

УДК 535.8 (088.8)

**РАСЧЕТ НАКЛОННЫХ ПУЧКОВ ЛУЧЕЙ В ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОМ ТЕЛЕСКОПЕ  
НА БАЗЕ ЗАФОКАЛЬНОЙ ДВУХЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ГЛАВНЫМ  
АСФЕРИЧЕСКИМ ЗЕРКАЛОМ**

И.В. Ермаков

**РАСЧЕТ НАКЛОННЫХ ПУЧКОВ ЛУЧЕЙ В ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОМ ТЕЛЕСКОПЕ  
НА БАЗЕ ЗАФОКАЛЬНОЙ ДВУХЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ГЛАВНЫМ  
АСФЕРИЧЕСКИМ ЗЕРКАЛОМ**

И.В. Ермаков

В работе представлены алгоритм расчета наклонных пучков лучей в зеркально-линзовом телескопе (ЗЛТ) на базе зафокальной двухзеркальной системы (ЗДС) с главным асферическим зеркалом и анализ качества изображения двух полуценных вариантов ЗЛТ.

Строительство крупных оптических телескопов в настоящее время очень актуально. Достаточно отметить, что в последние годы построена серия телескопов на Гавайских островах, один из которых телескоп «Субару» с диаметром главного зеркала 8.2 м. Несколько лет на орбите работает американский телескоп имени астронома Хаббла с главным зеркалом диаметром 2.4 м. В настоящее время идет работа над проектами гигантских телескопов с диаметрами главных зеркал 30, 50 и 100 м.

Одним из перспективных вариантов ЗЛТ с диаметром главного зеркала сколь угодно большим является система, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

В качестве объектов рассмотрения в работе выбраны два варианта ЗЛТ, состоящего из линзовой части (ЛЧ), устанавливаемую между зеркалами в плоскости, для которой сечение каустики, образованное лучами, идущими от главного зеркала, наименьшее.

Вариант зафокальной зеркальной системы выбран, чтобы к ней можно было присоединить линзовую часть (ЛЧ), устанавливаемую между зеркалами в плоскости, для которой сечение каустики, образованное лучами, идущими от главного зеркала, наименьшее.

Общее решение афокальной двухзеркальной системы (АДС) получено на основе принципа Ферма и заключается в том, что при известной форме одного из зеркал форма второго может быть однозначно определена из систем уравнений (1) для случаев зафокальной (с «плюсом») и предфокальной (с «минусом») зеркальных систем [1] и [2]:

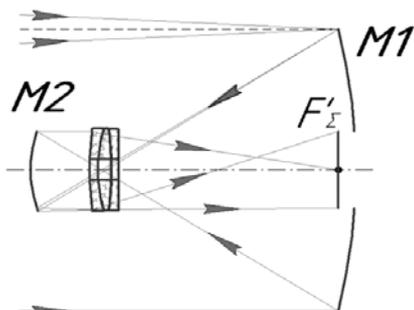


Рис. 1. Принципиальная схема ЗЛТ.

$$\begin{cases} Y \pm y = 2d \operatorname{tg} \varphi, \\ Z \pm z = d \operatorname{tg}^2 \varphi. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $(Y, Z)$  и  $(y, z)$  – координаты падения осевого луча на главное и вторичное зеркало в меридиональной плоскости (в системах координат  $YOZ$  и  $yoz$  соответственно),  $d$  – расстояние между зеркалами,  $\varphi$  – наклон нормали к зеркалу к оптической оси в точке падения луча.

АДС имеет неоспоримые преимущества по сравнению с классической системой Мерсена, состоящей из двух параболоидов: нет необходимости изготавливать два асферических зеркала, а также центрирование зеркал значительно проще. АДС свободна от сферической аберрации, но наклонные пучки лучей не гомоцентричны. Эта проблема решается путем компенсации аберраций наклонного пучка лучей АДС аберрациями ЛЧ. Важно отметить, что системы с главным асферическим зеркалом имеют отступление от выполнения условия синусов (ОВУС) меньшее по абсолютной величине, чем системы с главным сферическим зеркалом, поэтому первый вариант систем рассмотрен в работе.

Выбраны конструктивные параметры систем: радиус кривизны вторичного зеркала  $r$ , расстояние между зеркалами  $d$  и  $\Gamma_0$  – угловое паракиальное увеличение ЗДС, и рассчитаны остальные параметры ЗДС:

$$d = 3000 \text{ мм}, D_A = 610 \text{ мм}, D_S = 152 \text{ мм}, \Gamma_0 = 4.00x, \Gamma_{\max} = 4.01x, \Delta_{\sin 1} = 0.25 \%;$$

$$d = 3000 \text{ мм}, D_A = 603 \text{ мм}, D_S = 86 \text{ мм}, \Gamma_0 = 7.00x, \Gamma_{\max} = 7.013x, \Delta_{\sin 2} = 0.18 \%.$$

Здесь  $D_S$  – диаметр сферического зеркала,  $D_A$  – диаметр асферического зеркала,  $\Gamma_{\max}$  – отношение максимальных высот на зеркалах в точке отражения луча.

Для составления алгоритма трассировки наклонных лучей через ЗДС рассмотрим верхнюю половину главного зеркала (меридиональное сечение,  $Y > 0$ ) и вариант, когда угол падения наклонного луча на главное зеркало к оптической оси  $\omega > 0$ . Существует два варианта хода луча, отраженного от главного зеркала:

1) луч пересекает оптическую ось (рис. 2):  $\operatorname{tg}(2\varphi - \omega) > Y/(d - Z)$  (2),  $\omega' = 2\varphi - \omega - 2\varphi'$  (3);

2) луч не пересекает оптическую ось (рис. 3):  $\operatorname{tg}(2\varphi - \omega) < Y/(d - Z)$  (4),  $\omega' = 2\varphi - \omega + 2\varphi'$  (5).

Вариант № 1; угловое поле $2\omega = 1^\circ$						
ОВУС $\Delta_{\sin 1} = 0.25\%$						
Главное зеркало М1			Вторичное зеркало М2			Угол выходящего Луча $\omega', \circ$
$\varphi, \circ$	$Y, \text{мм}$	$Z, \text{мм}$	$\varphi', \circ$	$y', \text{мм}$	$z', \text{мм}$	
3.634	305.000	9.68767	2.376	-49.753	1.03183	2.01552513
1.193	100.000	1.04164	-0.057	1.203	0.00060	2.00176563
0.000	0.000	0.00000	-1.250	26.178	0.28557	2.00002380
-1.193	-100.000	1.04164	-2.444	51.176	1.09172	2.00153747
-3.634	-305.000	9.68767	-4.891	102.320	4.37021	2.01480695
Разность между максимальным и минимальным углами $\omega'$ : $\Delta\omega' = 0.01547963$						
Вариант № 2; угловое поле $2\omega = 1^\circ$						
ОВУС $\Delta_{\sin 2} = 0.18\%$						
Главное зеркало М1			Вторичное зеркало М2			Угол выходящего луча $\omega', \circ$
$\varphi, \circ$	$Y, \text{мм}$	$Z, \text{мм}$	$\varphi', \circ$	$y', \text{мм}$	$z', \text{мм}$	
3.291	302.000	8.68507	1.280	-16.759	0.18726	3.52221392
1.091	100.000	0.95237	-0.910	11.916	0.09467	3.50314901
0.000	0.000	0.00000	-2.000	26.177	0.45695	3.50030471
-1.091	-100.000	0.95237	-3.092	40.456	1.09191	3.50181642
-3.291	-302.000	8.68507	-5.301	69.285	3.20713	3.51813684
Разность между максимальным и минимальным углами $\omega'$ : $\Delta\omega' = 0.02190004$						

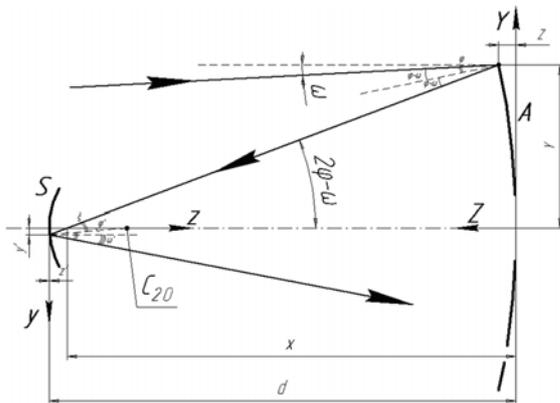


Рис. 2. Наклонный пучок  $\omega > 0$  в ЗДС ( $Y > 0$ , луч пересекает оптическую ось).

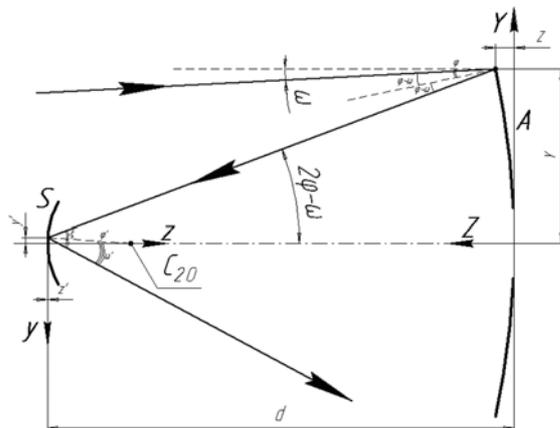


Рис. 3. Наклонный пучок  $\omega > 0$  в ЗДС ( $Y > 0$ , луч не пересекает оптическую ось).

Здесь  $\omega'$  – искомый угол наклона выходящего из зеркальной системы луча.

Уравнение, связывающее три параметра: угол наклона входящего в систему луча  $\omega$  и углы наклона

нормалей к зеркалам в точках отражения лучей  $\varphi, \varphi'$ , имеет следующий вид:

$$r \sin \varphi' - r \operatorname{tg}(2\varphi - \omega) \cos \varphi' = [d(1 - \operatorname{tg}^2 \varphi) - r \cos \varphi] \times \operatorname{tg}(2\varphi - \omega) - 2d \operatorname{tg} \varphi + r \sin \varphi. \quad (6)$$

Для определения угла  $\omega'$  из (3)–(5), соответствующего определенной координате  $y'$  на малом зеркале при заданных углах  $\omega$  и  $\varphi$ , нужно решить уравнение (6) относительно  $\varphi'$ .

Алгоритмы программы для определения угла  $\varphi'$  для каждого случая различны.

Рассмотрим нижнюю половину главного зеркала (меридиональное сечение,  $Y < 0$ ) и вариант, когда  $\omega > 0$ . После главного зеркала луч всегда пересекает оптическую ось (рис. 4). Уравнение (7) имеет структуру аналогичную (6). Отличие лишь в знаках:

$$r \sin \varphi' - r \operatorname{tg}(2\varphi + \omega) \cos \varphi' = [d(1 - \operatorname{tg}^2 \varphi) - r \cos \varphi] \times \operatorname{tg}(2\varphi + \omega) - 2d \operatorname{tg} \varphi + r \sin \varphi. \quad (7)$$

Связь между углами  $\varphi'$  и  $\omega'$  также отличается:

$$\omega' = -2\varphi - \omega + 2\varphi'. \quad (8)$$

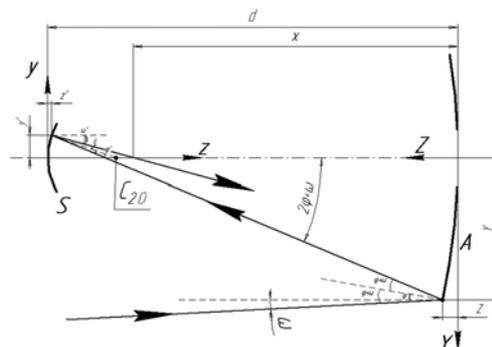


Рис. 4. Наклонный пучок  $\omega > 0$  в ЗДС ( $Y < 0$ ).

Задав матрицу значений  $y'$ , которым соответствуют значения  $\varphi'$ , для выбранного угла наклона входящего луча  $\omega$  автор определил углы наклона выходящих из зеркальной системы пучков лучей  $\omega'$ . В таблице представлен расчет наклонного пучка лучей в ЗДС.

Из данных таблицы сделан вывод: однозначно по ОВУС в ЗДС нельзя судить о  $\Delta\omega'$ .

ЛЧ представляет собой трехлинзовый компонент с отверстием в центральной части для прохождения лучей от главного зеркала к вторичному. Так как ЗДС, расположенная перед ЛЧ, абсолютно свободна от aberrаций осевого пучка, но aberrации наклонных пучков не устранимы, то для получения наилучшего качества во всей системе телескопа необходимо иметь ЛЧ также свободную от aberrаций осевого пучка, но имеющую противоположные по знаку aberrации наклонных. Поэтому для обоих вариантов ЗДС были получены ЛЧ с определенными параметрами, которые рассчитаны для работы на пяти длинах волн:

$$\lambda_e = 546.07, \lambda_{F'} = 480.00, \lambda_{C'} = 643.08,$$

$$\lambda_F = 486.13, \lambda_C = 656.28 \text{ нм}$$

$$f'_{\text{олч}} = 1824 \text{ мм}, k = 1:12, 2\omega = 4^\circ,$$

$$D_{\text{Эйри}} = 14.8 \text{ мкм}, 2\Delta y'_{\text{мер}} = 729 \text{ мкм},$$

$$\Delta y' = 596 \text{ мкм}.$$

$$f'_{\text{олч}} = 1030 \text{ мм}, k = 1:11.9, 2\omega = 6.5^\circ,$$

$$D_{\text{Эйри}} = 15.9 \text{ мкм}, 2\Delta y'_{\text{мер}} = 121 \text{ мкм},$$

$$\Delta y' = 4.5 \text{ мкм}.$$

Здесь  $f'_{\text{олч}}$  – параксиальное фокусное расстояние ЛЧ,  $k$  – диафрагменное число,  $2\omega$  – угловое поле,  $D_{\text{Эйри}}$  – диаметр кружка Эйри,  $2\Delta y'_{\text{мер}}$  – размер пятна рассеяния широкого наклонного пучка  $\omega$  в меридиональном сечении на основной длине волны  $\lambda_e = 546.07 \text{ нм}$ ,  $\Delta y'$  – меридиональная кома для наклона  $\omega$  на  $\lambda_e$ .

Расчет положения ЛЧ произведен в системе координат малого зеркала (рис. 5). Чтобы все лучи от главного зеркала проходили к вторичному через отверстие в ЛЧ, нужно совместить середину ЛЧ по оси  $z$  с точкой пересечения луча, отраженного от главного зеркала на краю, с оптической осью. По положению ЛЧ и радиусу кривизны ее первой поверхности, определены координаты встречи наклонных лучей с первой поверхностью ЛЧ. Затем проведен расчет лучей в ЛЧ с использованием известных оптических программ.

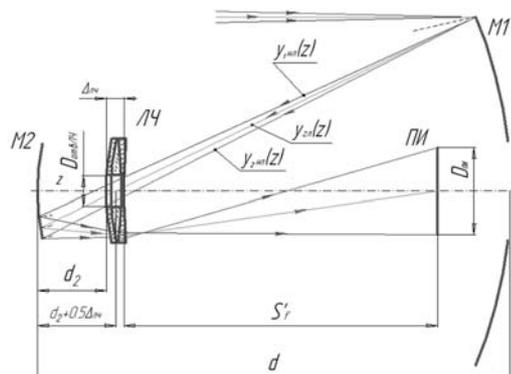


Рис. 5. Определение положения линзовой части.

Параметры схем полученных ЗЛТ следующие:

$$f'_{\text{отел}} = 7298 \text{ мм}, k = 1:12, 2\omega = 1^\circ,$$

$$2\Delta y'_{\text{мер}} = 125 \text{ мкм}, \Delta y' = 43 \text{ мкм},$$

$$f'_{\text{отел}} = 7210 \text{ мм}, k = 1:12, 2\omega = 1^\circ,$$

$$2\Delta y'_{\text{мер}} = 51 \text{ мкм}, \Delta y' = 3.2 \text{ мкм}.$$

Таким образом, aberrационные параметры полученных телескопов меньше, чем aberrации их составляющих частей по отдельности (ЗДС и ЛЧ), что и необходимо получить.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пуряев Д.Т. Афокальная двухзеркальная система // Optical engineering. 1993. Т. 32, № 6. С. 1325–1327.
2. Ермаков И.В. Исследование афокальной двухзеркальной системы // Материалы VI Международной конференции «Прикладная оптика – 2004». С. Пб., 2004. Т. 3. С. 172.

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, Москва