

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЮСТИРОВКИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ДВУХЗЕРКАЛЬНЫМ ТЕЛЕСКОПОМ

В.А.Мейтин, В.Н.Мокшанов, И.И.Олейников, А.П.Периков.  
АО «НПК«СПП», otde1110@npk-spp.ru

Рассматривается автоматическая юстировка оптической системы с двухзеркальным телескопом, который служит для вывода лазерного излучения и является составной частью приемного канала (ПК). Для обеспечения юстировки используется контрольная система (КС) в виде встроенных в телескоп юстировочных узлов. Дается математическое описание их конструкций и способов работы с ними, на основании которых предлагаются алгоритмы управления соответствующими оптическими элементами.

Настоящая работа является продолжением разработки [1], в которой была рассмотрена автоматическая юстировка двухзеркального телескопа. В данном продолжении рассматривается оптическая система с двухзеркальным телескопом, рис.1, выполненным по схеме Мерсена, который служит для вывода лазерного излучения и, одновременно, является частью приемного канала (ПК). В работе рассматривается разработка алгоритмов автоматической юстировки для обеспечения качественного состояния оптической системы, при котором направление выходного из телескопа излучения можно задавать параллельно или под необходимым углом к оптической оси главного зеркала (ГЗ) телескопа и иметь допустимую расходимость излучения, а для ПК добиваться необходимой фокусировки и устанавливать направление визирования ПК параллельно или под желаемым углом к оптической оси ГЗ.

Для решения таких задач используется контрольная система (КС) в виде встроенных в конструкцию телескопа левого и правого юстировочных узлов (рис.1). Оценка величины расходимости излучения с применением КС выполняется по результатам измерений отступлений от параллельности двух краевых пучков излучения, выходящих из диаметрально противоположных зон выходной апертуры телескопа. Измерения отступлений от параллельности выполняются по краевым пучкам в плоскости, ориентированной параллельно главным сечениям пентапризм (ПП) 7(1) и 7(2), образующих перископическую систему (рис.1). Применение в схеме перископической системы из двух ПП обеспечивает точный параллельный перенос одного краевого пучка лучей к другому для возможности их направления в дополнительный приемный измерительный канал, выполненный конструктивно в виде автоколлиматора (АК) с матричным приемником и точечным источником света. С помощью этого АК измеряется угол между направлениями краевых пучков (расходимость краевых пучков) в плоскости параллельной главным сечениям ПП. При этом по величине расходимости можно оценивать величину осевого отклонения положения вторичного зеркала (ВЗ) от ГЗ телескопа.

Определение направления излучения с применением КС выполняется по результатам измерений отклонений от параллельности направлений краевых пучков от направления оптической оси ГЗ телескопа. При этом направление оптической оси ГЗ задается нормалью к плоскому зеркалу К (рис.1), жестко связанному с ГЗ. Плоское зеркало К на этапе изготовления ГЗ ориентируется так, чтобы его нормаль была параллельна оптической оси ГЗ. Такое зеркало К является имитатором оптической оси ГЗ и с помощью КС, уже относительно нормали к этому зеркалу, определяется направление излучения. Предварительно определяется положение визирной оси АК относительно нормали к зеркалу К. С помощью АК измеряется угловое отклонение направления каждого краевого пучка от направления нормали к зеркалу К. По результатам измерений определяется направление излучения.

В настоящем изложении рассматриваются алгоритмы автоматической юстировки для статических режимов, когда части конструкции оптической системы, имеющие возможность подвижек, фиксируются в каком-либо из выбранных положений.

Алгоритмы определения направления излучения и его расходимости представляются следующим образом: **1.1.** Телескоп на опорно-поворотном устройстве (ОПУ) фиксируется в каком-либо из выбранных положений, с датчика угла оси I-I снимается отсчет  $\theta_1$  и с датчика угла оси II-II снимается отсчет  $\theta_2$  (рис.1). **1.2.** В телескопе автоматически устанавливается ВЗ относительно ГЗ, используя алгоритмы [1]. **1.3.** Определяется угловое положение визирной оси АК относительно нормали к зеркалу К. С помощью управляющего вычислительного устройства (УВУ) даются команды на повороты ромб-призмы (РП) 5(2) в положение IV и РП 5(1) в положение III. С матрицы АК снимаются отсчеты  $x'''$  и  $y'''$  автоколлимационного изображения от зеркала К. **1.4.** Определяется направление излучения относительно направления нормали к зеркалу К. По команде с УВУ переводится РП 5(1) из положения III в положение I. С матрицы АК снимаются отсчеты  $x^I$  и  $y^I$  координат изображения от выделенного РП 5(1) в положении I краевого пучка лучей из всего потока излучения на выходе телескопа. Затем УВУ переводит РП 5(1) из положения I в нейтральное положение II и дает команду на снятие отсчета  $x^{IV}$  координаты изображения, получающегося от выделенного ромб-призмой 5(2) в положении IV диаметрально противоположного краевого пучка лучей из потока направленного излучения на выходе телескопа. **1.5.** Определяется расходимость излучения. Вычисляются угловые отклонения  $\alpha_3$  и  $\beta_3$  визирной оси АК от нормали к зеркалу К как  $\beta_3 = (x''' - x_0) / 2f'_k$ ,  $\alpha_3 = -(y''' - y_0) / 2f'_k$ , где  $x_0$  и  $y_0$  – координаты автоколлимационного изображения от уголкового отражателя, рис.1, полученные при вводе его перед АК при подготовке к работе;  $f'_k$  – значение фокусного расстояния для АК. Вычисляется направление излучения  $\mathcal{B}$  по узлу юстировочному левому относительно нормали к зеркалу К в измерительной плоскости, параллельной главным сечениям ПП 7(1) и 7(2), как  $\beta_6^{Лв} = -(x^I - x_0) / f'_k + \beta_p^I + \beta_3$ , где  $\beta_6^{Лв}$  – угол между направлением излучения и нормалью к зеркалу К в плоскости, параллельной главным сечениям ПП 7(1) и 7(2), со стороны левого узла;  $\beta_p^I$  – паспортное значение постоянной поправки при положении I для РП 5(1). Вычисляется направление излучения  $\mathcal{B}$  по узлу юстировочному левому относительно нормали к зеркалу К в плоскости, перпендикулярной главным сечениям ПП 7(1) и 7(2), как  $\alpha_6^{Лв} = (y^I - y_0) / f'_k + \alpha_p^I + \alpha_3$ , где  $\alpha_6^{Лв}$  – угол между направлением излучения и нормалью к зеркалу К в плоскости, перпендикулярной к главным сечениям ПП 7(1) и 7(2), со стороны левого узла;  $\alpha_p^I$  – паспортное значение постоянной поправки при положении I для РП 5(1). Также вычисляется направление излучения  $\mathcal{B}$  по узлу юстировочному правому относительно зеркала К как  $\beta_6^{Пп} = -(x^{IV} - x_0) / f'_k + \beta_p^{IV} + \beta_3$ , где  $\beta_6^{Пп}$  – угол непараллельности между направлением излучения и нормалью к зеркалу К со стороны узла юстировочного правого в плоскости, параллельной главным сечениям ПП 7(1) и 7(2);  $\beta_p^{IV}$  – паспортное значение постоянной поправки при положении IV для РП 5(2).

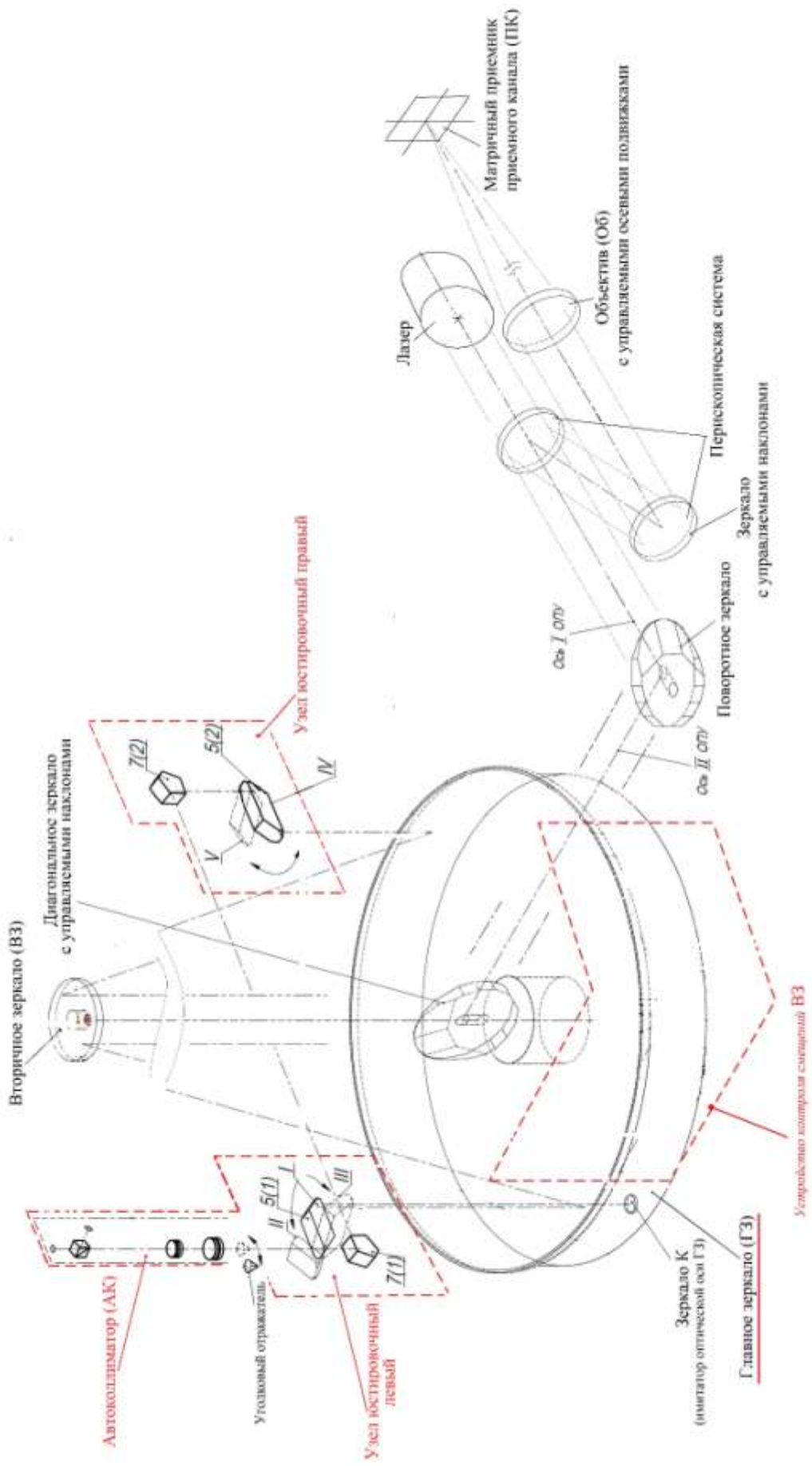


Рис.1. Оптическая система с двухзеркальным телескопом, с левым и правым юстировочными узлами ( пояснения см. в тексте)

Вычисляется величина расходимости излучения  $\partial\beta$  как  $\partial\beta = \beta_6^{Ip} - \beta_6^{Jb} - \Delta_{суст}$ , где  $\Delta_{суст}$  – значение поправки, полученной при аттестации КС. **1.6.** Определяются угловые отклонения направления излучения от направления нормали к зеркалу К. Вычисляется угол  $\beta_6$  отклонения от параллельности между направлением излучения и нормалью к зеркалу К в плоскости, параллельной главным сечениям ПП 7(1) и 7(2)  $\beta_6 = (\beta_6^{Ip} + \beta_6^{Jb})/2$ . Отклонение от параллельности между направлением излучения и нормалью к зеркалу К в плоскости, перпендикулярной к главным сечениям ПП 7(1) и 7(2), благодаря выбранной схеме КС, определяется углом  $\alpha_6 = \alpha_6^{Jb}$ . **1.7.** Значение  $\partial\beta$  используется УВУ для управления приводом осевой подвижки ВЗ и устранения расходимости излучения. Значения  $\beta_6$  и  $\alpha_6$  используются УВУ для управления наклонами диагонального зеркала и задания требуемого направления излучения относительно оптической оси ГЗ.

Перейдем к ПК. Для выполнения автоматической юстировки требуется знание углового отклонения визирной оси ПК (состоящего из телескопа, диагонального зеркала, поворотного зеркала, перископической системы из двух плоских зеркал, объектива и матричного приемника излучения) от направления оптической оси ГЗ и знание осевого отклонения между плоскостью изображения ПК и плоскостью матричного приемника ПК. КС обеспечивает оценку фокусировки ПК по расхождению изображений двух искусственных звезд на его матричном приемнике, которые на входе в ПК задаются двумя краевыми пучками параллельных световых лучей из АК со стороны узла юстировочного левого и узла юстировочного правого.

Применение, в этом случае, перископической системы из двух ПП 7(1) и 7(2), рис.2, позволяет формировать из одного пучка параллельных лучей от АК два разнесенных пучка параллельных лучей с высокой угловой стабильностью в измерительной плоскости, параллельной главным сечениям ПП, которые выходят через левый и правый юстировочные узлы. Эти пучки направляются в ПК: на ГЗ и ВЗ телескопа-коллиматора, на диагональное и поворотное зеркала, попадают в перископическую систему (одно из зеркал которого является светоделительным для пропускания излучения, а второе зеркало имеет управляемые УВУ наклоны) и в объектив, в фокальной плоскости которого установлен матричный приемник, на котором формируются два точечных изображения. По измеренному матрицей расхождению этих точечных изображений оценивается фокусировка ПК.

Проверка отклонения от параллельности визирной оси ПК от оптической оси ГЗ основана на следующем утверждении: если знать угловые отклонения визирных направлений из АК, из узла юстировочного левого и узла юстировочного правого, от оптической оси ГЗ, то, зная угловые отклонения визирной оси ПК от визирных направлений АК, можно определить угловое отклонение визирной оси ПК от оптической оси ГЗ. С учетом действия оптической системы ПК получается, что угловые отклонения визирной оси ПК от оптической оси ГЗ можно определять по линейным смещениям на матрице ПК координат изображений искусственных звезд из АК от координат центра матрицы.

Алгоритмы определения отклонений визирной оси ПК от направления оптической оси ГЗ и фокусировки ПК представляются следующим образом: **2.1.** Определяется угловое положение визирной оси АК относительно нормали к зеркалу К. УВУ даются команды на повороты РП 5(2) в положение IV и РП 5(1) в положение III. По АК снимаются отсчеты  $x'''$  и  $y'''$  для автоколлимационного изображения от зеркала К. **2.2.** Определяется положение визирной оси ПК относительно направления оптической оси ГЗ. УВУ даются команды на

перевод РП 5(1) из положения III в положение I. При этом на матрице в ПК получается изображение от АК со стороны узла юстировочного левого с координатами  $y_l$  и  $z_l$ . УВУ даются команды на перевод РП 5(1) из положения I в нерабочее положение II. При этом на матрице ПК получается изображение от АК со стороны узла юстировочного правого с координатами  $y_r$  и  $z_r$ .

**2.3.** Определяется величина осевого отклонения между плоскостью изображения ПК и плоскостью матричного приемника ПК и определяются угловые отклонения визирного направления ПК от оптической оси ГЗ. При этом вычисляются угловые отклонения  $\alpha_3$  и  $\beta_3$  визирной оси АК от нормали к зеркалу К

$$\beta_3 = (x^{III} - x_0) / 2f'_K, \quad \alpha_3 = -(y^{III} - y_0) / 2f'_K.$$

Преобразование УВУ полученных координат  $y_l$  и  $z_l$ ,  $y_r$  и  $z_r$  в координаты  $y'_l$  и  $z'_l$ ,  $y'_r$  и  $z'_r$  в повернутой на угол  $\alpha = (\theta_1 + \theta_2)$  системе координат (СК) (для ПК это связано с поворотами измерительной плоскости в пространстве его изображений, которая параллельна основаниям ПП 7(1) и 7(2) в пространстве предметов)

$$y'_l = y_l \cdot \cos \alpha + z_l \cdot \sin \alpha, \quad z'_l = -y_l \cdot \sin \alpha + z_l \cdot \cos \alpha,$$

$$y'_r = y_r \cdot \cos \alpha + z_r \cdot \sin \alpha, \quad z'_r = -y_r \cdot \sin \alpha + z_r \cdot \cos \alpha.$$

Вычисляются УВУ  $l'_y$  и  $l'_z$ ,  $r'_y$  - угловые отклонения визирных лучей от АК со стороны узла юстировочного левого и со стороны узла юстировочного правого от оптической оси ГЗ перед объективом ПК  $l'_y = \Gamma(\beta_3 + \beta_{pi}^I)$ ,

$$l'_z = \Gamma(\alpha_3 + \alpha_{pi}^I), \quad r'_y = \Gamma(\beta_3 + \beta_{pi}^{IV}),$$

где  $\Gamma$  - увеличение телескопа,  $\beta_{pi}^I$  и  $\alpha_{pi}^I$ ,  $\beta_{pi}^{IV}$  и  $\alpha_{pi}^{IV}$  - значения поправок по п.1.5. Вычисляются УВУ координаты  $y'_g$  и  $z'_g$  точки «изображения оптической оси ГЗ» на матрице ПК при наличии или отсутствии фокусировки

$$y'_g = [y'_l + y'_r - f'(l'_y + r'_y)] / 2, \quad z'_g = z'_l - f' \cdot l'_z.$$

Вычисляется УВУ величина подвижки  $\Delta f$  фокусировки  $\Delta f = [(y'_r - y'_l) - \Gamma \cdot f' \cdot (\beta_{pi}^{IV} - \beta_{pi}^I)] f' / D$ ,

$D$  - световой диаметр объектива в ПК. Вычисляются УВУ координаты «оптической оси ГЗ»  $y_g$  и  $z_g$  в СК матрицы  $y_g = y'_g \cos \alpha - z'_g \sin \alpha$ ,  $z_g = y'_g \sin \alpha + z'_g \cos \alpha$ .

Вычисляются УВУ угловые отклонения  $\beta_{ПК}$  и  $\alpha_{ПК}$  визирного направления ПК от оптической оси ГЗ на выходе из телескопа в плоскости соответственно перпендикулярной и параллельной основаниям ПП 7(1) и 7(2)

$$\beta_{ПК} = b_y \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) + b_z \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) / \Gamma, \quad \alpha_{ПК} = -[b_y \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) - b_z \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2)] / \Gamma$$

, где  $b_y = \Delta y / f'$ ,  $b_z = \Delta z / f'$  при  $\Delta y = y_{m0} - y_g$ ,  $\Delta z = z_{m0} - z_g$ , здесь  $y_{m0}$  и  $z_{m0}$  - координаты центра матрицы ПК.

**2.4.** Значение  $\Delta f$  используется УВУ для управления приводом осевой подвижки объектива в ПК при фокусировке ПК. Значения  $\beta_{ПК}$  и  $\alpha_{ПК}$  используются УВУ для управления наклонами одного из зеркал перископа в ПК и задания требуемого направления визирования ПК относительно оптической оси ГЗ.

Таким образом, математическое описание КС, разработанные математические модели отклонений от качественного состояния оптической системы с двухзеркальным телескопом и требования к допустимым отклонениям позволяют строить алгоритмы автоматической юстировки оптической системы с двухзеркальным телескопом.

### Литература

1. //Оптический журнал. 2020. Том 87. № 4. С. 66-77.