_{зр\ э0}(y'_{эtp} - y'_{э0}^*)/B_{зр\ 0}\text{tg}W_{э0}^*]^{-1}\}, \quad (2)$$

где y'_{tp} – измеряемое звездным прибором линейное расстояние на матрице от центрального точечного изображения КГЭ до изображения звезды при температуре t и давлении p ;

$y'_{эtp}$ – измеряемое звездным прибором линейное расстояние на матрице от центрального до крайнего точечного изображения КГЭ при температуре t и давлении p ;

W_0^* – известный угол между визирной линией прибора и направлением параллельного пучка лучей имитатора звезды, установленного при калибровке прибора на точностном стенде при нормальной температуре и давлении (паспортный параметр);

y'_0^* – измеренное звездным прибором линейное расстояние на матрице от центрального точечного изображения КГЭ до изображения, полученного от имитатора звезды, установленного на стенде под углом W_0^* при нормальной температуре и давлении (паспортный параметр);

$W_{э0}^*$ – известный угол между визирной линией прибора и направлением параллельного

пучка лучей, поступающего в объектив звездного канала от крайней точки КГЭ при нормальной температуре и давлении (паспортный параметр);

$y'_{э0}^*$ – измеренное звездным прибором линейное расстояние на матрице от центрального точечного изображения КГЭ до его крайнего изображения при нормальной температуре и давлении (паспортный параметр), расположенного под углом $W_{э0}^*$;

$B_{зр\ 0}$ – увеличение в зрачках объектива звездного канала при нормальной температуре и давлении;

$B_{зр\ э0}$ – увеличение в зрачках КГЭ внутри объектива звездного канала при нормальной температуре и давлении.

Из формулы (2) следует, что в рассматриваемом одномерном случае определение величины W_{tp} по существу сводится к линейным измерениям величин y'_{tp} и $y'_{эtp}$ на матрице пикселей матричного приемника излучения и соответствующим вычислениям с использованием паспортных параметров, полученных при калибровке.

В частном случае при совмещении зрачков в объективе (в звездном канале) $B_{зр\ 0} = B_{зр\ э0}$, выражение (2) упрощается и принимает вид

$$W_{tp} = \arctg \{y'_{tp}[y'_0^*/\text{tg}W_0^* + (y'_{эtp} - y'_{э0}^*)/\text{tg}W_{э0}^*]^{-1}\}. \quad (3)$$

Проиллюстрируем численными примерами расчет погрешности измерения угломерным прибором с КГЭ, в ОС которого имеет место рассматриваемое несовпадение зрачков. Его паспортизация проводится в заводских условиях при нормальной температуре и давлении ($t = 20$ °С, $p = 1$ атм.), а работа при $t = 70$ °С ($\Delta t = 50$ °С), $p = 0$ атм. Для простоты и наглядности в качестве ОС прибора возьмем плоско-выпуклую линзу с параметрами, приведенными в табл. 1. Материал линзы – стекло ТФ5, материал оправы и корпуса – алюминиевый сплав.

Приведенное в табл. 1 расстояние между зрачками каналов равно фокусному расстоянию ОС. По нашему мнению, такое значение расстояния между зрачками в достаточно большом угловом поле звездного прибора (30°) можно считать максимальным и на практике оно, как правило, существенно меньше.

Оптические параметры ОС, входящие в выражение (2), вычислены по известной программе расчета ОС ОРТИС при $W_0^* = W_{э0}^* = 15,0^\circ$ для

Таблица 1. Конструктивные параметры оптической системы

№	Конструктивные параметры ОС	Значение параметров	
		$t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}, p = 1\text{ атм.}$	$t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}, p = 0\text{ атм.}$
1	Положение зрачка звездного канала	На первой поверхности	На первой поверхности
2	Положение зрачка звездного КГЭ	На последней поверхности	На последней поверхности
3	Фокусное расстояние, мм	50,0	49,959624
4	Угловое поле, угл. град.	30,0	30,0
5	Радиус первой поверхности, мм	∞	∞
6	Радиус последней поверхности, мм	-37,7617	-37,77737
7	Толщина по оптической оси, мм	50,0	50,02075
8	Показатель преломления	1,755234	1,756158
9	Расстояние от последней поверхности до плоскости матрицы, мм	50,0	50,060

Таблица 2. Оптические параметры ОС

№	Оптические параметры ОС	y'_{tp} , мм	$y'_{эtp}$, мм	y_0^* , мм	$y_{э0}^*$, мм	$B_{эp0}$, крат	$B_{эpэ0}$, крат
1	Для нулевых лучей	13,3982	13,4132	13,3975	13,3975	2,32409	1,0
2	Для главных лучей	13,042836	13,413537	13,042269	13,39760	2,38620	1,0

нулевых и главных лучей. Результаты вычислений приведены в табл. 2.

По формуле (2) получаем для нулевых лучей $W_{tp} = 14^{\circ}59'36,7''$, а для главных лучей $W_{tp} = 14^{\circ}59'35,6''$ при фактическом угловом положении визируемой звезды $15^{\circ}00'00,0''$. Отсюда следует, что в суммарную погрешность измерения угломерного прибора в первом случае войдет погрешность $\Delta W_{tp} = 23,3''$, а во втором $\Delta W_{tp} = 24,4''$. Очевидно, что для современных высокоточных звездных приборов, погрешность измерений которых составляет единицы угловых секунд, полученный результат не приемлем. Если теперь в ОС совместить зрачки, например, перенести зрачок КГЭ с последней на первую оптическую поверхность, то, проведя соответствующие вычисления и используя выражение (3), получим $\Delta W_{tp} = 0,0''$.

Таким образом, при проектировании ОС звездных приборов с КГЭ, которые формируют в плоскости анализа не менее двух точечных изображений, следует совмещать зрачки КГЭ со зрачками объектива звездного канала.

Однако практика проектирования этих приборов показывает, что в силу реализации различных приоритетов, это удается крайне редко. Поэтому для высокоточных звездных приборов с рассматриваемыми КГЭ стоит задача поиска наиболее рационального решения по исключению влияния несовпадения зрачков указанных каналов на работу этих угломеров.

Все космические аппараты, их функциональные узлы и оптические приборы, устанавливаемые на этих аппаратах, испытываются в термовакуумных камерах. Угломерные звездные приборы соответственно также испытываются в таких камерах. При этих испытаниях точностной стенд (или его часть) для проверки указанных приборов тоже установлен внутри термовакуумной камеры.

Для обеспечения проведения калибровки космического угломерного прибора без КГЭ в термовакуумной камере он должен быть снабжен датчиком температуры, который устанавливается внутри корпуса прибора в некоторой его точке. При проведении этой калибровки

в вакууме для каждой установленной температуры определяется разность между измеренным и образцовым значением показаний и значение температуры, измеренной указанным датчиком. Результаты этих измерений запоминаются, заносятся в память прибора и затем по ним корректируются полетные результаты. Температурные поля конструкции прибора, размещенного на КА, могут несколько отличаться от температурных полей прибора, установленного на точностном стенде в термовакуумной камере. А это приведет соответственно к ухудшению точности угломерного прибора. Можно предположить, что это обстоятельство стимулировало практическое использование в полете КА калибровки звездных приборов по звездам [4].

Наличие в звездном приборе КГЭ, формирующего на матрице МПИ не менее двух точечных изображений, кардинально меняет ситуацию. Для пояснения этого утверждения сначала рассмотрим величину линейного расстояния $y'_{\text{эт}, p=0}$ на матрице МПИ, измеренное звездным прибором в термовакуумной камере или в полете КА (при $t, p = 0$ атм.), между центральным и крайним точечным изображением, формируемыми КГЭ (например, между точками 18, 19, рис. 1). Для ОС, в которой имеется $m1$ радиусов кривизны оптических поверхностей r , $m2$ толщин линз d , $m3$ воздушных промежутков l между линзами, $m4$ показателей преломления линз n и расстояние s' между последней оптической поверхностью и МПИ при температуре t , величину $y'_{\text{эт}, p=0}$ можно представить в виде функции

$$y'_{\text{эт}, p=0} = f[W, r_1(t) \dots r_{m1}(t), d_1(t) \dots d_{m2}(t), l_1(t) \dots l_{m3}(t), n_1(t) \dots n_{m4}(t), s'(t)], \quad (4)$$

где W – угол в пространстве предметов объектива звездного канала, образованный двумя лучами, проходящий между центроидами центрального (18) и крайнего (19) изображения, формируемыми КГЭ на матрице МПИ. Следует подчеркнуть, что при использовании в КГЭ нерасстраиваемого зеркального коллиматора [1, 3] величина W не зависит ни от t , ни от p .

Из выражения (4) следует, что величина $y'_{\text{эт}, p=0}$ есть одночисловой критерий термического состояния оптико-механической конструкции прибора в вакууме (термо-вакуумного состояния). Другими словами, значение

величины $y'_{\text{эт}, p=0}$ не учитывает температуру в одной точке конструкции прибора, а учитывает комплексное состояние всей оптико-механической части объектива звездного канала. Поэтому для калибровки в термовакуумной камере высокоточных звездных приборов с КГЭ наиболее рациональна следующая процедура, которая отличается от традиционной (без КГЭ).

Конкретный образец звездного прибора с КГЭ размещают на точностном стенде в термовакуумной камере при $p = 0$ атм. Этим прибором проводится ряд измерений $y'_{tn, p=0}$ для разных угловых положений W_n имитатора звезды и $y'_{\text{эт}, p=0}$ для ряда рабочих температур t ($t1, t2, t3, \dots, tn$) для $t1 \leq t \leq tn$. На основе этих измерений создается ряд функциональных зависимостей $W_{t, p=0}(y'_{nt, p=0})$ и ряд чисел $y'_{\text{эт}, p=0}$ для соответствующих температур $t1, t2, t3, \dots, tn$:

$$[W_{t1, p=0}(y'_{t1, p=0}), (y'_{\text{эт}1, p=0})],$$

$$[W_{t2, p=0}(y'_{t2, p=0}), (y'_{\text{эт}2, p=0})],$$

$$[W_{t3, p=0}(y'_{t3, p=0}), (y'_{\text{эт}3, p=0})],$$

... ..

$$[W_{tn, p=0}(y'_{tn, p=0}), (y'_{\text{эт}n, p=0})].$$

Полученные функции $W_{tn, p=0}(y'_{tn, p=0})$ и числа $y'_{\text{эт}n, p=0}$ заносятся в память процессора прибора. В общем виде процедура определения угловой координаты звезды ($W_{t, p=0}$) в полете КА осуществляется следующим образом:

- производятся измерения положения видимой звезды $y'_{t, p=0}$ и крайнего точечного изображения КГЭ $y'_{\text{эт}, p=0}$ относительно центрального точечного изображения КГЭ на матрице МПИ (относительно изображения 18, рис. 1, 2);

- по измеренному значению $y'_{\text{эт}, p=0}$ происходит выбор функции $W_{t, p=0}(y'_{t, p=0})$;

- на основе выбранной функции и измеренного значения $y'_{t, p=0}$ осуществляется определение искомого значения угла $W_{t, p=0}$.

Из вышеприведенного следует, что описанная калибровка звездного прибора с нерасстраиваемым КГЭ в термовакуумной камере и его работа в полете КА принципиально не отличается от известной калибровки звездных приборов в полете КА [4]. Действительно, нерасстраиваемый КГЭ следует рассматривать как имитатор участка звездного неба, который на матрице МПИ в рассматриваемом случае создает три точечных изображения “звезд”, угло-

вое расстояние между которыми в пространстве предметов объектива звездного канала известно и неизменно.

Звездные приборы с КГЭ имеют по сравнению с приборами без КГЭ еще одно преимущество. Как отмечалось выше, КГЭ жестко связан с посадочным местом прибора и формирует его ПСК, относительно которой производятся угловые измерения. Поэтому в звездных приборах с КГЭ исключаются нарушения их

геометрической схемы, вызванные другими, например механическими воздействиями, которые имеют место при выводе на орбиту и эксплуатации КА [3].

В заключение отметим, что при описанной выше процедуре определения $W_{t, p=0}$ использовать датчик температуры в приборе в принципе не требуется и при этом снимается проблема несовпадения зрачков КГЭ относительно зрачков звездного канала.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Колосов М.П. Оптика адаптивных угломеров. М.: ООО "СКАН-1", 1997. 212 с.
2. Колосов М.П., Лысюк Ю.В. Анализ нерасстраиваемых оптических систем угломеров с неподвижной линией визирования // Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 8. С. 61–65.
3. Федосеев В.И., Колосов М.П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов. М.: Логос, 2007. 248 с.
4. Федосеев В.И., Карелин А.Ю., Короткова Е.Л. Калибровка угломерных оптических приборов космических аппаратов по звездам // Оптический журнал. 1995. Т. 62. № 9. С. 26–31.