

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 520.2, 535.317.1, 535.318

СВЕТОСИЛЬНЫЕ ТРЕХЗЕРКАЛЬНЫЕ ОБЪЕКТИВЫ БЕЗ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ С ВЫПУКЛЫМ ВТОРЫМ И ВОГНУТЫМ ТРЕТЬИМ ЗЕРКАЛАМИ

© 2014 г. Г. И. Цуканова, канд. техн. наук; К. Д. Бутылкина, студент

НИУ ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: butylkinax@gmail.com, ZukanovaGI@aco.ifmo.ru

В работе рассматривается габаритный и абберационный расчет трехзеркальных объективов без промежуточного изображения с выпуклым вторым и вогнутым третьим зеркалами. Выполняется исследование систем, приводится пример расчета одного из объективов.

Ключевые слова: зеркальные системы, трехзеркальные объективы, абберации, качество изображения.

Коды OCIS: 220.1000, 350.1260, 350.6090.

Поступила в редакцию: 27.05.2013.

Для решения многих астрономических задач, в том числе для глубокого обзора неба, требуются светосильные крупногабаритные зеркальные системы с угловым полем не менее 3° . Поскольку системы крупногабаритные, то решение может быть найдено в области зеркальных систем или зеркально-линзовых систем с компенсатором в сходящемся пучке лучей. Чисто зеркальные объективы, безусловно, обладают преимуществом перед зеркально-линзовыми системами, так как могут работать в широком спектральном диапазоне от ультрафиолетовой области до инфракрасной.

Среди зеркальных систем задачу могут решить зеркальная система Шмидта или многозеркальные плананастигматы. Зеркальная система Шмидта имеет осевую длину не менее фокусного расстояния (даже с учетом введения дополнительного плоского зеркала). Остается неисправленной кривизна изображения. Что касается многозеркальных систем, то наиболее простыми из них являются трехзеркальные. Классификация трехзеркальных систем приведена в работах [1, 2]. В соответствии с классификацией и исследованием трехзеркальных систем без промежуточного изображения [2–7] наиболее

перспективными для создания светосильных и широкоугольных крупногабаритных телескопов являются трехзеркальные системы с выпуклым вторым и вогнутым третьим зеркалами. Эти системы различаются по взаимному расположению зеркал:

- третье зеркало расположено между первым и вторым зеркалами, это системы типа систем Пихта [3] (рис. 1),
- третье зеркало вблизи первого (рис. 2),
- третье зеркало вне пространства между первым и вторым зеркалами [3] (рис. 3); системы этого типа с параллельным ходом лучей между вторым и третьим зеркалами исследованы проф. А. П. Грамматиним

Система с третьим зеркалом вне пространства между первым и вторым зеркалами используется в проекте LSST [8]. Характеристики зеркального телескопа: диаметр главного зеркала 8,4 м, эффективный диаметр входного зрачка 6,5 м, длина порядка 10 м, угловое поле 3° и относительное отверстие 1:1,25. Все зеркальные поверхности телескопа высшего порядка; вблизи плоскости изображения имеется трехлинзовый компенсатор, у которого также все поверхности асферики высшего порядка.

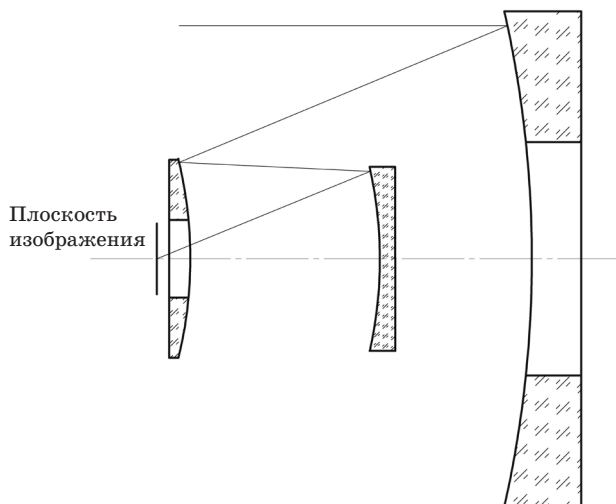


Рис. 1. Оптическая схема трехзеркальной системы без промежуточного изображения с третьим зеркалом между первым и вторым зеркалами.

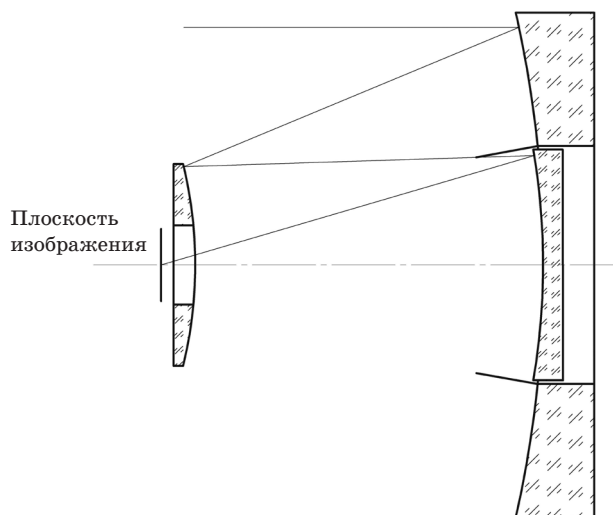


Рис. 2. Оптическая схема трехзеркальной системы без промежуточного изображения с третьим зеркалом внутри первого зеркала.

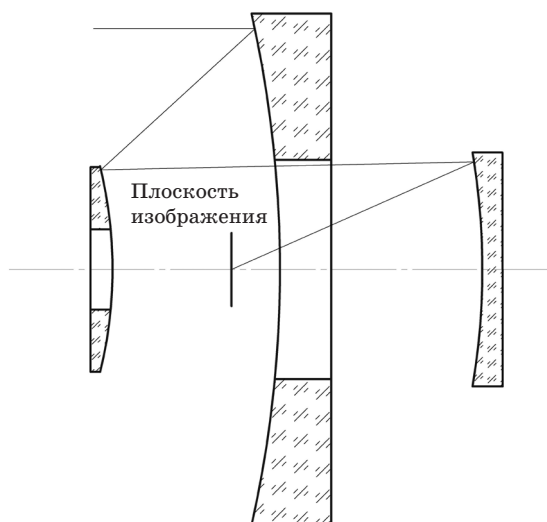


Рис. 3. Оптическая схема трехзеркальной системы без промежуточного изображения с третьим зеркалом вне пространства между первым и вторым зеркалами.

Телескоп имеет большой коэффициент экранирования, который ещё увеличится из-за необходимости защиты плоскости изображения от постороннего света.

В рассмотренной ранее трехзеркальной системе [6] для организации защиты от постороннего света определяется оптимальное положение апертурной диафрагмы и в отверстие главного зеркала устанавливается внутренняя бленда. Внешние бленды есть также у второго и первого зеркал.

В данной работе для широкого круга систем без промежуточного изображения с выпуклым вторым и вогнутым третьим зеркалами (рис. 1–3), которые могут быть практически реализованы, выполнен габаритный и абберационный расчет в области аббераций третьего порядка с коррекцией сферической абберации, комы, астигматизма и кривизны изображения.

При расчете зеркальных систем радиусы кривизны поверхностей зеркал и расстояния между ними используются для устранения кривизны изображения, получения приемлемых значений расстояний между зеркалами, а также удобного положения плоскости изображения и допустимого экранирования.

В работе на стадии габаритного расчета задаются значения следующих параметров: α_2 (связано с относительным отверстием главного зеркала), h_2 (определяет экранирование системы) и α_3 . Значение h_3 определяется из условия устранения кривизны изображения –

$$h_3 = \frac{h_2(\alpha_4 + \alpha_3)}{\alpha_3 - \alpha_2 h_2 + \alpha_2},$$

где h_s – высоты нулевых лучей на главных поверхностях зеркал,

α_s – углы нулевых лучей с оптической осью,

$\alpha_4 = -1,0$,

α_3 – задается в диапазоне $\pm 0,1$; большие отрицательные значения приводят к увеличению экранирования, большие положительные значения – к неудобному положению плоскости изображения.

Полученные значения высот и углов позволяют найти радиусы поверхностей зеркал, расстояния между зеркалами (d_1, d_2) и положение плоскости изображения (δ – расстояние от второго зеркала до плоскости изображения).

Однако устранение кривизны изображения возможно не при любых сочетаниях α_2, α_3 и h_2 . Некоторые варианты оказываются конструктивно неосуществимыми: например, расстояние между вторым и третьим зеркалами получается или очень большим, или отрицательным.

При значении $\alpha_3 = 0$ ($h_2 = h_3$), т.е. при параллельном ходе лучей между вторым и третьим зеркалами, условие устранения кривизны изображения принимает вид $\alpha_2 = -1/(1 - h_2)$, и тогда расстояние между первым и вторым зеркалами определяется выражением

$$d_1 = -\frac{1-h_2}{\alpha_2} = -(1-h_2)^2.$$

В этом случае расстояние между первым и вторым зеркалами зависит только от h_2 . Радиусы кривизны зеркал рассчитываются как

$$\begin{aligned} r_1 &= -2(1-h_2), \\ r_2 &= -2h_2(1-h_2), \\ r_3 &= 2h_2. \end{aligned}$$

Расстояние между вторым и третьим зеркалами d_2 может задаваться из конструктивных соображений исходя из возможности защиты плоскости изображения от постороннего света, отраженного только от третьего зеркала, экранирования, вносимого третьим зеркалом, и удобного положения плоскости изображения.

Для исправления аберраций третьего порядка (сферической аберрации, комы, астигматизма) в рассматриваемых системах не остаются иных параметров, кроме эксцентриситетов зеркал e^2 . При определенном сочетании h_2, α_2, α_3 могут получиться системы со сферическими вторым или третьими зеркалами. С точки зрения защиты от постороннего света, более приемлемыми являются системы со сферическим третьим зеркалом.

Для определения квадратов эксцентриситета зеркал получены следующие формулы:

$$e_1^2 = 1 - \frac{2S_2 + 2S_3 - 8a}{S_2 S_3 \alpha_2^3}, \quad (1)$$

$$e_2^2 = \frac{(\alpha_3 - \alpha_2)^2}{(\alpha_3 + \alpha_2)^2} - \frac{2S_3 - 8a}{h_2 S_2 (S_3 - S_2) (\alpha_3 + \alpha_2)^3}, \quad (2)$$

$$e_3^2 = \frac{(\alpha_4 - \alpha_3)^2}{(\alpha_4 + \alpha_3)^2} - \frac{2S_2 - 8a}{h_3 S_3 (S_3 - S_2) (\alpha_4 + \alpha_3)^3}, \quad (3)$$

где

$$a = \frac{1}{2} [S_2 (\alpha_3^2 - \alpha_2^2) + S_3 (\alpha_4^2 - \alpha_3^2)],$$

$$S_2 = \frac{-d_1}{h_2},$$

$$S_3 = \frac{d_2}{h_2 h_3}.$$

С помощью полученных формул рассчитан ряд исходных систем для последующей автоматизированной коррекции (табл. 1). Системы с параллельным ходом лучей между вторым и третьим зеркалами приведены в табл. 2. Рассчитанные системы могут быть исходными для расчета неэкранированных систем [9].

Из таблиц видно, что среди систем, представляющих практический интерес, есть системы со сферическим вторым или третьим зеркалами. Например, среди систем с параллельным ходом лучей между вторым и третьим зеркалами при значениях $h_2 = 0,2, d_1 = -0,64, d_2 = 0,73$ второе зеркало становится сферическим. Если увеличивается h_2 , то увеличивается и значение d_2 , при котором второе зеркало становится сферическим, и система может получиться очень длинной.

Систем со сферическим третьим зеркалом при приемлемых габаритах гораздо больше, чем систем со сферическим вторым зеркалом. Например, среди систем с параллельным ходом лучей между вторым и третьим зеркалами при значениях $h_2 = 0,3-0,4$ имеется по два значения d_2 , при которых третье зеркало сферическое.

В табл. 1 и 2 для рассчитанных систем определены значения коэффициентов экранирования по диаметру ϵ . В трехзеркальных системах без промежуточного изображения экранирование могут вызывать следующие элементы:

- второе зеркало;
- третье зеркало, если оно расположено между первым и вторым (рис. 1), так как лучи, отраженные от первого зеркала, могут экранироваться третьим зеркалом;
- отверстие в главном зеркале, если между вторым и третьим зеркалами расходящийся пучок лучей. С учетом этих факторов для всех систем определены коэффициенты экранирования по диаметру ϵ .

Фактические значения коэффициентов экранирования по диаметру будут больше указанных

Таблица 1. Примеры рассчитанных систем без промежуточного изображения с выпуклым вторым и вогнутым третьим зеркалами.

№	α_2	α_3	h_2	h_3	d_1	d_2	r_1	r_2	r_3	e_1^2	e_2^2	e_3^2	δ	ε
1	-1,2	-0,02	0,2	0,2082	-0,667	0,408	-1,667	-0,328	-0,408	0,994818	0,340738	-0,01415	0,2	0,29
2	-1,2	-0,0191	0,2	0,2082	-0,667	0,428	-1,667	-0,328	-0,409	0,98297	0,293596	-0,00034	0,22	0,28
3	-1,2	-0,01	0,2	0,2082	-0,667	0,825	-1,667	-0,331	-0,412	0,846945	-0,18996	0,282552	0,62	0,21
4	-1,2	-0,05	0,25	0,2763	-0,625	0,526	-1,667	-0,4	-0,526	0,982571	0,22688	-0,03295	0,25	0,28
5	-1,2	-0,0455	0,25	0,2764	-0,625	0,581	-1,667	-0,401	-0,529	0,950184	0,135593	-0,00041	0,3	0,26
6	-1,2	-0,03	0,25	0,2769	-0,625	0,896	-1,667	-0,407	-0,538	0,828493	-0,18736	0,187067	0,62	0,27
7	-1,2	-0,09	0,35	0,4385	-0,542	0,983	-1,667	-0,543	-0,805	0,826408	-0,17071	0,019757	0,54	0,4
8	-1,2	-0,094	0,35	0,4381	-0,542	0,937	-1,667	-0,541	-0,801	0,848942	-0,13229	0,000202	0,5	0,4
9	-1,2	-0,095	0,35	0,438	-0,542	0,926	-1,667	-0,541	-0,8	0,854539	-0,12274	-0,00444	0,49	0,4
10	-1,5	0,05	0,2	0,1652	-0,533	0,696	-1,333	-0,276	-0,348	0,916174	0,464103	0,297972	0,53	0,2
11	-1,5	0,1	0,2	0,1636	-0,533	0,364	-1,333	-0,286	-0,364	1,017921	1,114796	0,106598	0,2	0,27
12	-1,5	0,065	0,25	0,2205	-0,5	0,454	-1,333	-0,348	-0,472	1,024407	0,998934	0,059836	0,23	0,27
13	-1,5	0,09	0,25	0,2198	-0,5	0,335	-1,333	-0,355	-0,483	1,109448	1,50392	0,187517	0,12	0,33
14	-1,5	-0,01	0,35	0,3589	-0,433	0,888	-1,333	-0,464	-0,711	0,913647	0,45481	0,057977	0,53	0,35
15	-1,5	-0,02	0,35	0,3588	-0,433	0,44	-1,333	-0,461	-0,704	1,209331	1,261378	0,079035	0,08	0,36
16	-1,5	-0,1	0,4	0,44	-0,4	0,4	-1,333	-0,5	-0,8	1,411523	1,449219	0,210285	-0,04	0,4
17	-1,5	-0,079	0,4	0,4409	-0,4	0,517	-1,333	-0,507	-0,817	1,241648	1,071335	-0,00064	0,08	0,43
18	-1,5	-0,07	0,4	0,4412	-0,4	0,589	-1,333	-0,51	-0,825	1,163241	0,905062	-0,04773	0,15	0,42
19	-1,5	-0,09	0,45	0,5361	-0,367	0,956	-1,333	-0,566	-0,984	0,964493	0,427621	-0,06522	0,42	0,48
20	-1,8	0,09	0,2	0,1348	-0,444	0,724	-1,111	-0,234	-0,296	0,936185	0,744218	0,398799	0,59	0,2
21	-1,8	0,07	0,35	0,2959	-0,361	0,773	-1,111	-0,405	-0,636	0,972517	0,919805	0,104398	0,48	0,35
22	-1,8	0,0801	0,35	0,2954	-0,361	0,682	-1,111	-0,407	-0,642	1,00778	1,054045	0,090104	0,39	0,35
23	-1,8	0,06	0,4	0,3686	-0,333	0,523	-1,111	-0,46	-0,784	1,176605	1,478677	0,220066	0,15	0,4
24	-1,8	0,07	0,4	0,3683	-0,333	0,453	-1,111	-0,462	-0,792	1,248451	1,743459	0,452984	0,08	0,4
25	-1,8	-0,01	0,45	0,4545	-0,306	0,45	-1,111	-0,497	-0,9	1,385944	1,741202	0,502998	0	0,45

Таблица 2. Примеры рассчитанных систем без промежуточного изображения с выпуклым вторым и вогнутым третьим зеркалами с параллельным ходом лучей между вторым и третьим зеркалами.

№	α_2	α_3	h_2	h_3	d_1	d_2	r_1	r_2	r_3	e_1^2	e_2^2	e_3^2	δ	ε
1	-1,25	0	0,2	0,2	-0,64	0,4	-1,6	-0,32	-0,4	1	0,488	2,2E-16	0,2	0,29
2	-1,25	0	0,2	0,2	-0,64	0,5	-1,6	-0,32	-0,4	0,94904	0,2704	0,07261	0,3	0,24
3	-1,25	0	0,2	0,2	-0,64	0,6	-1,6	-0,32	-0,4	0,91209	0,12533	0,15018	0,4	0,21
4	-1,25	0	0,2	0,2	-0,64	0,7	-1,6	-0,32	-0,4	0,88406	0,02171	0,22153	0,5	0,2
5	-1,3333	0	0,25	0,25	-0,5625	0,4	-1,5	-0,375	-0,5	1,06936	0,84766	-0,01879	0,15	0,32
6	-1,3333	0	0,25	0,25	-0,5625	0,5	-1,5	-0,375	-0,5	1	0,57813	0	0,25	0,27
7	-1,3333	0	0,25	0,25	-0,5625	0,6	-1,5	-0,375	-0,5	0,94937	0,39844	0,05415	0,35	0,25
8	-1,3333	0	0,25	0,25	-0,5625	0,7	-1,5	-0,375	-0,5	0,91078	0,27009	0,11577	0,45	0,25
9	-1,4286	0	0,3	0,3	-0,49	0,4	-1,4	-0,42	-0,6	1,15356	1,1855	0,04845	0,1	0,35
10	-1,4286	0	0,3	0,3	-0,49	0,5	-1,4	-0,42	-0,6	1,06491	0,8684	-0,01453	0,2	0,3
11	-1,4286	0	0,3	0,3	-0,49	0,6	-1,4	-0,42	-0,6	1	0,657	0	0,3	0,3
12	-1,4286	0	0,3	0,3	-0,49	0,7	-1,4	-0,42	-0,6	0,95041	0,506	0,04166	0,4	0,3
13	-1,5385	0	0,35	0,35	-0,4225	0,4	-1,3	-0,455	-0,7	1,24914	1,49441	0,20825	0,05	0,36
14	-1,5385	0	0,35	0,35	-0,4225	0,5	-1,3	-0,455	-0,7	1,14046	1,13553	0,03218	0,15	0,35
15	-1,5385	0	0,35	0,35	-0,4225	0,6	-1,3	-0,455	-0,7	1,06084	0,89627	-0,01067	0,25	0,35
16	-1,5385	0	0,35	0,35	-0,4225	0,7	-1,3	-0,455	-0,7	1	0,72538	-2,2E-16	0,35	0,35
17	-1,6667	0	0,4	0,4	-0,36	0,4	-1,2	-0,48	-0,8	1,35294	1,768	0,47059	0	0,4
18	-1,6667	0	0,4	0,4	-0,36	0,5	-1,2	-0,48	-0,8	1,2236	1,3744	0,14534	0,1	0,4
19	-1,6667	0	0,4	0,4	-0,36	0,6	-1,2	-0,48	-0,8	1,12903	1,112	0,02509	0,2	0,4
20	-1,6667	0	0,4	0,4	-0,36	0,7	-1,2	-0,48	-0,8	1,05687	0,92457	-0,00745	0,3	0,4
21	-1,8182	0	0,45	0,45	-0,3025	0,4	-1,1	-0,495	-0,9	1,46165	2,00066	0,84839	-0,05	0,45
22	-1,8182	0	0,45	0,45	-0,3025	0,5	-1,1	-0,495	-0,9	1,31126	1,58053	0,33185	0,05	0,45
23	-1,8182	0	0,45	0,45	-0,3025	0,6	-1,1	-0,495	-0,9	1,20173	1,30044	0,11131	0,15	0,45
24	-1,8182	0	0,45	0,45	-0,3025	0,7	-1,1	-0,495	-0,9	1,1184	1,10038	0,02183	0,25	0,45

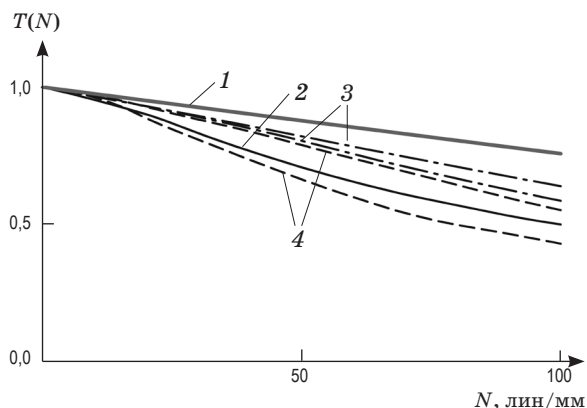


Рис. 4. Частотно-контрастные характеристики. 1 – дифракционная, 2 – $\omega = 0^\circ$, 3 – $\omega = 1,06^\circ$, 4 – $\omega = 1,5^\circ$.

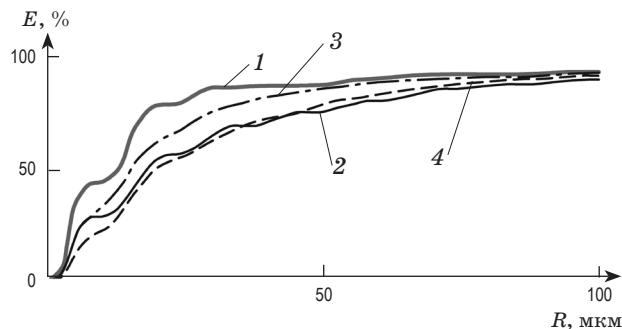


Рис. 5. Функции концентрации энергии. 1 – дифракционная, 2 – $\omega = 0^\circ$, 3 – $\omega = 1,06^\circ$, 4 – $\omega = 1,5^\circ$.

в таблицах. Они будут зависеть от относительных отверстий систем и угловых полей, так как экранирование могут вызывать, кроме указанных выше элементов, также отверстия для вывода изображения во втором зеркале, приёмники изображения, если они расположены между зеркалами, или наклонные плоские зеркала для вывода изображения вбок. Защита плоскости изображения от постороннего света также внесёт дополнительное экранирование.

Для системы № 16 (табл. 1) выполнена оптимизация при фокусном расстоянии 1200 мм, относительном отверстии 1 : 1,7 и угловом поле

$2\omega = 3^\circ$. В данной системе первая поверхность высшего порядка, близкая к гиперболической, вторая – гиперболическая, третья – эллиптическая.

На рис. 4 и 5 приведены частотно-контрастные характеристики и функции концентрации энергии для рассчитанной системы.

Проведенное исследование показало, что системы без промежуточного изображения с выпуклым вторым и вогнутым третьим зеркалами позволяют получить в длиннофокусных системах с высокими относительными отверстиями (более 1 : 2) и угловыми полями порядка 3–4 градусов высокое качество изображения.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Цуканова Г.И. Классификация трехзеркальных объективов // 31 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium. Technische Hochschule Ilmenau. 1986. Н. 3. С. 225.
2. Михельсон Н.Н. Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета // М.: Физматлит, 1985. 333 с.
3. Чуриловский В.Н. Теория хроматизма и aberrаций третьего порядка // Л.: Машиностроение, 1968. 312 с.
4. Цуканова Г.И. Исследование экранирования, виньетирования и aberrаций высших порядков в трехзеркальных плананастигматах // Оптико-механическая промышленность. 1991. № 3. С. 37–40.
5. Цуканова Г.И. Конструктивные особенности трехзеркальных плананастигматов без промежуточного изображения // Оптико-механическая промышленность. 1991. № 6. С. 33–35.
6. Тихомирова Г.И. Трехзеркальные астрономические объективы // Известия вузов. Приборостроение. 1967. № 12. С. 70–75.
7. Грамматин А.П. Трехзеркальный астрономический объектив // Оптический журнал. 1997. № 3. С. 45–47.
8. Тербиж В.Ю. Современные оптические телескопы // М.: Физматлит, 2005. 80 с.
9. Грамматин А.П., Сычева А.А. Трехзеркальный объектив телескопа без экранирования // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 1. С. 24–27.