

УДК 681.786.3

Разработка алгоритмов автоматической юстировки двухзеркального телескопа

© 2020 г. **В. А. Мейтин, канд. техн. наук; В. Н. Мокшанов;
И. И. Олейников, доктор техн. наук; Ю. В. Бажанов, доктор техн. наук**

Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва

E-mail: otdel110@nppk-spp.ru

Поступила в редакцию 04.02.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-04-66-77

В статье показано, как в двухзеркальном телескопе с помощью встроенного в него устройства контроля смещений обеспечивается автоматическая юстировка положения вторичного зеркала относительно главного зеркала. Дается математическое описание устройства контроля смещений и способы работы с ним, на основании которых предлагаются алгоритмы управления приводами вторичного зеркала.

Ключевые слова: автоматическая юстировка, двухзеркальный телескоп, алгоритмы, главное зеркало, вторичное зеркало, смещение зеркала, контроль смещений, устройство контроля.

Коды OCIS: 120.0120, 230.0230, 080.0080.

Рассмотрим построение и работу алгоритмов автоматической юстировки двухзеркального телескопа при смещениях вторичного зеркала (ВЗ) от требуемого положения относительно главного зеркала (ГЗ): при угловых смещениях ВЗ и при линейных смещениях в направлениях, перпендикулярных оптической оси ГЗ. Алгоритмы предназначены для двухзеркального телескопа, построенного, например, по схемам Кассегрена (рис. 1а) или Мерсена (рис. 1б), с дополнительным плоским зеркалом (ДЗ) с отверстием в центральной нерабочей зоне. Схема Кассегрена с ДЗ ещё имеет самостоятельное название как схема Несмита [1].

Решение задач автоматической юстировки крупногабаритных двухзеркальных телескопов является актуальным как для космических телескопов, так и для телескопов, работающих в земных условиях. Автоматическая юстировка (АЮ) предназначена для восстановления характеристик качества оптической системы за счёт контроля и корректи-

ровки положения ВЗ относительно ГЗ в условиях действия дестабилизирующих факторов [2, 3].

Построение алгоритмов АЮ основано на использовании в телескопе устройства контроля смещений (УКС) ВЗ относительно ГЗ [3]. При этом наличие ДЗ (рис. 1) позволяет свободно использовать пространство под главным зеркалом для размещения основных модулей УКС, а центральное отверстие в нерабочей зоне ДЗ позволяет наблюдать вспомогательные элементы конструкции на ВЗ со стороны основных модулей УКС под ГЗ. Вместе с тем, ДЗ не влияет на работу УКС, поэтому в последующем изложении, на поясняющих работу УКС схемах рис. 2 и рис. 4 оно не показано. В данной статье не рассматривается АЮ при смещениях ВЗ вдоль оптической оси ГЗ. АЮ при осевых смещениях ВЗ может строиться, например, на основе известных технических решений с применением пентапризм или угловых зеркал, разнесённых по краям входного

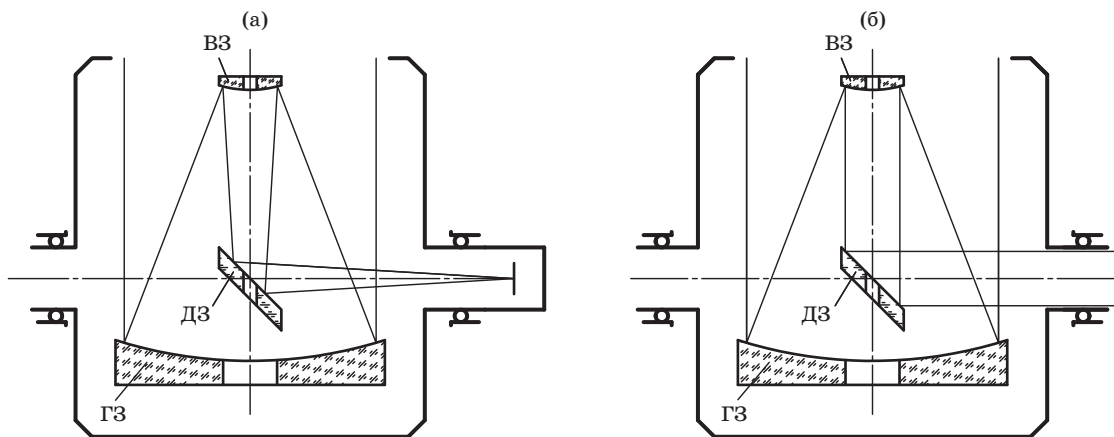


Рис. 1. Примеры двухзеркальных телескопов: а) по схеме Кассегрена; б) по схеме Мерсена. ГЗ — главное зеркало, ВЗ — вторичное зеркало, ДЗ — дополнительное плоское зеркало с центральным отверстием.

или выходного окна телескопа, как показано в работах [2–4].

Итак, рассмотрим конструкцию и работу УКС. Для возможности измерения смещений на ВЗ (рис. 2) жёстко закреплены плоское контрольное зеркало (КЗ), нормаль которого ориентирована параллельно оптической оси ВЗ, контрольная марка (КМ). Марка расположена на оптической оси ВЗ вблизи его вершины и может наблюдаться через небольшое отверстие в центре КЗ.

На тыльной стороне ГЗ (рис. 2) жёстко закреплены два плоских зеркала имитатора ГЗ — это Н и П, нормали которых ориентированы параллельно оптической оси ГЗ. С ГЗ жёстко связывается объектив (Об) с центральным отверстием так, чтобы его оптическая ось была ориентирована вдоль оптической оси ГЗ, а главная точка находилась вблизи вершины ГЗ. С помощью автоколлиматора (АК), закреплённого со стороны оправы ГЗ (рис. 2) через первую перископическую систему (ПС1) и отверстие в Об, определяется взаимное угловое положение зеркала КЗ относительно зеркала Н. Определение получается по положениям автоколлимационных изображений на матрице фотоприёмного устройства (ФПУ) АК. Таким же образом, через вторую перископическую систему (ПС2) и отверстие в Об, определяется взаимное угловое положение КЗ относительно зеркала П. Применение второй перископической системы обеспечивает нерасстраиваемость системы контроля углового положения ВЗ относительно ГЗ. Кроме того, в собранном телескопе КМ находится в фо-

кальной плоскости Об и, поэтому, при выключении источника света АК (ИСАК) и включении источника света КМ (ИСКМ) в фокальной плоскости объектива АК на матрице ФПУ формируется изображение КМ, по смещениям которого оцениваются поперечные смещения ВЗ относительно ГЗ. Измеренные с помощью АК углы наклона и поперечные смещения ВЗ относительно ГЗ предназначены для управления приводами ВЗ. УКС выполняет функцию датчиков обратной связи в системе слежения за положением ВЗ и работает совместно с управляющим вычислительным устройством (УВУ).

Для разработки алгоритмов АЮ и управления приводами ВЗ необходимо установить математическую связь: во-первых, между наклонами КЗ и получаемыми при этом координатами автоколлимационных изображений от КЗ, Н, П на матрице ФПУ; во-вторых, между поперечными смещениями КМ и координатами изображения КМ на матрице. Информация об этих координатах должна передаваться в УВУ, где по установленным алгоритмам и соответствующим программам должны формироваться управляющие воздействия для приводов ВЗ.

Для математического моделирования системы из ГЗ, ВЗ и УКС приняты следующие условия и обозначения (рис. 2): $O_1X_1Y_1Z_1$ — правая система координат (СК) ГЗ, точка O_1 совпадает с вершиной ГЗ, ось Z_1 совпадает с оптической осью ГЗ и направлена в сторону ВЗ. В реальном телескопе для оси X_1 может быть выбрано определённое фиксированное направление, например, параллельно оси опорно-поворотного

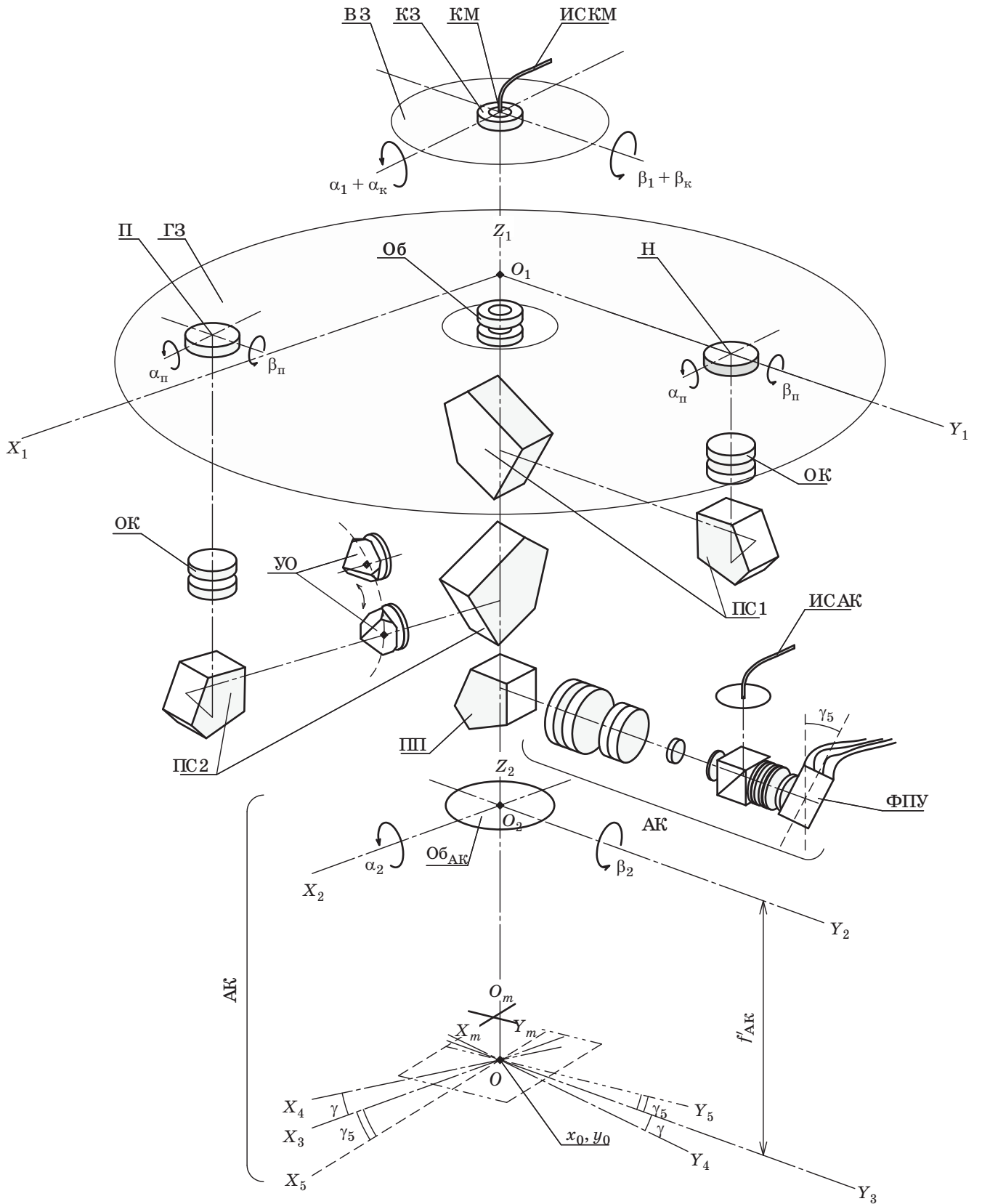


Рис. 2. Устройство контроля смещений (УКС) вторичного зеркала (ВЗ) относительно главного зеркала (ГЗ) (пояснения см. в тексте).

устройства (ОПУ), на котором закреплён телескоп, ось Y_1 дополняет СК ГЗ до правой СК. Для удобства представлений в математической модели АК (рис. 2) будем рассматривать в прямой схеме без действия отклоняющей пентапризмы (ПП), что не влияет на результаты получаемых выводов. ПП служит лишь для уменьшения габаритов конструкции. АК будем рассматривать в СК $O_2X_2Y_2Z_2$, у которой начало координат, точка O_2 , совпадает с задней узловой точкой объектива АК ($Об_{АК}$). Ось Z_2 совпадает с визирной осью АК, т.е. с отрезком прямой, соединяющим заднюю узловую точку $Об_{АК}$ с центральной точкой O матрицы ФПУ. Ось Z_2 направлена в сторону ВЗ. Точка O на матрице является сопряжённой точкой с точкой центра источника света АК и находится по его изображению на матрице при вводе уголкового отражателя (УО) перед АК. В исходном идеальном положении оси координат АК $X_2Y_2Z_2$ соответственно параллельны осям $X_1Y_1Z_1$ ГЗ. В общем случае АК может иметь наклоны относительно ГЗ, которые зададим последовательными разворотами от идеального исходного положения СК $O_2X_2Y_2Z_2$ на угол α_2 вокруг оси X_1 и на угол β_2 вокруг оси Y_1 .

В УКС используются перископические системы ПС1 и ПС2 (рис. 2), которые по своему оптическому действию эквивалентны зеркальному ромбу (зеркально-призменной системе класса Б-0 [5]) и которые обладают свойством не нарушать точность коллинеарного переноса лучей в плоскостях, параллельных главным сечениям их пентапризм. Это позволяет создать нерасстраивающуюся систему контроля угловых отклонений ВЗ относительно ГЗ при возможных случайных отклонениях АК и перископов от исходного положения.

Определим теперь угловые положения ВЗ относительно ГЗ с учётом введённых обозначений. Рассмотрим работу УКС при контроле углового положения ВЗ относительно ГЗ. В исходном идеальном положении оптическая ось ВЗ находится на оптической оси ГЗ, плоское КЗ перпендикулярно к оптической оси ВЗ, а плоские зеркала-имитаторы Н и П перпендикулярны к оптической оси ГЗ. В действительности, после закрепления на ГЗ, зеркало Н может получить постоянные систематические отклонения от исходного идеального положения на угол α_H вокруг оси X_1 и на угол β_H

вокруг оси Y_1 . Зеркало П может получить постоянные систематические отклонения от исходного идеального положения на угол α_{II} вокруг оси X_1 и на угол β_{II} вокруг оси Y_1 . КЗ может быть неперпендикулярным к оптической оси ВЗ, повернутым на угол α_K вокруг оси X_1 и на угол β_K вокруг оси Y_1 . ВЗ вместе с КЗ может получить наклоны на угол α_1 вокруг оси X_1 и на угол β_1 вокруг оси Y_1 .

Первой задачей УКС является определение углов α_1 и β_1 в процессе работы. Для этого выполним следующий ряд действий. Определим на матрице ФПУ в АК координаты автоколлимационного изображения при отражении от КЗ. Для удобства описаний введём на матрице в фокальной плоскости $Об_{АК}$ СК OX_3Y_3 , где точка O является точкой, сопряжённой с центральной точкой ИСАК, а оси X_3 и Y_3 соответственно параллельны осям X_2 и Y_2 АК.

При работе УКС визирный луч из АК проходит через две пентапризмы от ПС2 и ПС1 (которые на проход представляют собой две плоскопараллельные пластинки), проходит через отверстие в Об, отражается от КЗ и по тому же пути возвращается в АК. После этого на матричном приёмнике в СК OX_3Y_3 появляется автоколлимационное изображение от зеркала КЗ с координатами, которые в СК OX_3Y_3 обозначим как x'_3 и y'_3 . С учётом этих координат, принятых условий и обозначений после ряда математических преобразований в соответствии с [5, 6] получаются выражения для определения углов α_1 и β_1 наклонов ВЗ как

$$\beta_1 \approx \beta_2 - x'_3/2f'_{АК} - \beta_K,$$

$$\alpha_1 \approx \alpha_2 + y'_3/2f''_{К} - \alpha_K, \quad (1)$$

где $f'_{АК}$ — фокусное расстояние объектива АК.

В данных выражениях неизвестны значения углов β_2 и α_2 наклонов АК. Для их нахождения вновь рассмотрим рис. 2. Так, на матрице, вместе с автоколлимационным изображением от точечного источника света АК с вышеуказанными координатами x'_3 и y'_3 в этот же момент времени сформированы ещё два автоколлимационных изображения.

Второе автоколлимационное изображение получается, когда часть светового пучка от АК через перископ ПС1 попадает на зеркало Н, отражается от него и вновь через ПС1 возвращается в АК, где на матрице образуется

изображение с координатами, которые обозначим как x'_3 и y'_3 .

Отметим, что при юстировке УКС с помощью оптических клиньев (ОК) на ПС1 (рис. 2) второе автоколлимационное изображение отводят от центра матрицы к её краю, чтобы при основной работе не путать с автоколлимационным изображением от КЗ, которое формируется вблизи центра матрицы. После такой юстировки ПС1 будет вносить в направление падающих и отражённых от зеркала Н лучей дополнительные постоянные составляющие, обозначим их как c''_x и c''_y , а полученные координаты x''_3 и y''_3 с учётом принятых условий и обозначений можно представить как

$$\begin{aligned} x''_3 &\approx (2\beta_2 - 2\beta_H + c''_x) f'_{\text{АК}}, \\ y''_3 &\approx (-2\alpha_2 + 2\alpha_H + c''_y) f'_{\text{АК}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Поправки c''_x и c''_y определяются при юстировке УКС. Определение этих поправок может осуществляться, например, по схеме, пока-

занной на рис. 3а, где перед перископом ПС1 вместо ГЗ и плоских зеркал КЗ и Н устанавливается одно плоское зеркало с СК $X_1Y_1Z_1$, как и у ГЗ. За перископом устанавливается автоколлиматор с СК $X_2Y_2Z_2$, у которого измерительные направления на матрице совпадают с осями OX_3 и OY_3 . Затем, по прямому каналу в АК получают первое автоколлимационное изображение от плоского зеркала, например, с координатами по матрице x'_3 и y'_3 . По смещённому каналу ПС1 получают на матрице второе автоколлимационное изображение от этого же плоского зеркала, например, с координатами x''_3 и y''_3 . Откуда $c''_x \approx (x''_3 - x'_3) / f'_{\text{АК}}$; $c''_y \approx (y''_3 - y'_3) / f'_{\text{АК}}$.

При этом [7] поправка c''_y (смещение луча в плоскости Y_2Z_2 для ПС1), благодаря пентапризмам в выбранной оптической схеме ПС1, при его возможных разъюстировках остаётся постоянной, а поправка c''_x (смещение луча в плоскости Z_2X_2 для ПС1) при его разъюстировках может изменяться, поэтому из (2) выбирается только второе выражение с поправ-

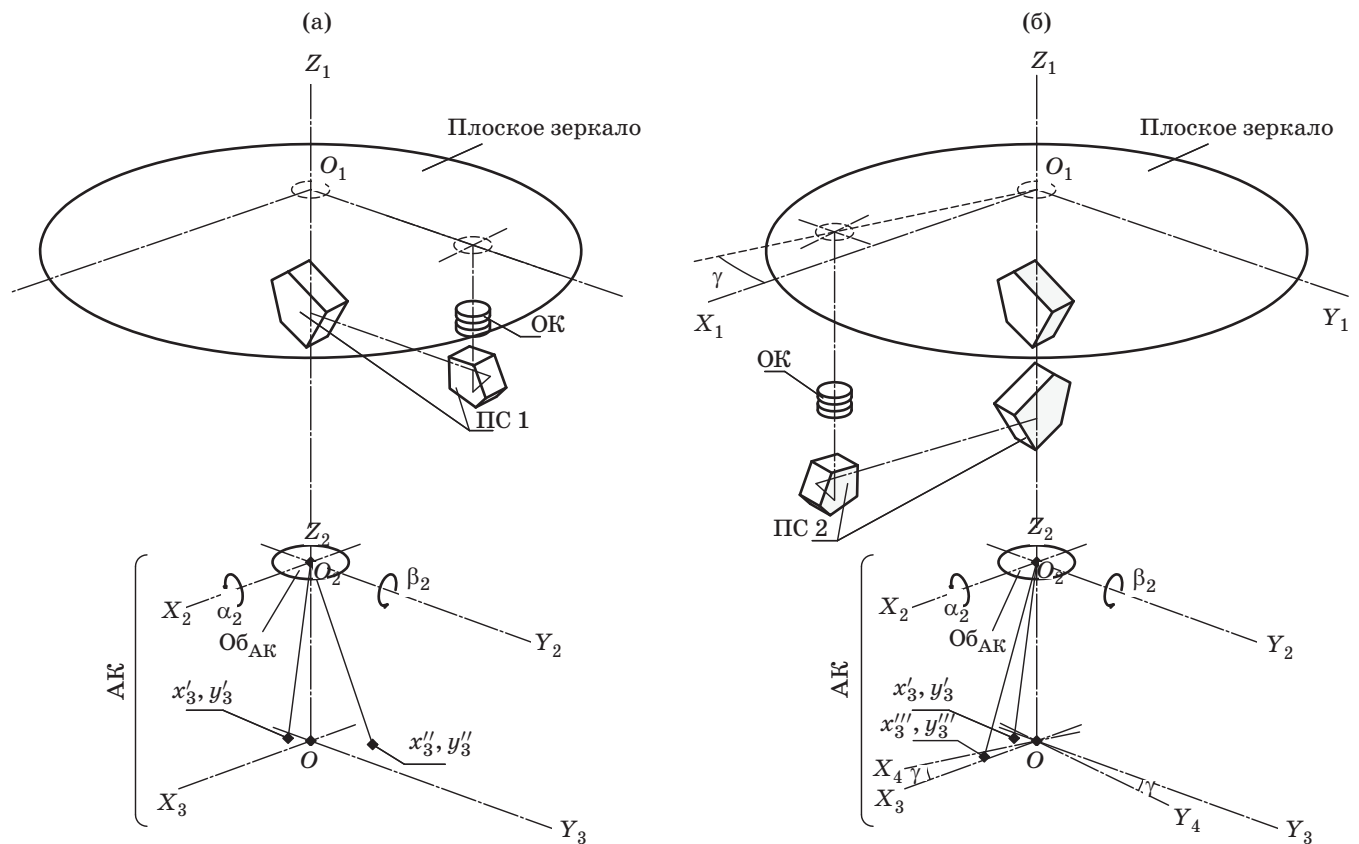


Рис. 3. Схемы с плоским зеркалом для определения поправок перископов: а) c''_x и c''_y для ПС1; б) c'''_x и c'''_y для ПС2 (пояснения см. в тексте).

кой c_y'' для надёжного определения угла α_2 наклона АК, откуда

$$\alpha_2 \approx -y_3''/2f_{\text{АК}} + \alpha_{\text{Н}} + c_y''/2. \quad (3)$$

Вернёмся к рис. 2. При юстировке УКС с помощью оптических клиньев ОК на ПС2 (рис. 2) третье автоколлимационное изображение отводят от центра матрицы к её краю, в непересекающуюся с другими изображениями зону матрицы. Также, как и во втором случае, ПС2 при отражениях от зеркала П внесёт свои поправки c_x''' и c_y''' , которые будут постоянными, если только не нарушается юстировка ПС2. При этом третье автоколлимационное изображение получается на матрице, когда часть света из АК через второй перископ ПС2 попадает на зеркало П, отражается от него и вновь через ПС2 возвращается в АК, где на матрице образуется изображение с координатами, которые обозначим как x_3''' и y_3''' . С учётом принятых условий и обозначений их можно представить как

$$\begin{aligned} x_3''' &\approx (2\beta_2 - 2\beta_{\text{П}} + c_x''') f'_{\text{АК}}, \\ y_3''' &\approx (-2\alpha_2 + 2\alpha_{\text{П}} + c_y''') f'_{\text{АК}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь поправки c_x''' и c_y''' (рис. 3б) определяются также, как и c_x'' и c_y'' при юстировке УКС по схеме, показанной на рис. 3а, где по прямому каналу в АК получают первое автоколлимационное изображение от плоского зеркала, например, с координатами по матрице x_3' и y_3' , а по смещённому каналу ПС2 получают на матрице второе автоколлимационное изображение от этого же плоского зеркала, например, с координатами x_3''' и y_3''' . Откуда

$$c_x''' \approx (x_3''' - x_3')/f_{\text{АК}}, \quad c_y''' \approx (y_3''' - y_3')/f_{\text{АК}}.$$

В общем случае ось второго перископа ПС2 может быть не перпендикулярна к оси ПС1, т.е. не параллельна оси X_2 (или оси X_3 на матрице), а повернута вокруг оси Z_1 на дополнительный постоянный угол γ (рис. 2). Это связано с тем, что из-за расположения на тыльной стороне ГЗ элементов разгрузки или оправы не всегда получается в желаемом месте закрепить зеркала Н и П. При этом и оси перископов невозможно ориентировать перпендикулярно друг к другу. Для выхода из такой ситуации удобно воспользоваться параметром γ .

Для дальнейшего описания системы введём на матрице соответствующую ПС2, повернутую на угол γ систему координат OX_4Y_4 (рис. 2 и рис. 3б). Если теперь измерения через ПС2 проводить в СК OX_4Y_4 , у которой ось X_4 параллельна оси ПС2, то (благодаря пентапризмам в выбранной для ПС2 оптической схеме) систематическая поправка по этому направлению (обозначим её как c_{x_4}''') будет постоянной и не будет зависеть от нарушений юстировки ПС2 (аналогично неизменной поправке c_y'' для ПС1). После ввода на матрице СК OX_4Y_4 третье автоколлимационное изображение на матрице от зеркала П будет находиться в одной точке S также, как и для СК OX_3Y_3 , но с координатами x_4''' и y_4''' в СК OX_4Y_4 .

Установим связь между системами координат на матрице, воспользовавшись преобразованиями координат [6]

$$\begin{aligned} x_4''' &= x_3''' \cos \gamma + y_3''' \sin \gamma, \\ y_4''' &= -x_3''' \sin \gamma + y_3''' \cos \gamma. \end{aligned} \quad (5)$$

Разделим обе части первого уравнения (5) на $f'_{\text{АК}}$ и перепишем его с учётом (4). Откуда получается

$$\begin{aligned} x_4'''/f'_{\text{АК}} &\approx (2\beta_2 - 2\beta_{\text{П}}) \cos \gamma - \\ &- (2\alpha_2 - 2\alpha_{\text{П}}) \sin \gamma + c_{x_4}''', \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$c_{x_4}''' = c_x''' \cos \gamma + c_y''' \sin \gamma. \quad (7)$$

В оптической схеме перископа ПС2 направление, параллельное оси X_4 , является инвариантным, т.е. поправка c_{x_4}''' по этому направлению является постоянной и определяется из выражения (7). Поправки c_x''' и c_y''' могут быть определены, как было показано выше, во время юстировки и в отсутствии действий, которые их могли бы нарушить. Поэтому, сразу же, после нахождения c_x''' и c_y''' во время юстировки по формуле (7) вычисляется постоянная (неизменная) поправка c_{x_4}''' .

Таким образом, из выражения (3) может быть определен угол α_2 наклона АК. При этом в (3) используются неизменная угловая поправка ПС1 c_y'' и постоянная угловая поправка $\alpha_{\text{Н}}$. Теперь, зная угол α_2 , полученный по нерасстраивающейся оптической схеме с ПС1,

можно из выражений (6) и (7) получить угол β_2 наклона АК по нерасстраивающемуся направлению для второго перископа ПС2 с учётом его неизменной поправки c_{x4} , т.е.

$$\beta_2 \approx 1/2 \cos \gamma [x_4'''/f'_{AK} + 2\beta_{II} + (2\alpha_2 - 2\alpha_{II}) \sin \gamma - c_{x4}], \quad (8)$$

где $x_4'''/f'_{AK} = x_3'''/f'_{AK} \cos \gamma + y_3'''/f'_{AK} \sin \gamma$.

Матрица ФПУ АК имеет собственную СК $O_m X_m Y_m$, у которой начало координат O_m находится, например, в углу матричного приёмника (рис. 2), а оси X_m и Y_m направлены соответственно вдоль строк и столбцов рядов пикселей матрицы. Для математического описания координатных преобразований введём приведённую к центру матрицы СК $O X_5 Y_5$, у которой оси $X_5 Y_5$ соответственно параллельны осям $X_m Y_m$, а начало координат, точка O , совпадает с центром автоколлимационного изображения от УО, как и для СК $O X_3 Y_3$, $O X_4 Y_4$. Матрица с СК $O_m X_m Y_m$ из-за требований компоновки может быть развернута относительно СК $O X_3 Y_3$ на угол γ_5 , который определяется и паспортизируется во время юстировки УКС известными методами. Поскольку координаты всех изображений на матрице первоначально получаются в СК $O_m X_m Y_m$ матрицы, а вышеприведённые формулы для вычислений приведены к СК $O X_3 Y_3$, то для выполнения вычислений требуются соответствующие переходы. Перейдем от СК $O X_3 Y_3$ к СК $O_m X_m Y_m$.

$$x_5 = x - x_0, \quad y_5 = y - y_0, \quad (9)$$

где x, y — координаты изображения на матрице в СК $O_m X_m Y_m$; x_0 и y_0 — координаты центра изображения при автоколлимации от УО на матрице в СК $O_m X_m Y_m$; x_5 и y_5 — координаты изображения в приведённой к центру матрицы СК $O X_5 Y_5$.

Затем, используя преобразования координат, перейдем от СК $O X_3 Y_3$ к СК $O X_5 Y_5$ как

$$\begin{aligned} x_3 &= (x - x_0) \cos \gamma_5 - (y - y_0) \sin \gamma_5, \\ y_3 &= (x - x_0) \sin \gamma_5 + (y - y_0) \cos \gamma_5, \end{aligned} \quad (10)$$

где γ_5 — угол поворота СК $O_m X_m Y_m$ (или СК $O X_5 Y_5$) относительно СК $O X_3 Y_3$.

Теперь можно получить выражения, необходимые для вычислений углов наклонов контрольного зеркала КЗ в процессе работы телескопа. Для этого, во-первых, необходимо определить угол наклона α_2 АК в плоскости $Y_1 Z_1$ СК $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ ГЗ. Из выражения (3) с учётом (10) получается

$$\begin{aligned} \alpha_2 &\approx -[(x'' - x_0) \sin \gamma_5 + \\ &+ (y'' - y_0) \cos \gamma_5] / 2 f'_{AK} + \alpha_H + c''_y / 2, \end{aligned} \quad (11)$$

где кроме уже известных и вышеназванных параметров x'' и y'' — координаты автоколлимационного изображения на матрице от зеркала Н в СК матрицы $O_m X_m Y_m$. Во-вторых, необходимо определить угол наклона β_2 АК в плоскости $X_1 Z_1$ СК $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ ГЗ. Из выражения (8) с учётом (10) получается

$$\beta_2 \approx [q + 2\beta_{II} + (2\alpha_2 - 2\alpha_{II}) \sin \gamma - c_{x4}] / 2 \cos \gamma, \quad (12)$$

где $q = [(x''' - x_0) \cos(\gamma - \gamma_5) + (y''' - y_0) \times \sin(\gamma - \gamma_5)] / f'_{AK}$, при этом x''' и y''' — координаты автоколлимационного изображения на матрице от зеркала П в СК матрицы $O_m X_m Y_m$. В-третьих, необходимо определить α_1 (угол наклона ВЗ вокруг оси X_1) и β_1 (угол наклона ВЗ вокруг оси Y_1). С учётом выражений (1), (10) получается

$$\begin{aligned} \alpha_1 &\approx \alpha_2 - \alpha_K + [(x' - x_0) \sin \gamma_5 + \\ &+ (y' - y_0) \cos \gamma_5] / 2 f'_{AK}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \beta_1 &\approx \beta_2 - \beta_K + [(x' - x_0) \cos \gamma - \\ &- (y' - y_0) \sin \gamma_5] / 2 f'_{AK}, \end{aligned} \quad (14)$$

где кроме вышеперечисленных параметров x' и y' — координаты автоколлимационного изображения на матрице от зеркала КЗ в СК матрицы $O_m X_m Y_m$.

Таким образом, алгоритм вычислений углового положения ВЗ по угловому положению КЗ может строиться на формулах (11) и (12), (13) и (14), если систематические угловые отклонения $\alpha_H, c''_y, \beta_{II}, \alpha_{II}, c_{x4}, \alpha_K, \beta_K$ известны. Назовем его первым алгоритмом вычислений углового положения ВЗ относительно ГЗ.

Погрешности получения углов α_1 и β_1 углового положения ВЗ относительно ГЗ, в таком

случае, в основном зависят от погрешностей получения поправок. Для уменьшения влияния погрешностей поправок на точность определения углового положения ВЗ рассмотрим применение второго алгоритма вычислений углового положения ВЗ относительно ГЗ. Так, если во время юстировки и испытаний телескопа имеется возможность наилучшей установки взаимного положения ВЗ относительно ГЗ, то в таком наилучшем взаимном положении ВЗ и ГЗ необходимо с помощью АК выполнить измерения угловых координат по трём зеркалам Н, П и КЗ (рис. 2) и получить соответствующие значения отсчётов x'' и y'' , x''' и y''' , x' и y' . При этом считать значения всех систематических угловых отклонений α_H , c_y'' , β_P , α_P , c_{x4} , α_K , β_K равными нулю. С таким условием, используя формулы (11) и (12), (13) и (14), следует найти значения углов α_2 и β_2 , α_1 и β_1 . Обозначим эти значения как $(\alpha_2)_0$ и $(\beta_2)_0$, $(\alpha_1)_0$ и $(\beta_1)_0$. Далее, если телескоп используется в основной работе, то при определении наклона ВЗ относительно ГЗ необходимо вновь с помощью АК выполнить измерения угловых координат по трём зеркалам — Н, П и КЗ (рис. 2) и получить соответствующие значения отсчетов x'' и y'' , x''' и y''' , x' и y' . Воспользовавшись формулами (11) и (12), (13) и (14) с нулевыми значениями для α_H , c_y'' , β_P , α_P , c_{x4} , α_K и β_K , найдём значения углов α_2 и β_2 , α_1 и β_1 и обозначим эти значения как $(\alpha_2)_j^*$ и $(\beta_2)_j^*$, $(\alpha_1)_j^*$ и $(\beta_1)_j^*$, где $j = 1, 2, 3, \dots$ — номер приёма измерений. Угловое положение ВЗ относительно ГЗ для j -того приёма измерений можно вычислить по формулам

$$\Delta(\alpha_1)_j = (\alpha_1)_j^* - (\alpha_1)_0, \Delta(\beta_1)_j = (\beta_1)_j^* - (\beta_1)_0, \quad (15)$$

где $\Delta(\alpha_1)_j$ — угол наклона ВЗ относительно ГЗ вокруг оси X_1 , $\Delta(\beta_1)_j$ — угол наклона ВЗ относительно ГЗ вокруг оси Y_1 .

Второй задачей УКС является определение поперечных смещений ВЗ относительно оптической оси ГЗ. Рассмотрим рис. 4, введём дополнительные условия и обозначения. Для Об, оптическая ось которого ориентирована параллельно оптической оси ГЗ, введём СК $O_6X_6Y_6Z_6$, у которой оси $X_6Y_6Z_6$ соответственно параллельны осям $X_1Y_1Z_1$ СК ГЗ. При этом точка O_6 совмещена с главной точкой Об. Введём плоскость с СК $O_7X_7Y_7$, у которой точка O_7 находится на оси Z_6 на расстоянии, рав-

ном фокусному расстоянию f'_{lens} объектива Об от точки O_6 , а оси X_7Y_7 соответственно параллельны осям X_6Y_6 . Обозначим точку пересечения оптической оси ГЗ с плоскостью $O_7X_7Y_7$ как O'_1 . Обозначим координаты этой точки в СК $O_7X_7Y_7$ как x_{lens} и y_{lens} . Обозначим точкой «В» (рис. 4) точку пересечения оптической оси ВЗ (при отсутствии наклонов ВЗ относительно ГЗ) с плоскостью $O_7X_7Y_7$. Обозначим её координаты как $(x_1 + x_{\text{lens}})$ и $(y_1 + y_{\text{lens}})$, где x_1 и y_1 — смещения точки В относительно точки O'_1 в СК $O_7X_7Y_7$. Это есть поперечные смещения ВЗ относительно оптической оси ГЗ. Полагаем, что светящаяся контрольная марка КМ на ВЗ находится в плоскости $O_7X_7Y_7$ с координатами, которые обозначим как $x'_1 = x_1 + x_{\text{lens}} + x_{\text{cm}}$ и $y'_1 = y_1 + y_{\text{lens}} + y_{\text{cm}}$ (рис. 4). Координаты x_{lens} и y_{lens} можно рассматривать и как систематические отклонения главной точки Об (точки O_6) от оптической оси ГЗ; x_{cm} и y_{cm} как систематические отклонения КМ от оптической оси ВЗ.

Для работы приводов поперечных смещений ВЗ необходимо знать величины x_1 и y_1 . В соответствии с рис. 4 можно определить расстояния x'_1 и y'_1 , которые включают в себя x_1 и y_1 . С учётом принятых условий и обозначений, рассматривая ход визирного луча с ортом \mathbf{b}_1 (рис. 4), проходящего от точки КМ через главную точку Об (точку O_6) и далее в АК до изображения на матрице, получается

$$x'_1 = f'_{\text{lens}}(\beta_2 - x_3/f'_{\text{AK}}), y'_1 = -f'_{\text{lens}}(\alpha_2 + y_3/f'_{\text{AK}}), \quad (16)$$

где x_3 и y_3 — координаты изображения КМ на матрице в СК OX_3Y_3 .

Принимая во внимание преобразования координат (9) и (10), для расстояний x'_1 и y'_1 в СК $O_mX_mY_m$ матричного приёмника, можно записать

$$x'_1 = f'_{\text{lens}} \{ \beta_2 - [(x - x_0) \cos \gamma_5 - (y - y_0) \sin \gamma_5] / f'_{\text{AK}} \}, \quad (17)$$

$$y'_1 = -f'_{\text{lens}} \{ \alpha_2 + [(x - x_0) \sin \gamma_5 + (y - y_0) \cos \gamma_5] / f'_{\text{AK}} \}, \quad (18)$$

где x и y — координаты изображения контрольной марки КМ на матрице в СК $O_mX_mY_m$, которые получаются при включённом источ-

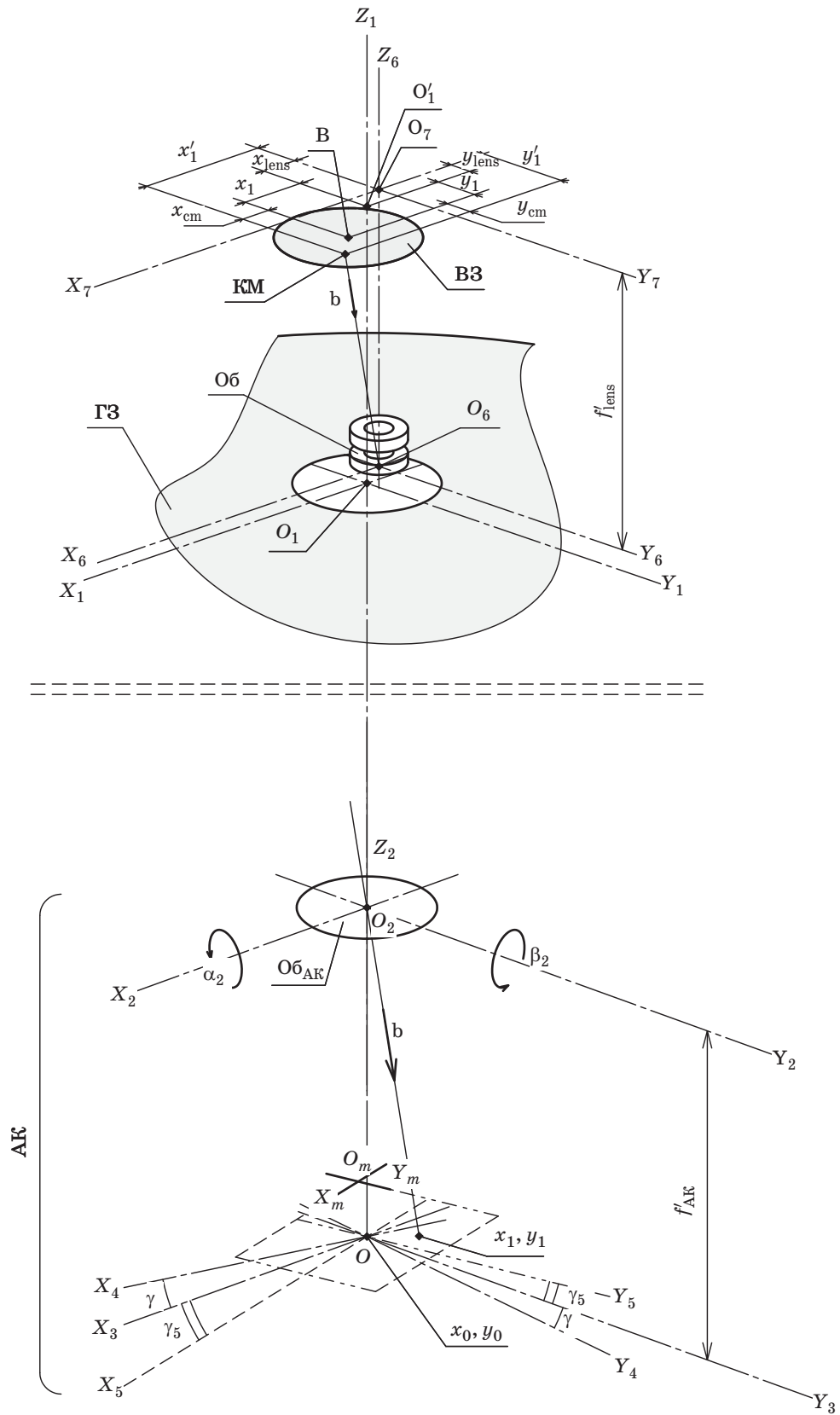


Рис. 4. Контроль поперечных смещений вторичного зеркала (B3) относительно главного зеркала (ГЗ) (по-яснения в тексте).

нике света для КМ и выключенном источнике света АК. Напомним также, что в этих выражениях x_0 и y_0 — значения координат точечного изображения, получаемые с матрицы в СК $O_m X_m Y_m$ при автоколлимации от УО, видимого в ход лучей АК. Кроме того, углы наклона α_2 и β_2 для АК, как было показано ранее, определяются предварительно с применением формул (11) и (12). Если систематические отклонения x_{lens} , x_{cm} , y_{lens} и y_{cm} известны, то их можно использовать в качестве поправок. Тогда из выражений (17) и (18), с учётом того, что $x'_1 = x_1 + x_{\text{lens}} + x_{\text{cm}}$ и $y'_1 = y_1 + y_{\text{lens}} + y_{\text{cm}}$, получим выражения для x_1 и y_1 расстояний между вершиной ВЗ и оптической осью ГЗ

$$x_1 = f'_{\text{lens}} \{ \beta_2 - [(x - x_0) \cos \gamma_5 - (y - y_0) \sin \gamma_5] / f'_{\text{AK}} \} - x_{\text{cm}} - x_{\text{lens}}, \quad (19)$$

$$y_1 = -f'_{\text{lens}} \{ \alpha_2 + [(x - x_0) \sin \gamma_5 + (y - y_0) \cos \gamma_5] / f'_{\text{AK}} \} - y_{\text{cm}} - y_{\text{lens}}. \quad (20)$$

Будем считать, что выражения (19) и (20) и определяют третий вычислительный алгоритм.

Рассмотрим другой случай, когда систематические отклонения не известны, однако во время юстировки или испытаний телескопа, имеется возможность наилучшей установки взаимного положения ВЗ относительно ГЗ.

Тогда, в таком лучшем по качеству положении, необходимо определить по формулам (19) и (20) значения смещений x_1 и y_1 , назовем их значениями лучшего положения и введём для них обозначения $(x_1)_0$ и $(y_1)_0$ соответственно. При этом здесь, как и в случае со вторым алгоритмом получения угловых смещений ВЗ, значения систематических отклонений x_{lens} , x_{cm} , y_{lens} , y_{cm} , принимаются равными нулю.

Теперь телескоп можно использовать в основной работе. В любом новом положении телескопа при определении поперечных смещений ВЗ относительно ГЗ необходимо вновь с помощью АК выполнить все измерения. Вновь, по формулам (19) и (20), считая значения систематических отклонений равными нулю, надо найти значения смещений x_1 и y_1 . Введём для них соответствующие обозначения $(x_1)_j^*$ и $(y_1)_j^*$, где $j = 1, 2, 3, \dots$ — номер

приёма измерений (или положения телескопа). Тогда для действительных поперечных смещений ВЗ относительно ГЗ в положении j можно записать

$$\Delta(x_1)_j = (x_1)_j^* - (x_1)_0, \quad \Delta(y_1)_j = (y_1)_j^* - (y_1)_0, \quad (21)$$

где $\Delta(x_1)_j$ — поперечное смещение ВЗ от оптической оси ГЗ вдоль оси X_1 , $\Delta(y_1)_j$ — поперечное смещение ВЗ от оптической оси ГЗ вдоль оси Y_1 .

Выражения (21) определяют четвёртый вычислительный алгоритм.

Таким образом, получены математические модели: для угловых смещений ВЗ относительно ГЗ — выражения (13) и (14), (15); для поперечных смещений ВЗ относительно ГЗ — выражения (19) и (20), (21).

Кроме того, для АЮ должны быть установлены критерии качества: $\Delta\varphi$ — допустимое угловое смещение ВЗ от наилучшего положения относительно ГЗ; Δl — допустимое поперечное смещение ВЗ от наилучшей установки относительно ГЗ. Это может быть, например, $\Delta\varphi = 10^{-5}$ рад и $\Delta l = 0,01$ мм.

Наличие математических моделей и критериев качества позволяет разрабатывать алгоритмы управления приводами перемещений ВЗ. Рассмотрим последовательность действий, связанных с выполнением алгоритмов.

Особенностью работы рассматриваемого УКС является поочередное включение с одинаковыми временными интервалами Δt (например, через $\Delta t = 0,5$ с), источника света для подсветки автоколлимационной марки АК (ИСАК) и источника света для подсветки контрольной марки КМ (ИСКМ).

Во время включения ИСАК на матрице ФПУ АК в СК $O_m X_m Y_m$ одновременно формируются три автоколлимационных изображения: первое — от контрольного зеркала КЗ, закреплённого на ВЗ, с координатами $(x')_j$ и $(y')_j$; второе — от зеркала имитатора Н, закреплённого на ГЗ, с координатами $(x'')_j$ и $(y'')_j$; третье — от зеркала имитатора П, закреплённого на ГЗ, с координатами $(x''')_j$ и $(y''')_j$. Здесь j — порядковый номер приёма измерений. Все три изображения находятся, как уже было сказано ранее, в непересекающихся зонах. Они разнесены на матрице с помощью оптических клиньев (ОК). Координаты изображения автоколлимационной марки АК

на матрице x_0 и y_0 получаются при вводе УО в ход лучей перед АК. При стабильной конструкции АК эти координаты можно получать один раз, например, перед началом работы телескопа и запоминать с помощью УВУ. Свяжем эти координаты, например, со временем t их получения и обозначим как $(x_0)_t$ и $(y_0)_t$. Эти же координаты принимаются за центральную точку матрицы. Для всех автоколлимационных изображений на матрице выбираются зоны, за которые они не выйдут в процессе работы. Допустим, для первого автоколлимационного изображения выбрана на матрице центральная зона радиусом r с учётом возможных максимальных значений углов $|\alpha_2|_{\max}$ и $|\beta_2|_{\max}$ наклонов АК, $|\alpha_1|_{\max}$ и $|\beta_1|_{\max}$ наклонов ВЗ, $|\alpha_K|_{\max}$ и $|\beta_K|_{\max}$ погрешностей крепления КЗ на ВЗ, тогда

$$r = f'_{\text{АК}}[(2|\alpha_2|_{\max} + 2|\alpha_K|_{\max} + 2|\alpha_1|_{\max})^2 + (2|\beta_2|_{\max} + 2|\beta_K|_{\max} + 2|\beta_1|_{\max})^2]^{1/2}. \quad (22)$$

При этом, для координат $(x')_j$ и $(y')_j$ будет выполняться условие

$$\{[(x')_j - (x_0)_t]^2 + [(y')_j - (y_0)_t]^2\}^{1/2} < r. \quad (23)$$

Для второго и третьего автоколлимационных изображений могут быть выбраны на матрице ещё две непересекающиеся зоны, не совпадающие с первой зоной, обеспечиваемые при юстировке УКС на телескопе. Например, для второго автоколлимационного изображения можно выбрать на матрице в СК OX_3Y_3 диапазон $-r < (x''_3)_j < r$ и $r < (y''_3)_j$. При этом, в соответствии с (10) для координат $(x'')_j$ и $(y'')_j$ должны выполняться условия

$$\begin{aligned} -r < [(x'')_j - (x_0)_t] \cos \gamma_5 - [(y'')_j - (y_0)_t] \sin \gamma_5 < r, \\ r < [(x'')_j - (x_0)_t] \sin \gamma_5 + [(y'')_j - (y_0)_t] \cos \gamma_5. \end{aligned} \quad (24)$$

Для третьего автоколлимационного изображения можно выбрать на матрице в СК OX_3Y_3 диапазон $r < (x'''_3)_j$ и $-r < (y'''_3)_j < r$. Тогда, в соответствии с (10) для координат $(x''')_j$ и $(y''')_j$ должны выполняться условия

$$\begin{aligned} r < [(x''')_j - (x_0)_t] \cos \gamma_5 - [(y''')_j - (y_0)_t] \sin \gamma_5, \\ -r < [(x''')_j - (x_0)_t] \sin \gamma_5 + [(y''')_j - (y_0)_t] \cos \gamma_5 < r. \end{aligned} \quad (25)$$

Указание диапазонов может использоваться для верификации автоколлимационных изображений.

Представим теперь, что АЮ двухзеркального телескопа выполняется в условиях, когда известны все параметры, в том числе и все систематические отклонения. Тогда можно применить первый вычислительный алгоритм определения угловых смещений ВЗ вместе с третьим вычислительным алгоритмом определения поперечных смещений ВЗ.

При включении ИСАК за промежутки времени Δt обеспечивается получение измерительных данных для вычислений угловых перемещений ВЗ по первому вычислительному алгоритму. В каждом j -м приёме измерений в АК получают координаты x'' и y'' , x''' и y''' , x' и y' . Обозначим их для j -го приёма как $(x'')_j$ и $(y'')_j$, $(x''')_j$ и $(y''')_j$, $(x')_j$ и $(y')_j$. По этим значениям в УВУ вычисляются углы $(\alpha_2)_j$ и $(\beta_2)_j$ наклона АК по формулам (11) и (12); углы $(\alpha_1)_j$ и $(\beta_1)_j$ наклона ВЗ относительно ГЗ по формулам (13) и (14). Значения углов $(\alpha_2)_j$ и $(\beta_2)_j$, $(\alpha_1)_j$ и $(\beta_1)_j$ для приёма измерений с номером j запоминаются УВУ.

В последующий промежуток времени Δt оказывается выключенным ИСАК и включенным ИСКМ. При этом обеспечивается получение измерительных данных для вычислений поперечных смещений ВЗ по третьему вычислительному алгоритму. На матрице АК формируется одно изображение КМ с координатами x и y . Обозначим их для приёма измерений с номером j , как x_j и y_j . В этом случае по формулам (19) и (20) с учётом полученных при выполнении первого алгоритма значений $(\alpha_2)_j$ и $(\beta_2)_j$ наклонов АК в j -ом приёме измерений определяются поперечные смещения $(x_1)_j$ и $(y_1)_j$. Значения смещений $(x_1)_j$ и $(y_1)_j$ для приёма измерения с номером j также запоминаются УВУ.

Значения угловых смещений вида $(\alpha_1)_j$ и $(\beta_1)_j$ со значениями поперечных смещений вида $(x_1)_j$ и $(y_1)_j$ используются УВУ для управления приводами соответственно угловых и линейных смещений ВЗ, исходя из допустимых значений для угловых и линейных смещений. Работа приводов осуществляется до выполнения требований $[(\alpha_1)_j^2 + (\beta_1)_j^2]^{1/2} < \Delta \varphi$ — для приводов угловых смещений ВЗ, $[(x_1)_j^2 + (y_1)_j^2]^{1/2} < \Delta l$ — для приводов поперечных линейных смещений ВЗ.

Рассмотрим АЮ двухзеркального телескопа в условиях, когда систематические отклонения (или требующиеся для ввода поправки) не известны, но во время юстировки или испытаний телескопа имелась возможность наилучшей установки взаимного положения ВЗ относительно ГЗ. В этом случае применяется второй вычислительный алгоритм для определения угловых смещений ВЗ и четвёртый вычислительный алгоритм — для определения поперечных смещений ВЗ. При этом необходимо воспользоваться, как было показано выше, значениями лучшего положения ВЗ $(\alpha_1)_0$ и $(\beta_1)_0$ для угловых смещений и $(x_1)_0$ и $(y_1)_0$ — для поперечных смещений.

При включении ИСАК за промежуток времени Δt обеспечивается получение измерительных данных для вычислений угловых смещений ВЗ по второму вычислительному алгоритму. Для каждого j -го приёма измерений (также, как и в случае применения первого вычислительного алгоритма) по полученным от АК координатам $(x'')_j$ и $(y'')_j$, $(x''')_j$ и $(y''')_j$, $(x')_j$ и $(y')_j$ при принятом условии равенства нулю систематических отклонений α_H , c''_y , β_{II} , α_{II} , c_{x4} , α_K и β_K в УВУ вычисляются углы наклона АК по формулам (11) и (12). Эти вычисленные углы были обозначены выше как $(\alpha_2)_j^*$ и $(\beta_2)_j^*$. При тех же условиях вычисляются углы по формулам (13) и (14). Такие углы были обозначены ранее как $(\alpha_1)_j^*$ и $(\beta_1)_j^*$. Угловые смещения ВЗ относительно ГЗ для j -го приёма измерений $\Delta(\alpha_1)_j$ и $\Delta(\beta_1)_j$ вычисляются с учётом значений $(\alpha_1)_0$ и $(\beta_1)_0$ лучшего углового положения ВЗ по формулам (15). Полученные значения углов $(\alpha_2)_j^*$ и $(\beta_2)_j^*$, $\Delta(\alpha_1)_j$ и $\Delta(\beta_1)_j$ для приёма измерения с номером j запоминаются УВУ.

В последующий промежуток времени Δt оказывается выключенным ИСАК и включенным ИСКМ. При этом обеспечивается получение измерительных данных для вычислений поперечных смещений ВЗ по четвёртому вычислительному алгоритму. На матрице АК формируется одно точечное изображение КМ с координатами x_j и y_j (для приёма измерений с номером j). В этом случае, с учётом полученных при выполнении второго алгоритма значений $(\alpha_2)_j^*$ и $(\beta_2)_j^*$ (наклонов АК в j -том приёме измерений), и при принятом условии равенства нулю систематических отклонений x_{lens} , x_{cm} , y_{lens} , y_{cm} по формулам (19) и (20) определяются поперечные смещения, обозначенные выше как $(x_1)_j^*$ и $(y_1)_j^*$. Поперечные смещения ВЗ относительно ГЗ для j -го приёма измерений $\Delta(x_1)_j$ и $\Delta(y_1)_j$ вычисляются по формулам (21) с учётом значений $(x_1)_0$ и $(y_1)_0$ наилучшего положения ВЗ. Полученные смещения $\Delta(x_1)_j$ и $\Delta(y_1)_j$ для приёма измерения с номером j запоминаются УВУ.

Итак, в случае применения в последовательности второго и четвёртого вычислительных алгоритмов значения угловых смещений ВЗ $\Delta(\alpha_1)_j$ и $\Delta(\beta_1)_j$ со значениями поперечных смещений $\Delta(x_1)_j$ и $\Delta(y_1)_j$ используются УВУ для управления приводами ВЗ. Работа приводов осуществляется до выполнения требований: $[\Delta(\alpha_1)_j^2 + \Delta(\beta_1)_j^2]^{1/2} < \Delta\phi$; $[(x_1)_j^2 + (y_1)_j^2]^{1/2} < \Delta l$.

Таким образом, в настоящей работе показано, как, выполнив математическое описание двухзеркального телескопа с УКС, построив математические модели угловых и линейных смещений ВЗ и выбрав критерии качества (допустимые угловые и линейные смещения ВЗ), можно получать алгоритмы автоматической юстировки двухзеркального телескопа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.: Наука, 1976. 512 с.
2. Савицкий А.М. Принципы построения оптических систем термостабилизированных телескопов дистанционного зондирования Земли // Автореф. канд. дис. СПб: Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2012. С. 12–14.
3. Александров А.Б., Мейтин В.А., Мокшанов В.Н., Мошков В.Л. Устройство автоматической юстировки двухзеркальной телескопической системы с заданным направлением выходного излучения // Патент России № 2611604, 2017.
4. Добычин П.В. Выверители фокусировки с двойными изображениями // Оптико-механическая промышленность. 1968. № 11. С. 37–43.
5. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1982. 237 с.
6. Грейм И.А. Зеркально-призмные системы. М.: Машиностроение, 1981. 125 с.
7. Мейтин В.А. Исследование и разработка зеркально-призмных систем для высокоточных устройств коллинеарного переноса // Автореф. канд. дис. М.: МИИГАиК, 1982. 22 с.