

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2009 г. А. М. Савицкий; М. Н. Соколовский, доктор техн. наук

ОАО “ЛОМО”, Санкт-Петербург

Рассмотрены оптические схемы разработанных на ОАО “ЛОМО” объективов оптико-электронных камер с диаметрами входных зрачков 200–350 мм для мини-космических аппаратов и 500–750 мм для малых космических аппаратов с угловыми полями 2° – $4,5^\circ$, минимизированные по массам и габаритам за счет выбора оптимальных оптических систем объективов. Объективы построены по двухзеркальным схемам с линзовыми, однозеркальными и зеркально-линзовыми корректорами полевых аберраций и преобразователями фокусного расстояния. Приведены варианты построения оптических схем и их параметры.

Ключевые слова: космические объективы.

Коды OCIS: 230.0230, 120.4640, 350.6090.

Поступила в редакцию 15.06.2009.

В последнее время большое внимание уделяют созданию малых космических аппаратов (МКА), на которых устанавливаются оптико-электронные камеры (ОЭК) для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Основные технические характеристики современных спутников для ДЗЗ приведены в табл. 1.

Масса целевой аппаратуры (ЦА) в основном определяется массой ОЭК, которая состоит из объектива космического телескопа (КТ) и системы приема и преобразования информации (СППИ). Ориентировочно можно принять, что массы объектива и СППИ составляют соответственно $2/3$ и $1/3$ от массы ЦА.

Массогабаритные характеристики КТ во многом определяются оптической схемой и технологическими возможностями ее реализации. Поэтому выбор оптимальной оптической схемы является важной и достаточно сложной задачей создания ОЭК. В работе [1] рассмотрены общие принципы построения и оптические системы объективов крупногабаритных космических телескопов, предназначенных главным образом для больших спутников. В настоящей статье рассматриваются оптические схемы ОЭК, разрабатываемых и изготавливаемых на “ЛОМО”, для МКА, устанавливаемых на мини и малые спутники,

Основные оптические параметры ОЭК приведены в табл. 2.

В таблице указаны спектральные диапазоны: панхроматический (ПХ), мультиспектральный

(МС), средний инфракрасный (СИК), дальний инфракрасный (ДИК). Системная функция передачи модуляции определяется как произведение функций передачи модуляции (ФПМ) объектива и СППИ.

Оптические схемы объективов КТ можно разделить на линзовые, зеркальные и зеркально-линзовые.

В линзовых объективах несложно реализовать большие угловые поля $2\omega > 4^\circ$. К недостаткам линзовых схем, ограничивающих их использование в ОЭК, относятся большие длины оптической системы, близкие к значению фокусного расстояния f' , терморасстраиваемость, высокая чувствительность к влиянию эксплуатационных воздействий, особые жесткие требования к обеспечению теплового режима.

Зеркальные и зеркально-линзовые системы строятся по схеме зеркального телеобъектива (рис. 1). Они состоят из главного зеркала (ГЗ) – 1, вторичного зеркала (ВЗ) – 2 и корректора поле-

Таблица 1. Основные характеристики современных спутников

Класс КА ДЗЗ	Диапазоны масс КА ДЗЗ, кг	Масса ЦА, % от массы КА
Микроспутники	< 100	34–42
Мини-спутники	100–500	30–42
Малые спутники	500–1000	26–36,5
Большие спутники	≥ 1000	16–35,5

Таблица 2. Основные параметры ОЭК

Наименование параметра	Мини-КА	Малые КА
Диаметр входного зрачка D , мм	200–350	500–700
Угловое поле 2ω , град	2,5–4,5	2–3
Полоса обзора с высоты орбиты $H = 600$ км, км	25–45	20–30
Фокусное расстояние, мм	600–3000	8000–12000
Спектральный диапазон, мкм	ПХ: 0,5–0,8 МС: 0,48–0,52 0,54–0,59 0,63–0,69 0,75–0,95	ПХ: 0,5–0,8 СИК: 3–5 ДИК: 8–12,5 МС: 0,48–0,52 0,54–0,59 0,63–0,69 0,75–0,95
Системная функция передачи модуляции (ФПМ) на зачетной частоте (μ_H) в панхроматическом диапазоне	—	0,1–0,2
Наличие системы автоматической фокусировки (САФ)	0,1–0,2	+
Масса, кг	30	< 150

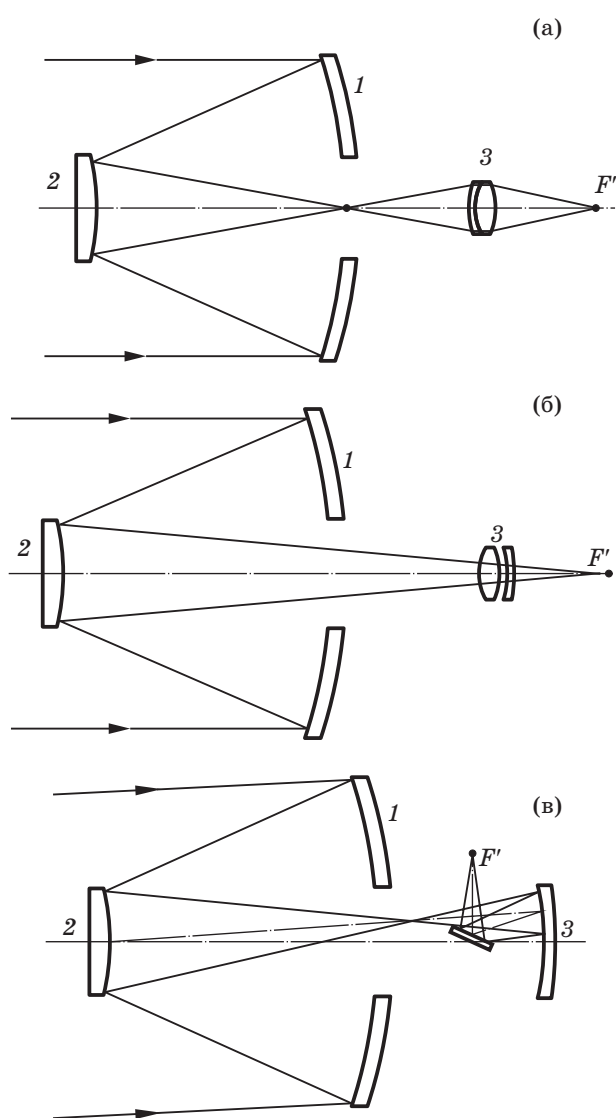


Рис. 1. Принципиальные оптические схемы космических объективов (пояснения в тексте).

вых aberrаций (КПА) – 3. Малые угловые поля и относительные отверстия объективов упрощают коррекцию aberrаций, главным образом aberrации III порядка: сферическую, кому, астигматизм, кривизну изображения и дисторсию (для топографических ОЭК).

Обычно для коррекции сферической aberrации и комы вводится асферизация ГЗ и ВЗ, а для коррекции астигматизма и кривизны поля – КПА. Применяются линзовые, зеркальные или зеркально-линзовые КПА.

Оптическую схему КТ можно разделить на два компонента: 1) зеркальный, состоящий из ГЗ и ВЗ, и 2) КПА. КПА с увеличением β переносит промежуточное изображение объекта, создаваемое зеркальным компонентом, в фокальную плоскость всего КТ.

В схеме по рис. 1а зеркальный компонент дает действительное промежуточное изображение, которое КПА переносит в плоскость $F'_{\text{ЭКВ}}$ с отрицательным увеличением β .

В схеме по рис. 1б КПА переносит в плоскость $F'_{\text{ЭКВ}}$ изображение с положительным увеличением β , т. е. схема не имеет действительного изображения зеркального компонента.

Схема по рис. 1в известна как схема Ричи-Кретьена с КПА. Она состоит из гиперболических ГЗ и ВЗ и линзового КПА. В зависимости от относительного отверстия 1:10–1:3 длина l оптической схемы – расстояние от ВЗ до $F'_{\text{ЭКВ}}$ – лежит в интервале $(0,25-0,35)f'_{\text{ЭКВ}}$. В схеме минимальное количество зеркальных поверхностей – две, причем она центрированная, осесимметричная, что облегчает построение системы обеспечения температурного режима (СОТР),

и технологична с точки зрения изготовления и нерасстраиваемости в условиях эксплуатации.

Основной проблемой применения схемы Ричи-Кретьена является защита фокальной плоскости от прямого попадания лучей через отверстие в ГЗ, минуя отражения от ГЗ и ВЗ (“паразитная” засветка изображения), на фотоприемник. Проблема усугубляется для широкоугольных систем и для систем, длина которых в несколько раз меньше их фокусного расстояния.

Эта схема требует применения длинной бленды, установленной перед объективом.

Для защиты фокальной плоскости от “паразитных” засветок предложена система внутренних конических светозащитных бленд [2].

Суть светозащитных бленд на примере двухзеркального объектива видна из рис. 2. Между ГЗ (1), ВЗ (2) и фокальной плоскостью (3) установлены конические бленды (4). Бленды представляют собой кольцевые конусы, выполненные из тонкого материала, толщиной t . Вершины конусов, частью которых являются кольцевые конусы, совпадают с фокусом ГЗ (F). Конические бленды устанавливаются в цилиндрической зоне, ограниченной отверстием D_1 в ГЗ и диаметром ВЗ ($D_{ВЗ}$). Высота каждого k -го усеченного кольцевого конуса h –

$$h = (D_1 - D_{ВЗ})/2.$$

Длина k -го конуса d_k определяется как

$$d_k = h / \operatorname{tg} \alpha_k,$$

где $\operatorname{tg} \alpha_k = D_{ВЗ} / (f' - d + l_k)$, l_k – расстояние от ВЗ до переднего торца бленды k .

Как видно из рис. 2, образующие “скользят” по пучкам лучей, отраженных от ГЗ, создавая дополнительное кольцевое экранирование на входном зрачке толщиной t_3

$$t_3 = t f'_{ГЗ} / (f'_{ГЗ} - d + l_k).$$

Таким образом, входной зрачок объектива представляет собой круг с центральным экраном диа-

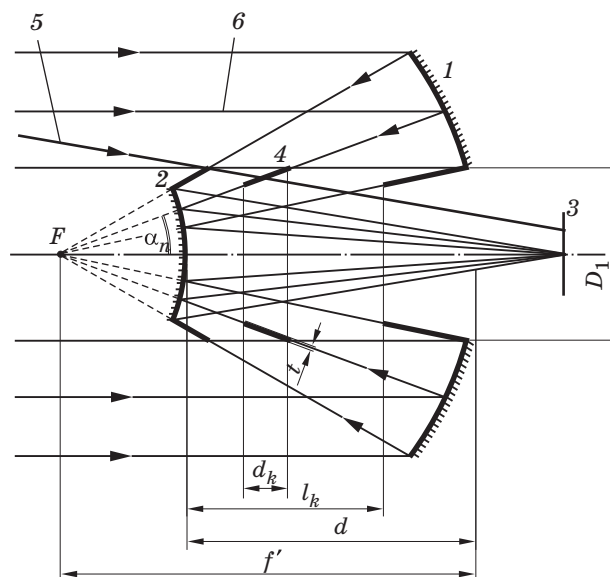


Рис. 2. Схема светозащитных бленд в двухзеркальном объективе (пояснения в тексте).

Таблица 3. Оптические параметры объективов КТ для космических мини-спутников

Наименование параметров	Оптические схемы по рисункам			
	3а	3б	3в	3г
Диаметр входного зрачка D , мм	200	200	280	350
Фокусное расстояние $f'_{ЭКВ}$, мм	700	2000	2800	1670
Угловое поле 2ω , град	3,8	4	3	4,4
Длина оптической системы l , мм	340	570	775	600
Относительная длина $l/f'_{ЭКВ}$	0,485	0,285	0,27	0,36
Спектральный диапазон, мкм				
ПХ	0,4–0,8	0,48–0,9	0,4–0,9	0,48–0,77
МС		0,48–0,52; 0,54–0,59; 0,63–0,69; 0,75–0,95		0,48–0,52; 0,54–0,59; 0,63–0,69; 0,75–0,95
Расчетные значения ФПМ (лин/мм) в ПХ диапазоне на частоте μ				
центр поля	120	60	60	72
край поля	0,4	0,3	0,29	0,42
край поля	0,3	0,21	0,20/0,25	0,37
Масса, кг	24	16,6	26,2	30

метром $D_{ВЗ}$ и k кольцами по числу кольцевых конусов 4. Как видно из рис. 2, наличие внутренних светозащитных конических и цилиндрических бленд защищает фокальную плоскость от прямых лучей 5, максимально пропуская рабочие лучи 6. Наличие конических бленд вносит дополнительное экранирование, зависящее от толщин бленд t и их количества k . В случае полного исключения головной бленды дополнительное экранирование не превышает 3–5% от площади зрачка и снижает значение ФПМ на зачетной частоте не более чем на 10%. В табл. 3 и на рис. 3 приведены оптические параметры и схемы четырех объективов КТ, разработанных на “ЛОМО” и построенных по схемам Максудова (рис. 3а, 3б) и Ричи–Кретьена с линзовыми КПА (рис. 3в, 3г). Для уменьшения массы объективов применены облегченные зеркала и углепластиковые конструкции. В таблице указаны значения масс всего объектива в целом. В оптические системы введены конические бленды, позволившие сократить длины головных бленд с $4D$ до $2D$ в схеме по рис. 3а, с $(4-5)D$ до $0,5D$ в схемах по рис. 3б, 3в, 3г.

Для МКА на “ЛОМО” разработаны объективы КТ с диаметром входного зрачка $D = 500-750$ мм. Такие объективы могут быть построены по схеме Ричи–Кретьена с линзовым КПА или по схеме с однозеркальным или зеркально-линзовым КПА. Оптическая схема с зеркальным КПА показана на рис. 1в [3]. Особенностью схемы является наличие действительного промежуточного изображения после зеркального компонента, состоящего из ГЗ (1) и ВЗ (2). Третье зеркало (3) перепроецирует промежуточное изображение в эквивалентную фокальную плоскость, в которой установлены приемники. В схеме ГЗ – асферическое эллиптическое зеркало, ВЗ – гиперболическое, третье зеркало (КПА) – эллиптическое, позволяющее скорректировать астигматизм, вносимый зеркальным компонентом. Для коррекции кривизны изображения радиусы зеркал выбираются из условия, чтобы алгебраическая сумма их обратных величин равнялась нулю.

Достоинством схемы является отсутствие необходимости установки сложных светозащитных бленд, хорошая возможность реализации широкого спектрального диапазона, в частности видимого и инфракрасных – 3–5 и 8–12 мкм. С другой стороны, достижение больших угловых полей, более 3° , достаточно проблематично. Кроме того, необходимость установки в схему светофильтров, защитных стекол требует введения дополнительных линзовых элементов (для

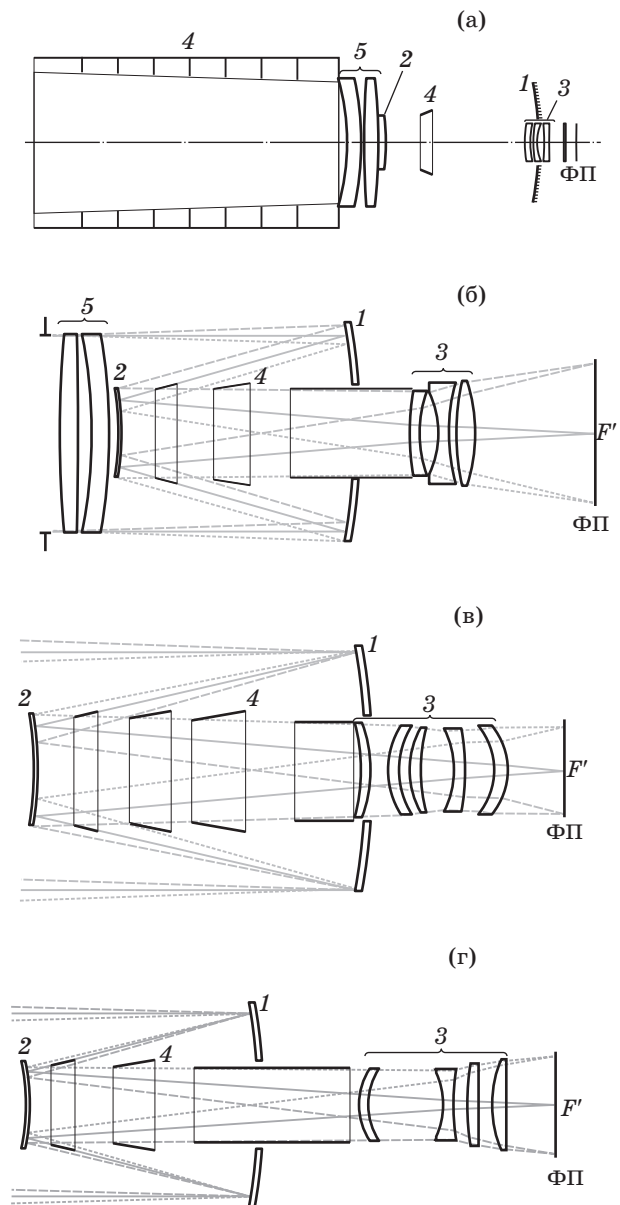


Рис. 3. Оптические схемы объективов для мини-спутников. 1 – ГЗ, 2 – ВЗ, 3 – КПА, 4 – светозащитные бленды, 5 – компенсатор aberrаций, ФП – фокальная плоскость.

коррекции главным образом хроматических aberrаций увеличения) либо линзовых компонентов (для изменения фокусного расстояния того или иного спектрального канала).

Особенностью трехзеркальных схем с промежуточным изображением после ГЗ и ВЗ является расположение выходного зрачка в пространстве изображения между третьим зеркалом и плоскостью изображения. При больших полях изображения угол ω' главного луча для крайних точек поля становится весьма значительным,

что приводит к появлению полевых aberrаций: комы, астигматизма, кривизны изображения, хроматизма увеличения, вносимых защитным стеклом 4.

Монохроматические aberrации могут быть исправлены незначительным изменением эксцентриситетов зеркал, а для исправления хроматизма увеличения необходимо ввести дополнительный линзовый компонент.

Оценим влияние хроматизма увеличения на качество изображения. Хроматизм увеличения $\Delta y'_{\lambda_1\lambda_2}$ для плоскопараллельной пластинки определяется как [4]

$$\Delta y'_{\lambda_1\lambda_2} = \frac{(n-1)\omega'}{n^2\nu}d, \quad (1)$$

где d – толщина пластинки, n – показатель преломления материала пластинки $\nu = \frac{n_{\lambda_0} - 1}{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}}$ – коэффициент дисперсии, ω' – угол главного луча.

Наличие хроматизма увеличения, или поперечного хроматизма, снижает ФПМ системы в $T_{xp}(\mu)$ раз, где $T_{xp}(\mu)$ – ФПМ поперечного хроматизма [5], определяемая как

$$T_{xp}(\mu) = \text{sinc} \left[2\pi\mu\Delta y'_{\lambda_1\lambda_2} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_1 - \lambda_2} \right] \approx \text{sinc} \left[\pi\mu\Delta y'_{\lambda_1\lambda_2} \right]. \quad (2)$$

Например, если принять $\mu_H = 1/(2a)$ – частота Найквиста, где a – размер пиксела, и $\Delta y'_{\lambda_1\lambda_2} = a$, то $T_{xp}(\mu_H) = 0,66$, а при $\Delta y'_{\lambda_1\lambda_2} = 2a$ получим $T_{xp}(\mu_H) = 0$.

Для коррекции хроматизма увеличения плоскопараллельной пластинки вблизи выходного зрачка можно установить однолинзовый компенсатор [6], вносящий хроматизм увеличения $\Delta y'_{\lambda_1\lambda_2}$, равный по величине и обратный по знаку. Таким компенсатором хроматизма может быть длиннофокусный отрицательный мениск с вогнутостью, обращенной к плоскости изображения, показанный на рис. 4.

В табл. 4 приведены параметры оптических систем, а на рис. 4 – оптические схемы для МКА. Для упрощения рисунка показан ход лучей от плоскости промежуточного изображения, создаваемого ГЗ и ВЗ, до фокальной плоскости. Объектив на рис. 4а построен по трехзеркальной схеме, в которой КПА – эллиптическое зеркало, ПХ и ИК каналы имеют одинаковые значения фокусных расстояний. В схеме на рис. 4б ПХ и ИК каналы построены по трехзеркальной схеме, но в канал ИК введен линзовый преобразователь фокусного расстояния (ЛПФР), уменьшающий

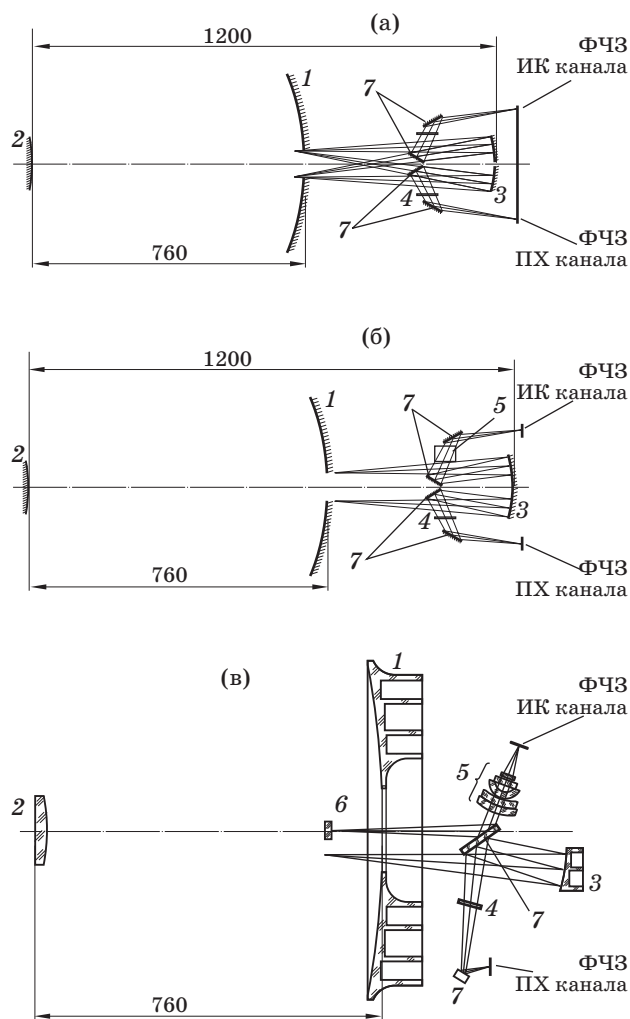


Рис. 4. Оптические схемы объективов для МКА. 1 – ГЗ, 2 – ВЗ, 3 – КПА – эллиптическое зеркало, 4 – корректор хроматических aberrаций, 5 – линзовый преобразователь фокусного расстояния, 6 – коллектив, ФЧЗ – фоточувствительная зона приемников, 7 – плоские отклоняющие зеркала (пояснения в тексте).

фокусное расстояние f' до 3800 мм и тем самым увеличивающий относительное отверстие до 1:5. ЛПФР установлен вблизи выходного зрачка оптической системы.

Объектив по схеме на рис. 4в состоит из двух каналов: панхроматический построен по трехзеркальной схеме, состоящей из ГЗ (1), ВЗ (2), КПА (3) и дополнительного корректора хроматических aberrаций, а ИК канал – по двухзеркальной схеме, состоящей из ГЗ (1), ВЗ (2) и линзового компонента (3), выполняющего функции преобразователя фокусного расстояния и КПА.

Таблица 4. Параметры оптических систем для МКА

Наименование параметров	Тип оптической схемы					
	Ричи-Кретьена с трехлинз. КПА	Трех- зеркальная (рис. 4а)	Трехзеркальная (рис. 4б)		Трех- зеркальная (рис. 4в)	Двух- зеркальная с ЛКПА
			без ЛПФР	с ЛПФР		
Диаметр входного зрачка D , мм	500	750	750		600	
Фокусное расстояние $f'_{\text{экв}}$, мм	4700	6000	6000	3800	4285	1670
Угловое поле 2ω , град	2,66	1,8	1,8		1,827	
Длина оптической системы l , мм	1200	1200	1200		1100	
Относительная длина $l/f'_{\text{экв}}$	0,25	0,20	0,20		0,257	
Спектральный диапазон, мкм						
ПХ	0,5–0,8	0,5–0,8	0,5–0,8		0,5–0,8	
МС	0,45–0,52 0,52–0,60 0,63–0,69 0,76–0,90					
ИК		8–12		3–5		3–5,2
Расчетные значения ФПМ (лин/мм) на частоте μ , в ПХ в диапазоне	55,6 0,28	83 > 0,3	83 > 0,3	15 > 0,35	83 0,13	25 0,123
Масса, кг (без СППИ)	130,4		120		79	

Все ОЭК для МКА снабжены системами автоматической фокусировки (САФ), не показанной на рисунках, которая совместно с СОТР гарантирует требуемое качество изображения в условиях эксплуатации. Учитывая высокие требования к стабильности положения оптических элементов объектива КТ, силовые несущие конструкции объектива изготавливаются из композиционного материала КМУ-4Л со следующими физико-химическими характеристиками: плотность $1,45 \times 10^3$ кг/м³, модуль упругости при растяжении $1,37 \times 10^{11}$ Нм⁻², модуль упругости при изгибе $1,23 \times 10^{11}$ Нм⁻², коэффициент термического линейного расширения $1,2 \times 10^{-6}$ К⁻¹.

Крупногабаритные асферические зеркала имеют облегченную конструкцию с коэффициентом облегчения более 0,7. Все вышеизложенное позволило создать ОЭК с малыми массами и “форсированными” оптическими характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лысенко А.И., Маламед Е.Р., Сокольский М.Н., Пименов Ю.Д., Путилов И.Е. Оптические схемы объективов космических телескопов // Оптический журнал. 2002. № 9. С. 21–25.
2. Данилов В.А., Путилов И.Е., Савицкий А.М., Сокольский М.Н. Космический телескоп // Патент РФ № 78957. 2008.
3. Korsch D. Anastigmatic three – mirror telescope // Appl. Opt. 1977. V. 8. P. 2074–2077.
4. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 640 с.
5. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1989.
6. Маламед Е.Р., Сокольский М.Н., Воронова М.В., Лапо Л.М. Объектив космического телескопа // Патент РФ № 35446. 2003.