

## ВВЕДЕНИЕ В ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ АДАПТИВНЫХ УГЛОМЕРОВ

© 2010 г. М. П. Колосов, доктор техн. наук

ОАО “НПП “ГЕОФИЗИКА–КОСМОС”, Москва

E-mail: mikomiko43@mail.ru

Приведены основные положения, используемые при проектировании оптических систем адаптивных угломеров и сформирован единый подход к доказательству их адаптивности, который иллюстрируется двумя простыми примерами.

*Ключевые слова:* угловые измерения, адаптивные угломеры, космическая навигация.

Коды OGIS: 120.4570, 220.4830

*Поступила в редакцию 02.03.2010*

В последние годы опубликовано много работ, посвященных созданию оптических угломеров, которые обладают одним замечательным свойством. Теоретически при изменении геометрической схемы таких угломеров их точность измерений не ухудшается, т. е. эти приборы обладают свойством определенной адаптации к нарушению их геометрии. Небольшая часть этих работ приведена в списке литературы к данной статье [1–11].

Целью настоящей работы является представление основных положений по проектированию оптических систем адаптивных угломеров и формирование единого подхода к обоснованию (доказательству) адаптивности этих угломеров.

Приведенные публикации базируются на теоретических исследованиях и практическом опыте создания реальных приборов, которые по назначению можно разделить на три основные группы.

1. Звездные приборы ориентации и навигации, устанавливаемые на космических аппаратах (КА) [1–4]. Эти приборы являются малогабаритными высокоточными угломерами. Основными источниками нарушения геометрической схемы таких приборов являются механические, термические (тепловые) и временные (старение) процессы. Эти приборы изготавливаются на Земле в условиях постоянного воздействия силы тяжести, а работают в невесомости и в вакууме. Они испытывают значительные механические воздействия, особенно при выводе на орбиту КА. Температурное влияние на них Солнца

весьма значительно и может быть переменным в зависимости от того, где расположен КА (на освещенной или неосвещенной стороне Земли). Необходимая термостабилизация этих приборов на КА не всегда возможна. В данном контексте фактор старения – это изменение геометрии конструкции во времени. Современные приборы на КА должны надежно работать на орбите и сохранять точность измерений более 15–20 лет.

2. Крупногабаритные угломерные приборы с подвижной линией визирования наземного базирования, например, телескопы на многоосных монтировках [5–8]. Для этой группы приборов условия эксплуатации не такие жесткие, как для первой. Однако в процессе эксплуатации второй группы приборов из-за больших масс частей их конструкции и наличия силовых передач возникают случайные неустраняемые деформации конструкции и биения осей. Эти факторы предопределяют случайные и неслучайные изменения геометрической схемы подобных приборов во времени.

3. Приборы и точностные стенды на основе нерасстраиваемых сканирующих систем широкого применения [9–11].

Известны традиционные методы проектирования, направленные на обеспечение и повышение точности оптических угломеров, которые построены на измерении, учете (калибровке), компенсации и устранении тех или иных отдельных нарушений геометрии этих приборов. Идеология проектирования адаптивных угломеров решает эту задачу в целом по-другому,

но при этом указанные выше методы широко используются при создании адаптивных угломеров.

При проектировании адаптивных угломеров в них вводится один или несколько дополнительных (адаптационных) каналов, оптически связанных между собой, с помощью которых обеспечивается исключение влияния нарушения геометрии на их точность. Эти каналы строятся на основе ряда оптических модулей (блоков): либо на основе нерасстраиваемых систем (нерасстраиваемые модули), либо на основе самокалибрующихся автоколлимационных систем (измерительные модули). Посредством этих каналов удается реализовать разделение функций внутри угломера. Механические детали, в том числе и корпусные, осевые системы и приводы начинают выполнять функцию физических (силовых) носителей геометрии прибора, которая изменяется под влиянием тех или иных воздействий, а указанные каналы обеспечивают функцию ненагруженных материальных носителей систем координат, угловых мер и обеспечения исключения из результатов измерений деформаций геометрической схемы прибора. Из этого вытекает фундаментальное условие существования оптических адаптивных угломеров, а именно: геометрическая схема такого угломерного прибора нестабильна за период эксплуатации, стабильна на момент проведения измерения, и при этом оптические меры и оптические элементы модулей дополнительных каналов сохраняют свое геометрическое подобие. Указание на сохранение геометрического подобия принципиально, так как все приборы эксплуатируются в некотором диапазоне температур и поэтому все их элементы изменяют свои геометрические размеры. Адаптивные угломеры проектируются так, чтобы обеспечить сохранение геометрического подобия оптических элементов и оптических мер, что в свою очередь обеспечивает сохранение функций дополнительных каналов. Что касается требований к стабильности геометрии остальных частей такого угломера, то они могут быть существенно снижены по сравнению с требованиями к традиционным угломерам. Выгода от такого снижения требований к угломеру может быть реализована за счет существенного уменьшения веса его механической части, снижения ее себестоимости, расширения допусков и т. д. Оптические системы адаптивных угломеров выполнены из относительно простых и, как правило, традиционных оптических элементов. Методы проектирования до-

полнительных каналов и их элементная база достаточно подробно изложены в [1–11].

Свойство адаптации этих угломеров обосновывается на основе их математических моделей. Геометрия угломерных приборов описывается в виде цепи последовательно связанных между собой прямоугольных систем координат (СК). В общем случае в этой цепи особо выделяются три СК:

1) базовая СК реализуется конструкцией посадочного места прибора, именно в этой системе координат выдаются результаты угловых измерений прибора;

2) отсчетная СК формирует первичный отсчет измерительной схемы прибора; это может быть, например, СК с ортогональной структурой сетки пикселей матричного приемника излучения;

3) опорная СК – специально введенная СК, связанная с одним из модулей дополнительного канала, относительно которой производится измерение угловых координат; эта опорная СК должна быть жестко связана с базовой СК.

Следует отметить, что если относительно базовой СК удастся непосредственно производить измерение угловых координат цели, то опорная СК не нужна.

Общая цепь (последовательность) связанных между собой СК (математическое описание геометрии прибора) представляется в виде ряда связанных между собой звеньев с последовательно определенными друг относительно друга парами СК  $(X_1Y_1Z_1, X_2Y_2Z_2)_1, (X_2Y_2Z_2, X_3Y_3Z_3)_2, (X_3Y_3Z_3, X_4Y_4Z_4)_3, \dots (X_iY_iZ_i, X_{i+1}Y_{i+1}Z_{i+1})_i, \dots (X_{n-1}Y_{n-1}Z_{n-1}, X_nY_nZ_n)_n$ , где  $i = 1, 2, \dots, n - 1$  – число возможных звеньев. Очевидно, что если имеется ряд СК, для которых последовательное угловое положение одной СК определено относительно другой, то всегда можно математически определить угловое положение последней СК (например, базовой) относительно первой СК (например, отсчетной), и наоборот – определить угловое положение первой СК относительно последней. Очевидно также, что если, например, известно угловое положение вектора, направленного на бесконечно удаленную точечную цель, или вектора визирной линии прибора в отсчетной СК угломера, то, последовательно переходя по цепи от одной СК к другой, можно определить угловое положение этих векторов в базовой СК и при необходимости вычислить азимутальный и высотный угол цели в этой СК.

В адаптивных угломерах перенос информации от одной СК к другой реализуется в параллельных пучках лучей. Поэтому в математиче-

ских моделях этих угломеров при описании нарушений их геометрии, как правило, отсутствуют линейные координаты, хотя физически они могут быть.

В общую цепь связанных между собой СК вводятся нарушения геометрии прибора в виде угловых величин, которые соответственно учитываются при выводе вектора цели в базовой СК. При этом может быть два случая или их сочетание. 1. Если дополнительные каналы построены на основе нерасстраиваемых систем, то указанные величины нарушений геометрии в процессе вывода вектора визирной линии прибора в базовой или опорной СК просто не входят в окончательное искомое выражение указанного вектора. Это означает, что используемые в математической модели угловые нарушения геометрии прибора не влияют на его точность. 2. Если дополнительные каналы построены на основе самокалибрующихся автоколлимационных систем, то указанные величины нарушений геометрии в процессе вывода вектора визирной линии прибора в базовой или опорной СК войдут в это выражение в виде результатов внутриприборных автоколлимационных измерений, т. е. указанные нарушения геометрии измерены и учтены в результатах измерений искомого вектора. Таким образом, и в этом случае используемые в математической модели угловые нарушения геометрии прибора не влияют на его точность.

Кратко обоснование свойства адаптации рассматриваемых угломеров можно представить в виде последовательности следующих этапов: 1) описывается оптическая система анализируемого угломера и поясняется ее назначение; 2) выбираются из оптической системы угломера оптические элементы, им придаются СК и описывается расположение этих СК относительно выбранных оптических элементов; как правило, указанные оптические элементы входят в дополнительные каналы; 3) создается модель нарушения геометрической схемы угломера посредством описания взаимного положения указанных СК и производится формирование цепи звеньев СК; 4) вводятся в СК векторы, необходимые для математической формализации работы угломера; 5) производится преобразование выражений указанных векторов с целью исключения из них величин нарушений геометрии, если это удастся, то угломер адаптивный.

Вышеизложенное поясним двумя примерами. При их рассмотрении следует отметить следующее. Геометрия оптических элементов номи-

нальная, в ней не присутствуют технологические погрешности их изготовления. При номинальной геометрии угломера все СК в данных примерах взаимно ортогональны. Все величины со знаком  $\Delta$  будем рассматривать как величины первого порядка малости. Для них справедливы соотношения:  $\Delta \dots = \sin(\Delta \dots)$ ,  $(\Delta \dots)^2 = 0$ ,  $\cos(\Delta \dots) = 1$ .

*Первый пример* представляет собой простейший адаптивный угломер, оптическая система которого представлена на рис. 1.

**Оптическая система.** Она состоит из объектива 3, представляющего сложную многолинзовую конструкцию, в фокальной плоскости которого расположена матрица пикселей 2 прибора с зарядовой связью (ПЗС) 1, и дополнительного канала в виде двух нерасстраиваемых модулей. Перед объективом расположено устройство коллинеарного переноса лучей (УКП), выполненного в виде зеркально-призменной системы (ЗПС) – моноблока призм 4, 7 (первый модуль). Призма 7 представляет собой БкР –  $180^\circ$  (угловой световозвращатель), а призма 4 дополняет ЗПС до плоскопараллельной пластины. Перед входной гранью призмы 7 установлен моноблок-коллиматор 9 (второй модуль). Изображение его точечной диафрагмы 10 фокусируется на матрице 2. Изображение точечной цели, например, звезды, также фокусируется на матрице 2. Оптические элементы 4, 7, 9, 11 формируют дополнительный канал.

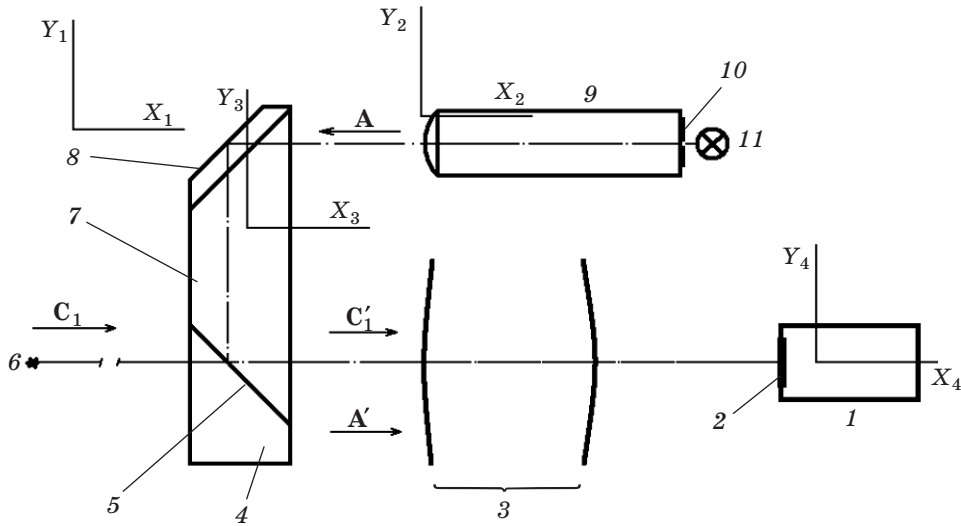
Угломер предназначен для определения угловых координат цели относительно его посадочного места.

**Системы координат.** Для описания нарушения геометрии угломера относительно его посадочного места введем следующие СК: СК  $X_1Y_1Z_1$  – СК его посадочного места (базовая СК); СК  $X_2Y_2Z_2$  – СК коллиматора 9 (опорная СК); СК  $X_3Y_3Z_3$  – СК УКП 4, 7; СК  $X_4Y_4Z_4$  – отсчетная СК (СК оптико-электронного блока “объектив 3 + ПЗС 1”).

Геометрическая связь СК с оптическими элементами представлена на рис. 1.

**Нарушение геометрии.** Номинальная геометрия угломера и ее нарушение поясняется в табл. 1 и 2, которые представляют собой математическое описание звеньев цепи связанных между собой СК.

На первый взгляд строка таблиц, описывающая номинальную геометрию данного статического угломера, излишняя. Однако при описании геометрии угломеров с подвижной линией визирования эта строка становится необходимой.



**Рис. 1.** Оптическая система адаптивного угломера. 1 – ПЗС, 2 – матрица пикселей, 3 – объектив, 4 – призма, 5 – светоделитель, 6 – точечная цель, 7 – призма БКР-180, 8 – ребро крыши, 9 – коллиматор, 10 – точечная диафрагма, 11 – осветитель.

Следует отметить, что для угловых величин со знаком  $\Delta$  последовательность (порядок) поворотов СК в табл. 1 и 2 безразличен.

**Векторы.** На рис. 1 вектор  $N_1 = i$  в СК  $X_1Y_1Z_1$  описывает угловое положение нормали посадочной плоскости угломера, ось  $X_4$  СК  $X_4Y_4Z_4$  проходит через заднюю главную точку объектива 3 и центр изображения диафрагмы 10 на матрице 2, а ортогональная структура пикселей на матрице задает геометрическую ориентацию осей  $Y_4Z_4$ . В СК  $X_3Y_3Z_3$  два вектора  $N_7 = P_7 = \cos 45^\circ i + \sin 45^\circ j$  соответственно представляют собой нормаль отражающей грани призмы 7 (светоделителя 5) и ребро крыши призмы 7. В СК  $X_2Y_2Z_2$  вектор  $A = -i$  – это визирная линия коллиматора 9.

Принцип действия угломера сводится к следующему. Перед ЗПС 4, 7 и узкопольным объективом 3 в его угловом поле ( $2\Delta W$ ) расположена бесконечно удаленная точечная цель (например, звезда) 6, угловое положение которой в СК  $X_1Y_1Z_1$  описывается вектором  $C_1 = 1i + \Delta C_{y1}j + \Delta C_{z1}k$ . Назначение угломера – определение угловых координат цели ( $\Delta C_{y1}, \Delta C_{z1}$ ) в СК  $X_1Y_1Z_1$ . Однако физически определение координат цели происходит в СК  $X_4Y_4Z_4$ , т. е. определяются величины ( $\Delta C_{y4}, \Delta C_{z4}$ ) относительно начала точки отсчета на матрице 2, формируемой точечным изображением диафрагмы 10 (пучком лучей, описываемым вектором  $A'$ ). При номинальной геометрии  $\Delta C_{y4} = \Delta C_{y1}, \Delta C_{z4} = \Delta C_{z1}$ .

Однако при нарушенной геометрической схеме эти равенства будут нарушены.

Для простоты проведения анализа будем считать, что

$$C_1 = N_1 = C'_1 = 1i, \quad (1)$$

т. е.  $\Delta C_{y1} = \Delta C_{z1} = 0$ .

**Адаптивность.** Как видно из рис. 1 на вход оптико-электронного блока 3–1 поступают два пучка лучей, которые записываются как  $A', C'_1$ . Эти векторы являются соответственно изображениями векторов  $A, C_1$ .

Используя известные методы векторного анализа [12] и данные табл. 1, 2, получим следующие выражения  $A', C'_1$  в СК  $X_4Y_4Z_4$ :

$$A' = 1i + \Delta\gamma_2j + \Delta\beta_2k; \quad (2)$$

$$C'_1 = 1i. \quad (3)$$

В отношении влияния микроперемещений элементов блока 3–1 необходимо пояснить следующее. Так как после ЗПС 4, 7 ход лучей от цели 6 ( $C'_1$ ) и коллиматора ( $A'$ ) является совместным, то в силу этого любые микроперемещения линз объектива 3, матрицы 2 и ПЗС 1 приводят к одновременному и одинаковому смещению изображений цели 6 и диафрагмы 10 по матрице 2. Напомним, что фактическое измерение координат цели осуществляется в СК  $X_4Y_4Z_4$  относительно точечного изображения диафрагмы 10. Поэтому микроперемещения элемен-

тов 3–1, приводящие к совместному перемещению изображений 6, 10, на точность измерения влияния не оказывают. Вследствие этого здесь не рассматривается звено ( $X_3Y_3Z_3$ ,  $X_4Y_4Z_4$ ) аналогично табл. 1 и 2.

Из формул (2, 3) следует, что при обеспечении конструкторскими средствами равенства  $\Delta\gamma_2 = \Delta\beta_2 = 0$  выражения рассматриваемых

векторов приобретают вид  $C'_1 = A' = 1i$  и данный угломер становится адаптивным, т. е. в этом угломере в рамках принятых допущений рассмотренные нарушения геометрии не влияют на точность его измерений.

Второй пример представляет собой дополнительный канал (рис. 2) адаптивного угломера, который здесь не представлен.

**Таблица 1.** Описание номинальной и нарушенной геометрии в 1-м звене СК простейшего адаптивного угломера

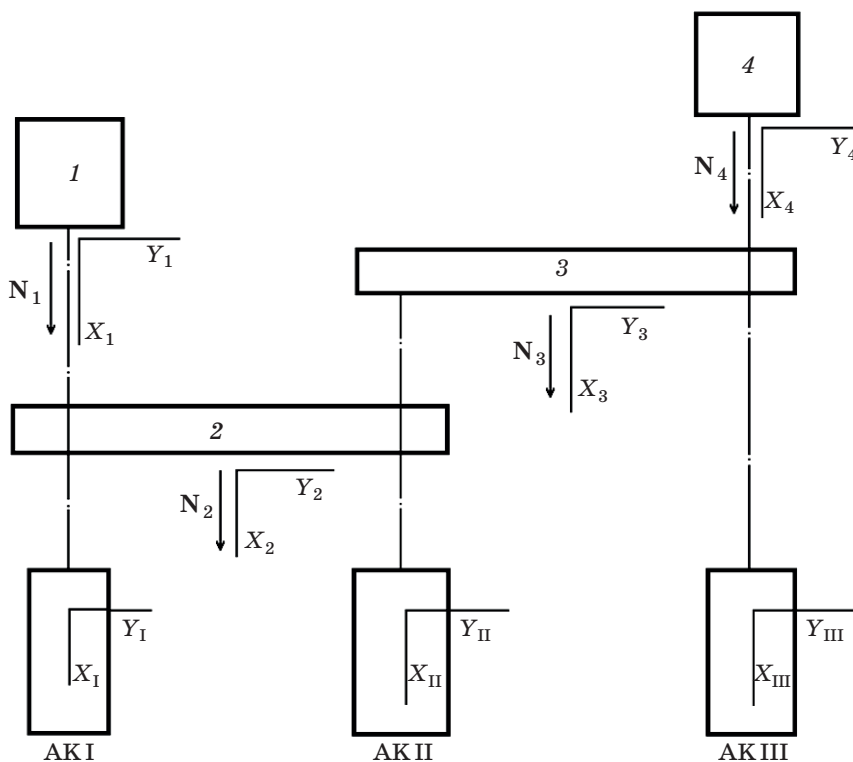
Положение модулей (СК $X_1Y_1Z_1$ и СК $X_2Y_2Z_2$ ) в 1-м звене	СК $X_2^*Y_2^*Z_2^*$ повернута вокруг оси $X_1$ на угол	СК $X_2^{**}Y_2^{**}Z_2^{**}$ повернута вокруг оси $Y_2^*$ на угол	СК $X_2Y_2Z_2$ повернута вокруг оси $Z_2^{**}$ на угол
Номинальная геометрия	0	0	0
Нарушенная геометрия	$\Delta\alpha_2$	$\Delta\beta_2$	$\Delta\gamma_2$

**Примечание.** Ось  $X_1$  параллельна и одинаково направлена с осью  $X_2^*$  и соответственно  $Y_2^*$  с  $Y_2^{**}$ ,  $Z_2^*$  с  $Z_2^{**}$ .

**Таблица 2.** Описание номинальной и нарушенной геометрии во 2-м звене СК простейшего адаптивного угломера

Положение модулей (СК $X_2Y_2Z_2$ и СК $X_3Y_3Z_3$ ) во 2-м звене	СК $X_3^*Y_3^*Z_3^*$ повернута вокруг оси $X_2$ на угол	СК $X_3^{**}Y_3^{**}Z_3^{**}$ повернута вокруг оси $Y_3^*$ на угол	СК $X_3Y_3Z_3$ повернута вокруг оси $Z_3^{**}$ на угол
Номинальная геометрия	0	0	0
Нарушенная геометрия	$\Delta\alpha_3$	$\Delta\beta_3$	$\Delta\gamma_3$

**Примечание.** Ось  $X_2$  параллельна и одинаково направлена с осью  $X_3^*$  и соответственно  $Y_3^*$  с  $Y_3^{**}$ ,  $Z_3^*$  с  $Z_3^{**}$ .



**Рис. 2.** Оптическая система дополнительного канала адаптивного угломера. 1 – базовое зеркало; 2, 3 – плоскопараллельные пластины, 4 – контролируемое зеркало; АК I, АК II, АК III – автоколлиматоры.



**Оптическая система.** Канал состоит из базового зеркала 1, двух прозрачных плоскопараллельных пластин 2 и 3, контролируемого зеркала 4 и трех автоколлиматоров – АКI, АКII, АКIII. АК оптико-электронные с матричными приемниками излучения. Назначение канала – определение углового положения контролируемого зеркала относительно базового.

**Системы координат.** Введем следующие СК: СК  $X_1Y_1Z_1$  – СК зеркала 1 (базовая СК). СК  $X_2Y_2Z_2$ , СК  $X_3Y_3Z_3$  – СК плоскопараллельных прозрачных пластин 2 и 3, выполненных в виде параллелепипедов, СК  $X_4Y_4Z_4$  – СК контролируемого зеркала 4 и СК  $X_IY_IZ_I$ , СК  $X_{II}Y_{II}Z_{II}$ , СК  $X_{III}Y_{III}Z_{III}$  – три отсчетные СК соответственно трех автоколлиматоров (АКI, АКII, АКIII). Геометрическое положение (связь) СК с оптическими элементами представлено на рис. 2.

**Нарушение геометрии.** Номинальная геометрия канала и ее нарушение поясняется табл. 3,

4, 5, которые представляют собой математическое описание звеньев цепи связанных между собой СК.

Каждый АК предназначен для измерения угла между нормальными двух плоских отражателей в его угловом поле (в его СК). Так как значение этого угла не зависит от углового положения АК, то оговаривать положение его СК не будем.

**Векторы.** Нормали зеркал 1 и 4 соответственно описываются векторами  $N_1 = 1i$  в СК  $X_1Y_1Z_1$ ,  $N_4 = 1i$  в СК  $X_4Y_4Z_4$ . Нормали светоделителей пластины 2, зеркала и светоделителя пластины 3 соответственно вектора:  $N_2 = 1i$  в СК  $X_2Y_2Z_2$ ,  $N_3 = 1i$  в СК  $X_3Y_3Z_3$ . Для краткости эти нормали можно представить в виде одного выражения:  $N_n = 1i$  в СК  $X_nY_nZ_n$ , где  $n$  (1, 2, 3, 4) – номер нормали и СК.

Как следует из рис. 2, в угловом поле каждого работающего АК имеются два автоколлимационных блика от двух плоских отражателей

**Таблица 3.** Описание номинальной и нарушенной геометрии в 1-м звене СК дополнительного канала адаптивного угламера

Положение модулей (СК $X_1Y_1Z_1$ и СК $X_2Y_2Z_2$ ) в 1-м звене	СК $X'_2Y'_2Z'_2$ повернута вокруг оси $X_1$ на угол	СК $X''_2Y''_2Z''_2$ повернута вокруг оси $Y'_2$ на угол	СК $X_2Y_2Z_2$ повернута вокруг оси $Z''_2$ на угол
Номинальная геометрия	0	0	0
Нарушенная геометрия	$\Delta\alpha_2$	$\Delta\beta_2$	$\Delta\gamma_2$

**Примечание.** Ось  $X_1$  параллельна и одинаково направлена с осью  $X'_2$  и соответственно  $Y'_2$  с  $Y''_2$ ,  $Z''_2$  с  $Z_2$ .

**Таблица 4.** Описание номинальной и нарушенной геометрии во 2-м звене СК дополнительного канала адаптивного угламера

Положение модулей (СК $X_2Y_2Z_2$ и СК $X_3Y_3Z_3$ ) во 2-м звене	СК $X'_3Y'_3Z'_3$ повернута вокруг оси $X_2$ на угол	СК $X''_3Y''_3Z''_3$ повернута вокруг оси $Y'_3$ на угол	СК $X_3Y_3Z_3$ повернута вокруг оси $Z''_3$ на угол
Номинальная геометрия	0	0	0
Нарушенная геометрия	$\Delta\alpha_3$	$\Delta\beta_3$	$\Delta\gamma_3$

**Примечание.** Ось  $X_2$  параллельна и одинаково направлена с осью  $X'_3$  и соответственно  $Y'_3$ ,  $Z''_3$  с  $Z_3$ .

**Таблица 5.** Описание номинальной и нарушенной геометрии в 3-м звене СК дополнительного канала адаптивного угламера

Положение модулей (СК $X_3Y_3Z_3$ и СК $X_4Y_4Z_4$ ) в 3-м звене	СК $X'_4Y'_4Z'_4$ повернута вокруг оси $X_3$ на угол	СК $X''_4Y''_4Z''_4$ повернута вокруг оси $Y'_4$ на угол	СК $X_4Y_4Z_4$ повернута вокруг оси $Z''_4$ на угол
Номинальная геометрия	0	0	0
Нарушенная геометрия	$\Delta\alpha_4$	$\Delta\beta_4$	$\Delta\gamma_4$

**Примечание.** Ось  $X_3$  параллельна и одинаково направлена с осью  $X'_4$  и соответственно  $Y'_4$  с  $Y''_4$ ,  $Z''_4$  с  $Z_4$ .

(от светоделителя или зеркала). АК производит их измерение и выдает угловые координаты двух нормалей в своей СК. Не будем детализировать, каким образом определяется, какой блик принадлежит какому отражателю. Эти угловые координаты, измеренные каждым АК, запишем как

$$(\Delta N_{n,Y,P}; \Delta N_{n,Z,P}), (\Delta N_{n+1,Y,P}; \Delta N_{n+1,Z,P}), \quad (4)$$

где  $\Delta N$  – значение измеренной координаты АК (рад.);  $n$  (1, 2, 3) и  $n+1$  – номера нормалей и СК;  $Y, Z$  – оси отсчетных СК АК;  $P$  (I, II, III) – номера АК и соответственно номера их отсчетных СК.

Значения угловых координат  $\Delta N$ , выраженные в радианах, численно равны направляющим косинусам (НК) векторов нормалей в СК АК. Поэтому:

$$\mathbf{N}_{n,P} = \mathbf{i} + \Delta N_{n,Y,P} \mathbf{j} + \Delta N_{n,Z,P} \mathbf{k}; \quad (5)$$

$$\mathbf{N}_{n+1,P} = \mathbf{i} + \Delta N_{n+1,Y,P} \mathbf{j} + \Delta N_{n+1,Z,P} \mathbf{k}. \quad (6)$$

Очевидно, что связь этих измеренных координат (НК векторов  $\mathbf{N}_{n,P}, \mathbf{N}_{n+1,P}$ ) с углами нарушения геометрии оптической системы канала (см. табл. 3, 4, 5) определяется выражениями

$$\Delta N_{n+1,Y,P} - \Delta N_{n,Y,P} = \Delta \gamma_{n+1}; \quad (7)$$

$$\Delta N_{n+1,Z,P} - \Delta N_{n,Z,P} = \Delta \beta_{n+1}. \quad (8)$$

**Адаптивность.** Используя известные методы векторного анализа [12], полученные выше выражения (4–8) и данные табл. 3, 4, 5, получим вектор  $\mathbf{N}_4$  в СК  $X_1Y_1Z_1$  как

$$\begin{aligned} \mathbf{N}_4 = & \mathbf{i} + [(\Delta N_{2,Y,I} - \Delta N_{1,Y,I}) + \\ & + (\Delta N_{3,Y,II} - \Delta N_{2,Y,II}) + \\ & + (\Delta N_{4,Y,III} - \Delta N_{3,Y,III})] \mathbf{j} - \\ & - [(\Delta N_{2,Z,I} - \Delta N_{1,Z,I}) + \\ & + (\Delta N_{3,Z,II} - \Delta N_{2,Z,II}) + \\ & + (\Delta N_{4,Z,III} - \Delta N_{3,Z,III})] \mathbf{k}. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, определено угловое положение контролируемого зеркала 4 относительно базового 1. В выражении (9) исключены величины нарушений геометрии. Они косвенно присутствуют в искомом выражении вектора в виде

результатов внутрприборных автоколлимационных измерений АК I, АК II, АК III.

В заключение следует отметить, что элементная база современных оптико-электронных приборов и вычислительной техники позволяет осуществлять учет нарушений геометрии в результатах угловых измерений в реальном времени. Этим и объясняется, почему излагаемые относительно простые идеи нашли практическое применение только в последние десятилетия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колосов М.П. Оптическая система с концентрическим объективом // ОМП. 1986. № 4. С. 22–25.
2. Колосов М.П. Оптическая система с пространственным шарниром // ОМП. 1986. № 6. С. 13–16.
3. Колосов М.П. Оптика адаптивных угломеров. М.: ООО “СКАН-1”. 1997. 212 с.
4. Федосеев В.И., Колосов М.П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов. М.: Логос. 2007. 248 с.
5. Мейтин В.А., Чернов В.С. Угломерный инструмент с квазиидеальной системой координат // ОМП. 1983. № 10. С. 45–47.
6. Мейтин В.А. Детермированная модель угломерного прибора и его погрешности // Оптический журнал. 1994. № 7. С. 60–62.
7. Мейтин В.А. Измерительная система для квазиидеального оптического угломера // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 11. С. 42–46.
8. Мейтин В.А. Анализ погрешностей угломерного прибора с квазиидеальной системой координат // Оптический журнал. 1992. № 4. С. 47–51.
9. Гебгарт А.Я. Варианты афокальных нерасстраиваемых безабберационных оптико-механических сканирующих систем // Деп. в ВИМИ. Сб. реф. депонированных рукописей. 1995. № Д08616.
10. Гебгарт А.Я. Сканирующая система на основе зеркального клина и двух триэдров // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1997. № 2–3. С. 148–153.
11. Гебгарт А.Я. Сравнительный анализ стабильности нерасстраиваемых сканеров // Оптический журнал. 2009. № 3. С. 48–53.
12. Грейм И.А. Зеркально-призмные системы. М.: Машиностроение, 1981. 125 с.