

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-407-414

УДК 535.317

Афокальные системы, составленные из зеркальных внеосевых параболоидов

Докт. техн. наук, доц. Н. К. Артюхина¹⁾, Л. Пероса^{1,2)}, Л. Самбрано^{1,3)}¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),²⁾Университет Якамбу (Баркисимето, Венесуэла),³⁾Андский университет (Мерида, Венесуэла)© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Зеркальные системы позволяют сократить габариты, уменьшить массу прибора при сохранении высокой входной апертуры и обладают рядом других преимуществ. Существенный их недостаток – центральное экранирование входного зрачка – приводит к снижению качества изображения. Проведено исследование афокальных систем, составленных из эксцентрично вырезанных зеркальных параболоидов (внеосевых зеркал), в которых апертурная диафрагма смещена в меридиональной плоскости на определенную величину, а центральная точка поля находится на оптической оси. Базовыми схемами (модулями) для данных композиций приняты канонические системы Мерсенна. Рассмотрены два типа таких систем: видимые увеличения $\Gamma > 0$ и $\Gamma < 0$. Составлены алгоритмы расчета децентрированных афокальных систем с двумя и четырьмя отражениями, которые свободны от сферической аберрации, комы, астигматизма при расположении входного зрачка в совмещенных фокальных плоскостях всех параболических зеркал. В квартпараболической схеме из трех зеркал, являющейся сочетанием двух классических телескопических систем Мерсенна, исправлена дополнительно аберрация кривизны изображения. Представлены схемы и результаты расчета. Рассмотрены двухзеркальные схемы с неэкранированным входным зрачком, в которых вся система остается центрированной, а апертурная диафрагма децентрирована на расстояние C_m , соизмеримое с размером диафрагмы. Исследованы афокальные схемы с четырьмя отражениями из внеосевых зеркальных параболоидов и составлен алгоритм расчета, получены формулы связи для сочетания канонических афокальных систем из двух зеркал. Проведено компьютерное моделирование в программных средах Opal и Zemax, составлено основное (базовое) описание двумя альтернативными способами для класса децентрированных систем, получены аберрационные характеристики и схемные решения для телескопических систем без экранирования с двумя и четырьмя отражениями. В целях практического применения в качестве насадок к регистрирующим объективам интерес представляют двухзеркальные афокальные системы небольших кратностей.

Ключевые слова: оптическая техника, зеркальные системы, афокальная схема, коррекция аберрации, качество изображения

Для цитирования: Артюхина, Н. К. Афокальные системы, составленные из зеркальных внеосевых параболоидов / Н. К. Артюхина, Л. Пероса, Л. Самбрано // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 407–414. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-407-414

Afocal Systems Formed by Mirror Off-Axis Paraboloid

N. K. Artiukhina¹⁾, L. Perosa^{1,2)}, L. Zambrano^{1,3)}¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),²⁾Universidad Yacambu (Barquisimeto, Venezuela),³⁾Universidad de Los Andes (Merida, Venezuela)

Abstract. Mirror systems make it possible to reduce device dimensions and its weight while preserving high input aperture and these systems are characterized by a number of other advantages. Their significant disadvantage is a central screening

Адрес для переписки

Артюхина Нина Константиновна
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-62-86
lnt@bntu.by

Address for correspondence

Artiukhina Nina K.
Belarusian National Technical University
22 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-62-86
lnt@bntu.by

of an entrance pupil that leads to lower image quality. The paper contains description of the investigations on afocal systems formed by eccentrically cut-out mirror paraboloids (off-axis mirrors) where aperture diaphragm is displaced in the meridian plane for a defined value and a central field point is located on the optical axis. The canonic Mersenne systems are accepted as base schemas (modules) for these compositions. The paper considers two types of such systems: visible increases – $\Gamma > 0$ and $\Gamma < 0$. Algorithms for calculation of centered afocal systems with two and four reflections have been written in the paper and the systems are free from spherical aberration, coma, astigmatism when an input pupil is located in superimposed focal planes of all parabolic mirrors. An aberration in curvature image has been additionally corrected in three-mirror quart-parabolic scheme which is a combination of two classical telescopic Mersenne systems. The paper presents schemes and calculation results. Two-mirror schemes with non-screened input pupil have been studied in the paper and in this case all the system remains centered and an aperture diaphragm is decentered for the distance C_m which is commensurable with the diaphragm size. The paper contains description of the investigated afocal schemes with four reflections from off-axis mirror paraboloids, a prepared algorithm for calculation, the obtained formulas for making combination of canonic afocal systems formed by two mirrors. Computer simulation in software environment Opal and Zemax has been carried out in the paper. Basic description has been prepared while using two alternative methods for the class of decentered systems and aberration characteristics and schematic solutions for telescopic systems without screening with two and four reflections have been obtained in the paper. Two-mirror afocal systems with low-powered magnification are of some interest for practical application as accessories for registering object lenses.

Keywords: optical equipment, mirror systems, afocal scheme, aberration correction, image quality

For citation: Artiukhina N. K., Perosa L., Zambrano L. (2017) Afocal Systems Formed by Mirror Off-Axis Paraboloid. *Science and Technique*. 16 (5), 407–414. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-407-414 (in Russian)

Введение

Развитие новых оптико-электронных приборов, решающих разнообразные научно-технические задачи, налагает определенные требования на выбор схемных решений оптики. В настоящее время на передовые позиции выходит зеркальная оптика, так как возросли требования к расширению спектрального диапазона и снижению весовых характеристик оптических систем.

Телескопические системы, называемые также афокальными, применяются не только совместно с глазом наблюдателя. Они являются оптическими системами афокальных насадок к фотокинообъективам, тепlopеленгаторам, оптическим устройствам лазеров. В геодезических приборах для систем фоторегистрации удаленных объектов часто успешно применяют зеркально-линзовые афокальные насадки [1].

Все классические зеркальные системы позволяют сократить габариты, уменьшить массу прибора при сохранении высокой входной апертуры, а также обладают рядом других преимуществ. Однако они имеют существенный недостаток – центральное экранирование входного зрачка, что приводит к снижению качества изображения [2]. Экранирование является результатом расположения оптических элементов. Все центры оптических поверхностей и поле изображения лежат на оптической оси системы, что приводит к уменьшению количества света в плоскости изображения, изменению

распределения энергии в дифракционном пятне и увеличению рассеяния света, вызываемого дифракцией и сопровождаемого уменьшением контраста изображения [3, 4].

Используя децентрировку входного зрачка, поля или центров вращения зеркальных поверхностей системы, можно значительно уменьшить центральное экранирование или совсем его исключить. Но тогда возникают неэлементарные aberrации четных порядков, требующие разработки приемов их устранения [5, 6].

В последние десятилетия начали разрабатываться зеркальные системы без центрального экранирования с высокими оптическими характеристиками и хорошим качеством изображения, но с центрированными компонентами. В таких системах используются прием децентрировки входного зрачка (ДВЗ) и работа внеосевым полем, следствием чего является применение внеосевых частей зеркал [7]. Таким образом, особый интерес представляют расчет зеркальных систем Мерсенна и поиск путей устранения экранирования входного зрачка.

В настоящей работе проводится исследование афокальных насадок, основанных на канонической системе Мерсенна, с неэкранированным входным зрачком. Использование систем из двух конфокальных параболических зеркал в астрономических зеркальных объективах рассматривалось в [8]. Композиции можно эффективно применять как в качестве самостоятельных децентрированных систем, так и в составе сложных (спектральных приборов [9], адаптив-

ной оптики, панорамных систем, зеркальных систем для трансформирования лазерных пучков и т. д.). Возможна компоновка телескопической системы из трех конфокальных параболических зеркал (галилеевского и кеплеровского типов) [10]: она решает задачу устранения сферической aberrации, комы, астигматизма и кривизны изображения. Такие схемы можно назвать квартпараболическими [11].

Цель работы – дальнейшее исследование систем Мерсенна, создание афокальных систем без центрального экранирования из эксцентрично вырезанных зеркальных параболоидов, в которых апертурная диафрагма смещена в меридиональной плоскости, но центральная точка поля находится на оптической оси.

Описание базовых модулей и параметрический алгоритм расчета

Двухзеркальные системы Мерсенна представлены на рис. 1а, б.

Составим параметрический алгоритм расчета. При расчете в области aberrаций 3-го порядка воспользуемся обозначениями углов и высот нулевого луча, а также показателей преломления и осевых расстояний с учетом правила знаков.

1. Определим условия нормировки, задав углы и высоты нулевого луча:

$$\begin{aligned} f'_1 = -1; h_1 = 1; \alpha_2 = -1; \alpha_1 = \alpha_3 = 0; n_1 = 1; \\ n_2 = -1; n_3 = 1. \end{aligned} \quad (1)$$

2. Введем параметрическое условие для видимого увеличения системы

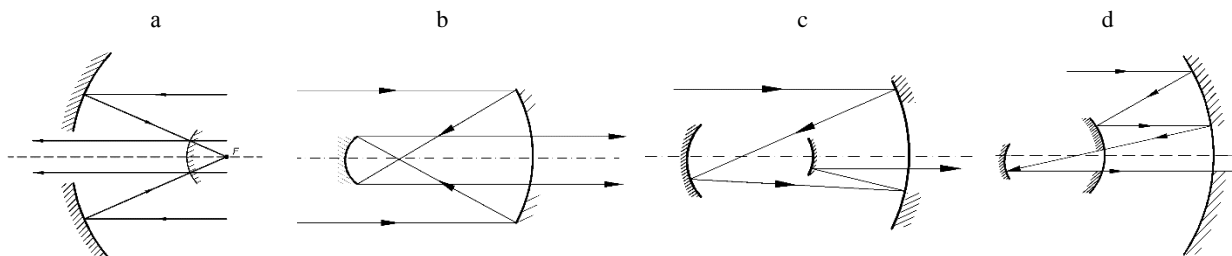


Рис 1. Системы Мерсенна: а, б – двухзеркальная система галилеевского (I тип: $\Gamma > 0$) и кеплеровского (II тип: $\Gamma < 0$) типов; с, d – квартпараболическая система кеплеровского (II тип) и галилеевского (I тип) типов

Fig 1. Merzenne systems: а, б – two-mirror system of Galilean (I type: $\Gamma > 0$) and Kepler (II type: $\Gamma < 0$) types; с, d – quart-parabolic system of Kepler (II type) and Galilean (I type) type

$$\Gamma = \frac{h_1}{h_2} = \frac{f'_1}{f'_2},$$

где $h_2 = 1 - \alpha_2 d_1$ – приведенная высота нулевого луча на втором зеркале.

3. Конструктивное условие афокальности системы запишем в виде

$$d = f'_1 - f'_2.$$

4. Получим следующую сводку формул для расчета конструктивных данных для двухзеркальной канонической системы Мерсенна:

$$\begin{aligned} r_1 = -2, 0; \\ r_2 = -\frac{2}{\Gamma}; \quad d = \frac{1 - \Gamma}{\Gamma}. \end{aligned} \quad (2)$$

5. Вводим учет коэффициента центрального экранирования, который определяется лучом, проходящим по краю второго зеркала на высоте h_2 : $\varepsilon = h_2/h_1$. Для принятых условий нормировки порядка 20 %.

6. Проводим коррекцию в области aberrаций 3-го порядка [12] (параметрами при этом являются деформации зеркал, связанные со значением квадрата эксцентриситета поверхностей равенством $\sigma = -e^2$). Для параболической формы зеркал

$$\sigma_1 = \sigma_2 = -1. \quad (3)$$

Каноническая система Мерсенна свободна от сферической aberrации, комы и астигматизма в области Зейделя, однако кривизна изображения принципиально не устранима. Задачу устранения четырех основных монохроматических aberrаций можно решить сочетанием двух классических телескопических систем Мерсенна, имеющих увеличения Γ_1 и Γ_2 .

Расчет квартпараболической системы [5] проводят по составленному алгоритму с учетом формулы связи для видимого увеличения всей системы

$$\Gamma = \Gamma_1 \Gamma_2, \quad (4)$$

где $\Gamma_1 = \frac{h_1}{h_2}$; $\Gamma_2 = \frac{h_3}{h_4}$.

Кривизна поля устраняется при соблюдении условия Петцваля (условие равенства суммы оптических сил всех составляющих зеркал нулю)

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 = 0,$$

которое приводится к виду

$$\Gamma_1^2 - 2\Gamma_1 + \Gamma = 0. \quad (5)$$

Из этого условия видно, что кривизну Петцваля принципиально можно устранить подбором увеличений, т. е. в такой квартпараболической системе зеркал возможны два конструктивных решения (рис. 1с, d).

Двухзеркальные схемы с неэкранированным входным зрачком

Одним из недостатков рассмотренных выше афокальных систем является экранирование центральной части входного зрачка. Телескопические системы без экранирования можно создать на основе эксцентрично вырезанных параболоидов, в которых апертурная диафрагма смещена в меридиональной плоскости, а центральная точка поля находится на оптической оси. В этом случае афокальные системы имеют неэкранированный входной зрачок при $C_m \geq \rho$, где C_m – децентрировка апертурной диафрагмы в меридиональной плоскости; ρ – радиус входного зрачка. Вся система при этом остается центрированной, а диафрагма децентрирована на расстояние, соизмеримое с размером диафрагмы.

Для двухзеркальной системы, составленной из внеосевых параболических зеркал, аналогично (2) получена сводка формул:

$$h_1 = 1; \quad r_1 = -4N; \quad d = 2N \frac{1-\Gamma}{\Gamma};$$

$$h_2 = \frac{1}{\Gamma}; \quad r_2 = -\frac{4N}{\Gamma}. \quad (6)$$

Исходные данные перед началом габаритного расчета – это высота h_1 главного зеркала и величина его относительного отверстия $1:N$, а также значение видимого увеличения Γ телескопической системы. У внеосевого параболоида рассматриваемого типа лишь центральная точка поля является безабберационной (сферическая абберация, кома и астигматизм здесь равны нулю), как это следует из формул [12].

Известно, что двухзеркальные системы, в которых апертурная диафрагма децентрирована по одной или двум координатам, обладают в окрестности анастигматической точки свойствами обычной, слегка децентрированной системы, т. е. имеют кому в центре поля, такую же кому, постоянную по всему полю, и линейный астигматизм с характерной ориентацией фокальных линий формул [11]. Этот вывод остается справедливым и в случае «большой децентрировки», когда координаты центра апертурной диафрагмы соизмеримы или даже превышают размеры самой диафрагмы.

Рассчитан ряд афокальных систем с ДЗ, состоящих из двух зеркал, по формулам (6) для следующих действительных величин: $h_1 = 750$ мм; $N = 0,8$; $C_m = 500$ мм; углового поля зрения $2\omega = 2^\circ$; диаметра входного зрачка $D = 500$ мм. Конструктивные данные рассчитанных систем I и II типов для значений видимого увеличения Γ 3^x , 5^x , 10^x и -3^x , -5^x , -10^x приведены в табл. 1.

Таблица 1

Конструктивные параметры (в мм) двухзеркальной системы при $C_m \neq 0$
Design parameters (in mm) of two-mirror system at $C_m \neq 0$

Показатель	Увеличение Γ					
	I тип			II тип		
	3^x	5^x	10^x	-3^x	-5^x	-10^x
r_1	-2400	-2400	-2400	-2400	-2400	-2400
r_2	-800	-480	-240	800	480	240
d	-800	-960	-1080	-1600	-1440	-1320

Достоинством двухзеркальных систем с неэкранированным входным зрачком является то, что в них довольно малое виньетирование. В системах II типа виньетирования практиче-

Таблица 2

Конструктивные параметры квартпараболической системы (в мм) при $C_m \neq 0$

Design parameters of quart-parabolic system (in mm) at $C_m \neq 0$

Показатель	Увеличение Γ			
	I тип		II тип	
	-8^x	-15^x	-8^x	-15^x
r_1	-2400	-2400	-2400	-2400
r_2	-600	-480	1200	800
r_3	-2400	-2400	-2400	-2400
r_4	1200	800	-600	-480
d_1	-900	-960	-1800	-1600
d_2	900	960	1800	1600
d_3	-1800	-1600	-900	-960

ски можно избежать, увеличив диаметры зеркал по наклонным пучкам. В системах I типа наклонные пучки срезаются «центральным» отверстием в главном зеркале. Виньетирование здесь можно полностью устранить, увеличив величину децентрировки C_m .

Максимально возможное угловое поле зрения можно определить из габаритных соотношений для зеркал. Учитывая, что размер промежуточного изображения в плоскости совмещенных фокусов зеркал o' должен быть меньше высоты на втором зеркале $o' \leq h_2$, имеем соотношение для углового поля зрения такой системы

$$\operatorname{tg} \omega \leq \frac{C_m - \rho}{2N\rho\Gamma}. \quad (7)$$

Афокальные схемы с четырьмя отражениями из внеосевых параболоидов

На основе трехзеркальных систем, составленных из конфокально расположенных параболических зеркал с четырьмя отражениями, можно построить афокальные системы с неэкранированным входным зрачком. Для двойных систем Мерсенна с неэкранированным входным зрачком имеем аналогичную (6) сводку формул:

$$\begin{aligned} h_1 &= 1; \quad r_1 = -4N; \quad d_1 = 2N(h_2 - 1); \\ h_2 &= \frac{1}{\Gamma_1}; \quad r_2 = -4h_2N; \quad d_2 = -d_1; \\ h_3 &= h_2; \quad r_3 = -4N; \quad d_3 = -2N \frac{\Gamma - \Gamma_1}{\Gamma}; \\ h_4 &= \frac{1}{\Gamma}; \quad r_4 = -4 \frac{\Gamma_1 N}{\Gamma}. \end{aligned} \quad (8)$$

Имеем в системе Мерсенна, состоящей из трех конфокально расположенных параболических зеркал, двойное отражение от первого зеркала, т. е. третье зеркало подразумевается совпадающим с первым. С использованием сводки формул (8) произведем расчеты систем для следующих действительных величин: $h_1 = 750$ мм; $N = 0,8$; $C_m = 500$ мм, углового поля зрения $2\omega = 2^\circ$; диаметра входного зрачка $D = 500$ мм. Конструктивные данные рассчитанных систем I и II типов для значений видимого увеличения $\Gamma - 8^x$ и -15^x приведены в табл. 2.

Следует отметить, что квартпараболические системы II типа с неэкранированным входным зрачком сложнее систем I типа. В системах I типа происходит срезание наклонного пучка с углом ω оправой второго зеркала. При выполнении условия $o' \leq h_2'$, где h_2' – высота светового пучка на втором зеркале, определяющая его нижний край, в системах I типа можно избежать виньетирования. При этом величина максимально возможного углового поля зрения определяется из следующего соотношения:

$$\operatorname{tg} \omega \leq \frac{C_m - \rho}{2\Gamma_1\Gamma N\rho}. \quad (9)$$

Отсюда видно, что чем больше величина C_m , тем меньше виньетирование наклонных пучков в системе. В системах II типа виньетирование наклонных пучков обусловлено действием оправ третьего и четвертого зеркал [11]. Исследование зависимостей (7) и (9) приводит к выводу, что при одном и том же угловом поле зрения виньетирование наклонных пучков в двойной системе без экранирования будет значительно больше, чем в двухзеркальных системах Мерсенна с неэкранированным входным зрачком. Следовательно, реальное угловое поле будет меньше расчетного.

Компьютерное моделирование афокальных схем

Проведены компьютерные расчеты в программных средах Zemax и Oral. Для двухзеркальных систем значения остаточных aberrаций, полученные для класса децентрированных систем в ППП Oral, приведены в табл. 3 (АСТ – астигматизм, ДЕФОКУС – дефокусировка, ΔY % – дисторсия). Aberrации малы, но увеличиваются с ростом Γ .

Таблица 3
 Абберрационные характеристики двухзеркальной системы для Γ 3^x , 5^x , 10^x при $C_m = 500$ мм
 Aberration characteristics of two-mirror system for Γ 3^x , 5^x , 10^x at $C_m = 500$ mm

Γ	№	Абберрации			
		поперечные		продольные	
		dx	dy	ДЕФОКУС	АСТ
3^x	0	.00000	.00000	-.00438	.00016
	1	.00000	.01029	-.00432	.00022
	2	.01133	-.00013	-.00438	.00017
	3	.00000	-.01112	-.00445	.00009
	4	-.01133	-.00013	-.00438	.00017
$\Delta Y' \% = -.0276$					
5^x	0	.00000	.00000	-.01753	.00098
	1	.00000	.02337	-.01715	.00134
	2	.03012	-.00031	-.01755	.00107
	3	.00000	-.02555	-.01798	.00054
	4	-.03012	-.00031	-.01755	.00107
$\Delta Y' \% = -.0370$					
10^x	0	.00000	.00000	-.10587	.00976
	1	.00000	.08523	-.10220	.01323
	2	.10439	-.00094	-.10602	.01074
	3	.00000	-.10189	-.11028	.00550
	4	-.10439	-.00094	-.10602	.01074
$\Delta Y' \% = -.0569$					

Результаты компьютерного моделирования двухзеркальной системы без экранирования, выполненные в ППП Zemax, представлены на рис. 2.

При сравнении результатов расчета двухзеркальных систем – канонических с афокальными системами без экранирования – можно сделать вывод, что абберрации децентрировки ничтожно малы. Для расчетного варианта двухзеркальной афокальной системы с децентрированной апертурной диафрагмой при $\Gamma = 5^x$ для углового поля зрения $2\omega = 2^\circ$ максимальный угловой размер пятна рассеяния составляет величину порядка $4'$ в плоскости Гаусса. В системе нет виньетирования за счет увеличения световых диаметров зеркал.

Рассчитаем один из вариантов афокальных квартпараболических систем с неэкранированным входным зрачком для углового поля зрения $2\omega = 2^\circ$; $\Gamma = 8^x$; $D = 500$ мм; $C_m = 500$ мм. При таких характеристиках система практически безабберационна. Виньетирование происходит за счет нижнего края третьего зеркала, причем световые диаметры остальных зеркал увеличены по наклонным пучкам, величина его составляет 7 % по площади входного зрачка.

В случае систем, составленных из трех параболоидов, значения аббераций, полученные для класса децентрированных систем в ППП Орл, показаны в табл. 4.

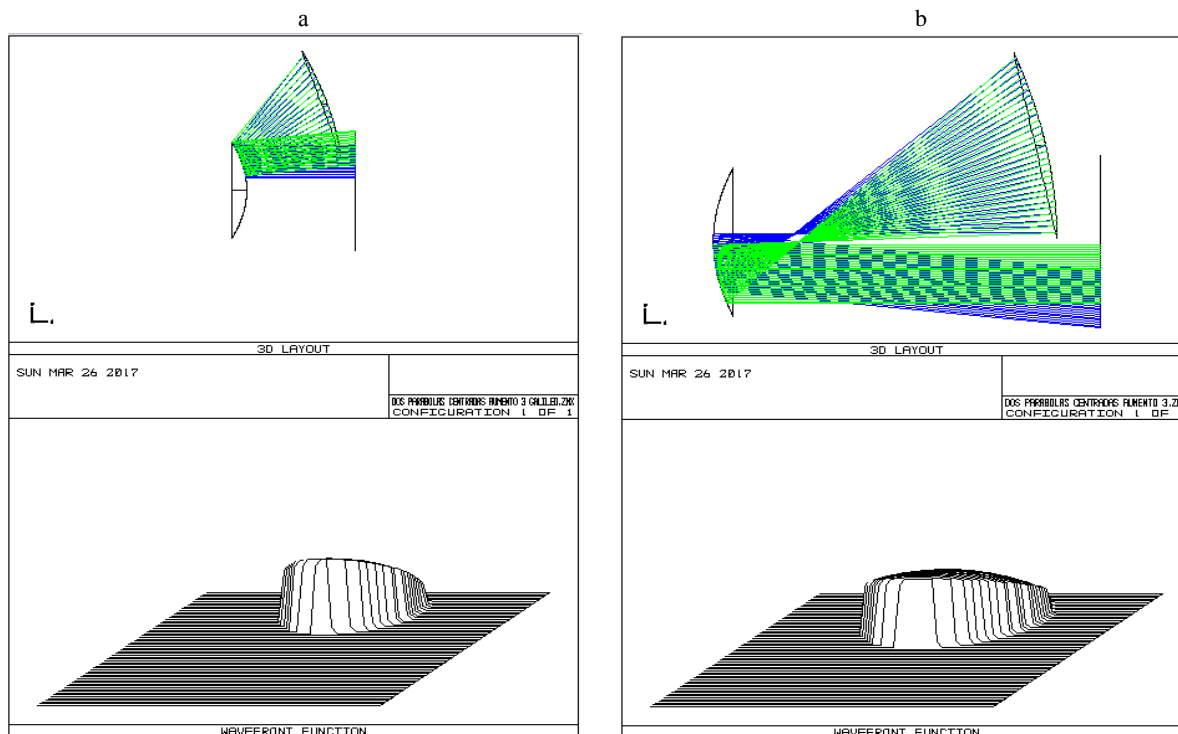


Рис. 2. Моделирование двухзеркальных систем при $C_m = 500$ мм (схема и диаграмма волнового фронта): а – система I типа; б – система II типа

Fig. 2. Simulation of two-mirror systems at $C_m = 500$ mm (scheme and diagram of wavefront): а – system of I type; б – system of II type

Таблица 4

Аберрационные характеристики квартпараболической системы для $\Gamma -8^x$ и -15^x при $C_m = 500$ мм
Aberration characteristics of quart-parabolic system for $\Gamma -8^x$ and -15^x at $C_m = 500$ mm

Г	№	Аберрации			
		поперечные		продольные	
		dx	dy	ДЕФОКУС	АСТ
-8^x	0	.00000	.00000	.00056	.00056
	1	.00000	-.00068	.00083	.00084
	2	-.00018	-.00004	.00056	.00062
	3	.00000	.00041	.00029	.00029
	4	.00018	-.00004	.00056	.00062
$\Delta Y' \% = .0090$					
-15^x	0	.00000	.00000	.00176	.00176
	1	.00000	-.00135	.00341	.00344
	2	-.00031	-.00014	.00176	.00240
	3	.00000	.00049	.00013	.00013
	4	-.03012	-.00014	.00176	.00240
$\Delta Y' \% = .0320$					

Результаты компьютерного моделирования квартпараболических систем без экранирования, выполненные в ППП Zemax, представлены на рис. 3.

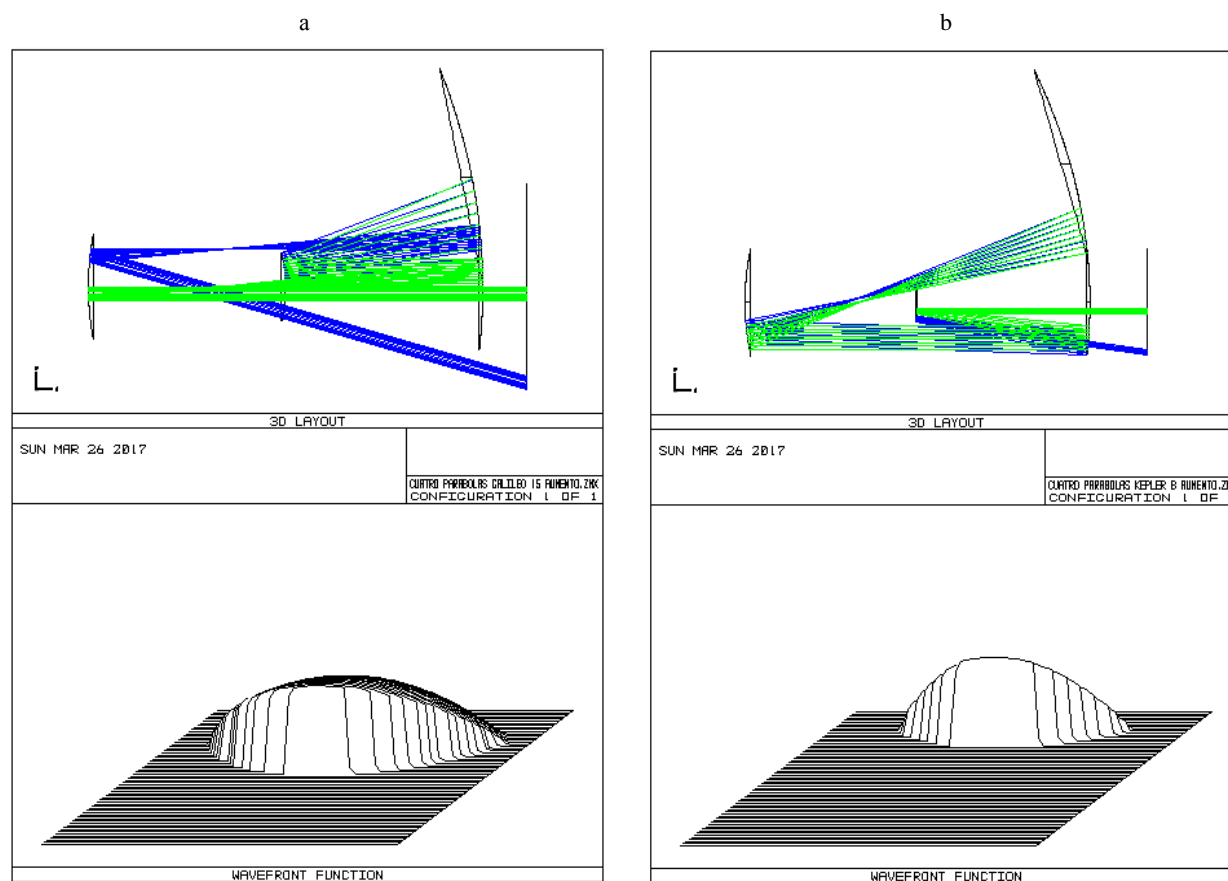


Рис. 3. Моделирование квартпараболических систем при $C_m = 500$ мм (схема и диаграмма волнового фронта):
а – система I типа; б – система II типа

Fig. 3. Simulation of quart-parabolic systems at $C_m = 500$ mm (scheme and diagram of wavefront):
а – system of I type; б – system of II type

ВЫВОДЫ

1. Предложены методики расчета афокальных систем, состоящие из внеосевых зеркал, с апертурной диафрагмой, децентрированной на расстояние C_m , соизмеримое с размером диафрагмы.

2. Установлены и структурно определены инженерные составляющие, включающие средства параметрического синтеза и анализа базовых схем: введение коэффициента, зависящего от величины децентрировки C_m и оптимального соотношения конструктивных параметров. Составлены алгоритмы расчета децентрированных афокальных систем с двумя и четырьмя отражениями, которые свободны от сферической аберрации, комы, астигматизма.

3. Разработаны композиции телескопических систем без экранирования с двумя и четырьмя отражениями и проведено их компьютерное моделирование в программных средах Oral и Zemax для углового поля зрения $2\omega = 2^\circ$, диаметра входного зрачка $D = 500$ мм, децентрировки $C_m = 500$ мм при диафрагменном числе главного зеркала $N = 0,8$. Установлено, что аберрации децентрировки ничтожно малы.

4. Предложены формулы расчета для максимально возможного углового поля зрения афокальных систем. Установлены габаритные соотношения для устранения виньетирования.

5. В целях практического применения в качестве насадок к регистрирующим объективам интерес представляют двухзеркальные афокальные системы небольших кратностей. Результаты расчетов и полученные формулы могут быть использованы при проектировании новых зеркальных систем теплового сканирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. La Roche, U. The K400 Super Theodolite / U. La Roche // *Optical Engineering*. 1968. Vol. 7, No 1. P. 23. DOI: 10.1117/12.7971497.
2. Грамматин, А. П. Трехзеркальный объектив телескопа без экранирования / А. П. Грамматин, А. А. Сычева // *Оптический журнал*. 2010. Т. 77, № 1. С. 18–20. DOI: 10.1364/jot.77.000018.
3. Марешаль, А. Структура оптического изображения / А. Марешаль, М. Франсон. М.: Мир, 1964. 295 с.
4. Игнатовский, В. С. Элементарные основы теории оптических приборов / В. С. Игнатовский. СПб.: СПбГИТМО (ТУ), Ива, 2001. 202 с.
5. Cox, A. *System of Optical Design* / A. Cox. London: the Focal Press, 1967. 665 p.
6. Трубка, С. И. Методика расчета зеркальных телескопов без центрального экранирования / С. И. Трубка, Г. И. Лебедева, А. А. Гарбуль // *Оптико-механическая промышленность*. 1988. № 2. С. 21–23.
7. Губель, Н. Н. Аберрации децентрированных систем / Н. Н. Губель. Л.: Машиностроение, 1975. 272 с.

8. Цуканова, Г. И. Длиннофокусные светосильные трехзеркальные объективы / Г. И. Цуканова // *Известия вузов СССР. Приборостроение*. 1971. Т. 14, № 2. С. 92–95.
9. Пейсахсон, И. В. Оптика спектральных приборов на рубеже столетий / И. В. Пейсахсон // *Оптический журнал*. 2002. Т. 69, № 1. С. 21–35. DOI: 10.1364/jot.69.000017
10. Русинов, М. М. Несферические поверхности в оптике: расчет, изготовление и контроль / М. М. Русинов. 4-е изд. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. 296 с.
11. Артюхина, Н. К. Квартпараболическая система из трех зеркал / Н. К. Артюхина, Л. Пероса, Л. Самбрано // *Приборостроение-2015: сб. тр. 8-й междунар. науч.-техн. конф.*, г. Минск, 25–27 нояб. 2015 г. Минск: БНТУ, 2015. С. 165–167.
12. Артюхина, Н. К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем / Н. К. Артюхина. Минск: БНТУ, 2009. 309 с.

Поступила 27.03.2017

Подписана в печать 30.05.2017

Опубликована онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. La Roche U. (1968) The K400 Super Theodolite. *Optical Engineering*, 7 (1), 23. DOI: 10.1117/12.7971497.
2. Grammatin A. P., Sycheva A. A. (2010) Three-Mirror Telescope Objective without Screening. *Journal of Optical Technology*, 77 (1), 18–20. DOI: 10.1364/jot.77.000018.
3. Mareshal A., Franson M. (1960) *Diffraction Structure des Images*. Paris. 204.
4. Ignatovsky V. S. (2001) *Elementary Fundamentals on Theory for Optical Devices*. Saint-Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Publishing House "Iva". 202 (in Russian).
5. Cox A. (1967) *System of Optical Design*. London, the Focal Press. 665.
6. Trubko S. I., Lebedeva G. I., Garbul A. A. (1988) Methodology for Calculation of Mirror Telescope without Central Screening. *Optiko-Mekhanicheskaya Promyshlennost* [Optomechanical Industry], (2), 21–23 (in Russian).
7. Gubel N. N. (1975) *Aberations of Decentered Systems*. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ. 272 (in Russian).
8. Tsukanova G. I. (1971) Long-Focus High-Power Three-Mirror Objectives. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy SSSR. Priboroostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 14 (2), 92–95 (in Russian).
9. Peysakhson I. V. (2002) The Optics of Spectral Devices at the Turn of the Century. *Journal of Optical Technology*, 69 (1), 17–41. DOI: 10.1364/jot.69.000017.
10. Rusinov M. M. (2011) Non-Spheric Surface in Optics: Calculation, Manufacturing and Control. 4th ed. Moscow, LIBROKOM Publ. 296 (in Russian).
11. Artiukhina N. K., Perosa L., Sambrano L. (2015) Quart-Parabolic System with Three-Mirrors. *Priboroostroenie-2015: sb. tr. 8-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., g. Minsk, 25–27 noyab. 2015 g.* [Instrumentation-2015. Proceedings of 8th International Scientific and Research Conference, Minsk, November 25–27]. Minsk, BNTU, 165–167 (in Russian).
12. Artiukhina N. K. (2009) *Theory, Methods for Designing and Calculation of Mirror Systems*. Minsk, Belarusian National Technical University. 309 (in Russian).

Received: 27.03.2017

Accepted: 30.05.2017

Published online: 29.09.2017