

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ КОРША И РИЧИ — КРЕТЬЕНА С ЛИНЗОВЫМ КОРРЕКТОРОМ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В.И. Заварзин<sup>1</sup>

zavarzin@bmstu.ru

С.С. Орешечкин<sup>2</sup>

s.oreshechkin@zenit-kmz.ru

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> ПАО КМЗ, г. Красногорск, Московская обл., Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрены оптические схемы Ричи — Кретьена с линзовым корректором полевых аберраций и трехзеркальная схема Корша, которые используются в качестве систем высокого разрешения для малых космических аппаратов, в том числе формата CubeSat. Проведен расчет этих объективов и анализ массогабаритных характеристик их оптических элементов. Приведены основные оптические и технические параметры и характеристики оптических систем малых космических аппаратов. С помощью модуляционной передаточной функции оптической системы выполнена оценка качества изображения. Показано, что массы оптических элементов схем Корша и Ричи — Кретьена с линзовым корректором зависят не только от фокусного расстояния систем и диаметра входной апертуры, но и от углового поля, которое зависит от требуемой полосы захвата системы и технологии изготовления облегченных зеркал. Проанализированы массогабаритные и аберрационные возможности рассчитанных схем с массой оптических элементов менее 5 кг, представляющих наибольший интерес при создании многосоставной спутниковой группировки малых космических аппаратов. Показано, что методика расчета и оценки массы объектива уже на начальном этапе проектирования малых космических аппаратов позволяет выбрать лучшую оптическую схему, которая будет определять характеристики, массу и габаритные размеры малых космических аппаратов, что сократит процессы разработки, выбора носителя для запуска и уменьшит себестоимость конечного продукта

### Ключевые слова

*Малогобаритный космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, схема Корша, схема Ричи — Кретьена*

Поступила 27.06.2023

Принята 01.09.2023

© Автор(ы), 2023

**Введение.** Постоянно обновляемые базы данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются наиболее оперативными и эффективными инструментами получения объективной информации о состоянии и динамических изменениях земных ландшафтов и инфраструктурных объектов. Необходимость в систематической сплошной съемке поверхности Земли в оптическом диапазоне с минимальным временным интервалом между просмотром любого района постоянно возрастает, что влечет увеличение числа космических аппаратов (КА) на орбите. Общемировой тенденцией сегодня является объединение разнотипных КА в единую космическую группировку с единым информационным центром (в том числе с использованием искусственного интеллекта). Основу таких группировок составляют малогабаритные спутники с оптико-электронной аппаратурой. Необходимость большого числа спутников в группировке диктуется возрастающими требованиями к эффективности целевого функционирования космических систем. Именно по этой причине возникли глобальные навигационные спутниковые системы, глобальные системы связи и наблюдения, состоящие из десятков КА [1–10]. Выход из строя и прекращение активного функционирования одного или нескольких спутников группировки лишь незначительно снижает эффективность, но не приводит к ее отказу.

Российским правительством в целях увеличения космической группировки ДЗЗ принят федеральный проект «Комплексное развитие космических информационных технологий» («Сфера»). Основу проекта составляют пять орбитальных группировок связи и пять новых группировок ДЗЗ на базе малых КА (МКА), которые позволят кратно увеличить орбитальную группировку и кардинально повысить ее ценность для потребителей [11]. Сделать это позволит индустриальная модель, основанная на серийном производстве КА.

Задача увеличения числа спутников группировки и повышения ее надежности, а также конкуренция на рынках космических услуг определяют необходимость универсальности МКА, с учетом имеющихся технологических возможностей достижения заданной эффективности, ограничивающих минимальную размерность и массу спутника [12]. Унификация и универсальность сложных высокопрецизионных платформ для установки оптико-электронной аппаратуры и служебных систем должны повысить технологичность.

**Постановка задачи.** За рубежом в последнее время активно проводится политика объединения разнотипных КА в единую космическую группировку, в которую могут входить как спутники формата фемто (до 100 г), так и большие спутники (более 1000 кг). Основу спутниковой группировки

ДЗЗ составляют спутники формата микро (10...100 кг), мини (100...500 кг) и малые (500...1000 кг). Такие спутники могут заимствовать сложные универсальные высокоточные платформы для установки оптико-электронной аппаратуры, компоненты, технологии больших спутников, что существенно сокращает производственный цикл изготовления. Запускают такие спутники, как правило, дешевым способом: либо на носителе сверхмалого класса, либо в качестве попутной нагрузки на большой ракете-носителе. Для таких спутников наряду с высокими характеристиками оптико-электронных систем, минимальными габаритными размерами, например, в отличие от спутников формата фемто, нано и больших, особо необходима минимальная масса, что упрощает выбор носителя для запуска в космос. Поэтому выбор из изученных оптических систем лучшей, которая будет определять характеристики, массу и габаритные размеры МКА, позволит сократить процессы разработки и выбора носителя для запуска, а также уменьшить себестоимость конечного продукта.

*Цель настоящей работы* — разработка методики расчета и анализ массогабаритных характеристик оптических элементов перспективных оптических систем для малогабаритных систем ДЗЗ.

**Решения задачи.** Для малогабаритных оптических систем ДЗЗ по соотношению технологичность/масса наиболее предпочтительными являются схема Ричи — Кретьена с линзовым корректором полевых аберраций и трехзеркальная схема Корша с промежуточным изображением, работающая с внеосевым полем [4–10].

Фокусные расстояния оптических систем рассчитаны исходя из получения геометрического разрешения систем  $R$  (проекция пикселя  $d$  на Землю) от 1 до 5 м с зачетной высоты полета КА 400 км и находятся в пределах 480...7200 мм (табл. 1).

Таблица 1

**Фокусное расстояние  $f'$  (мм) оптических систем  
с зачетной высоты полета КА 400 км**

Проекция пикселя $d$ на Землю, мкм (частота Найквиста, мм <sup>-1</sup> )	Геометрическое разрешение систем $R$ , м				
	5	4	3	2	1
18 (27,8)	1440	1800	2400	3600	7200
12 (41,6)	960	1200	1600	2400	4800
9 (55,5)	720	900	1200	1800	3600
6 (83,3)	480	600	800	1200	2400

Оптическая схема трехзеркального объектива Корша с промежуточным изображением приведена на рис. 1.

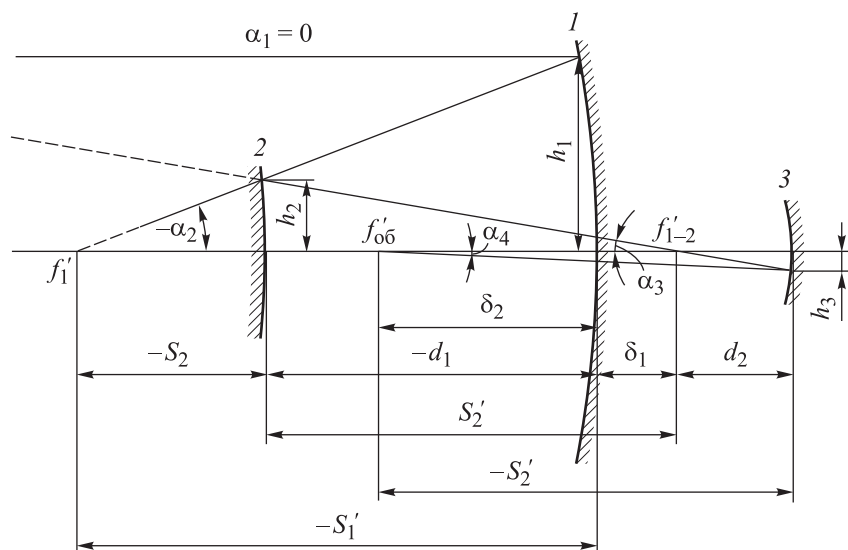


Рис. 1. Оптическая схема трехзеркального объектива Корша с промежуточным изображением

Входной зрачок совпадает с вершиной поверхности первого зеркала, т. е.  $S_p = 0$ . Габаритный расчет выполняется при следующей нормировке вспомогательных лучей:  $\alpha_1 = 0$ ;  $\alpha_3 = 1$ ;  $\alpha_4 = -1$ ;  $f'_{об} = h_1 = -1$ ;  $H_1 = S_p = 0$ ;  $\beta_1 = 1$ ;  $n_1 = n_3 = 1$ ;  $n_2 = n_4 = -1$ .

Расстояние между главным и вторым зеркалами определяем из условия равенства угла  $\alpha_3 = 1$ . Согласно схеме на рис. 1, запишем:

$$\alpha_3 = \frac{h_2}{-d_1 + \delta_1}. \quad (1)$$

Тогда  $h_2 = -d_1 + \delta$ , поскольку  $h_2 = \eta$ , то  $d_1 = \delta - \eta$ , где  $\eta = h_2 / h_1$  — коэффициент экранирования.

Расстояние между вторым и третьим зеркалами находим из условия равенства угла  $\alpha_4 = -1$ . В соответствии со схемой (см. рис. 1) имеем

$$\alpha_4 = \frac{h_3}{d_2 + \delta_1 + (d_1 - \delta_2)} = \frac{h_3}{-S_3'}. \quad (2)$$

Угол  $\alpha_4$  получаем из соотношения

$$\alpha_4 = \frac{h_2 - h_3}{d_1 + \delta_1 + d_2}. \quad (3)$$

Угол первого параксиального луча с оптической осью определяем из соотношения:

$$\alpha_2 = \frac{h_1 - h_2}{d_1} = \frac{1 - \eta}{\delta - \eta}. \quad (4)$$

Вычислив углы первого параксиального луча с оптической осью, радиусы кривизны зеркал объектива определим по формулам расчета хода первого параксиального луча:

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{h_1 (n_2 - n_1)}{n_2 \alpha_2 - n_1 \alpha_1} = \frac{2}{\alpha_2}; \\ r_2 &= \frac{h_2 (n_3 - n_2)}{n_3 \alpha_3 - n_2 \alpha_2} = \frac{2\eta}{1 + \alpha_2}; \\ r_3 &= \frac{h_3 (n_4 - n_3)}{n_4 \alpha_4 - n_3 \alpha_3}. \end{aligned} \quad (5)$$

Согласно (5), чем меньше значение угла  $\alpha_2$ , тем больше радиусы кривизны зеркал и меньше aberrации высших порядков. Значение угла  $\alpha_2$  зависит от выноса промежуточного изображения  $\delta_1$ , так как коэффициент экранирования в схемах Корша порядка 0,3–0,5. Чем больше  $\delta_1$ , тем больше будет угол  $|\alpha|$ , чему будет соответствовать большая кривизна поверхностей первого и второго зеркал.

Для aberrационного расчета необходимо записать выражения для первых четырех сумм Зейделя объектива с учетом асферичности поверхностей в соответствии с [13]:

$$\begin{aligned} S_I &= P_1 + B_1 + h_2 (P_2 + B_2) + h_3 B_3; \\ S_{II} &= S_p (P_1 + B_1) + H_2 (P_2 + B_2) + H_3 P_3 + W_1 + W_2 + W_3; \\ S_{III} &= S_p^2 (P_1 + B_1) + \frac{H_2^2}{h_2} (P_2 + B_2) + \frac{H_3^2}{h_3} P_3 + 2S_p W_1 + 2 \frac{H_2}{h_2} W_2 + \\ &+ 2 \frac{H_3}{h_3} W_3 + (-\alpha_2) + \frac{1}{h_2} (\alpha_2 + \alpha_3) + \frac{1}{h_3} (1 - \alpha_3); \\ S_{IV} &= \Pi_1 + \frac{\Pi_2}{h_2} + \frac{\Pi_3}{h_3}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\alpha_i$  — угол между первым вспомогательным лучом и оптической осью объектива;  $B_i$  — угол между вторым вспомогательным лучом и оптической осью на входе в объектив;  $h_i$  и  $H_i$  — приведенные к единичному фокусному расстоянию высоты первого и второго вспомогательных лу-

чей на поверхностях;  $S_p$  и  $S_1$  — приведенные расстояния от первой поверхности объектива до входного зрачка и предметной плоскости.

Поверхностные коэффициенты  $P_k$ ,  $W_k$ ,  $B_k$  и  $\Pi_k$  определяем из следующих соотношений:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= -\frac{\alpha_2^3}{4}; & P_2 &= \frac{(\alpha_3 - \alpha_2)^2 (\alpha_3 + \alpha_2)}{4}; & P_3 &= \frac{(\alpha_3 + 1)^2 (1 - \alpha_3)}{4}; \\
 W_1 &= \frac{\alpha_2^2}{2}; & W_2 &= \frac{\alpha_3^2 - \alpha_2^2}{2}; & W_3 &= \frac{1 - \alpha_3^2}{2}; \\
 B_1 &= e_1^2 \frac{\alpha_2^3}{4}; & B_2 &= -e_2^2 \frac{(\alpha_3 + \alpha_2)^3}{4}; & B_3 &= -e_3^2 \frac{(1 - \alpha_3)^3}{4}; \\
 \Pi_1 &= \alpha_2; & \Pi_2 &= -(\alpha_3 + \alpha_2); & \Pi_3 &= -(1 - \alpha_3),
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

где  $e_1^2$ ,  $e_2^2$ ,  $e_3^2$  — квадраты эксцентриситетов первого, второго и третьего зеркал.

Оптическая схема Ричи — Кретьена с линзовым корректором приведена на рис. 2.

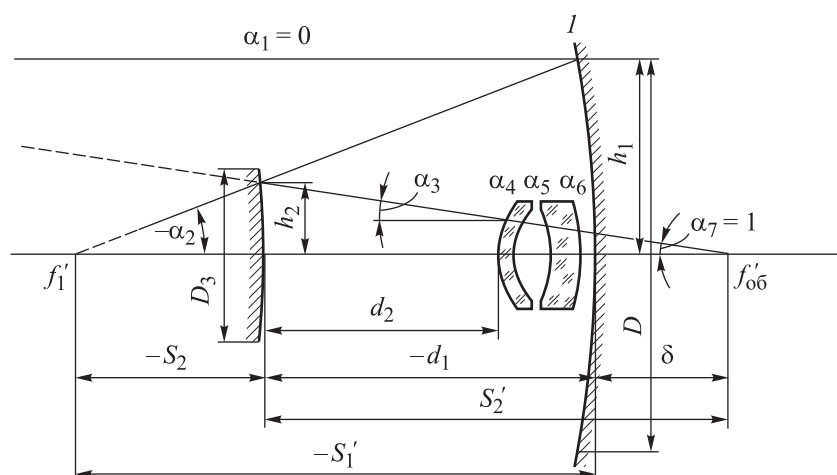


Рис. 2. Оптическая схема Ричи — Кретьена с линзовым корректором

Входной зрачок системы совпадает с вершиной поверхности первого зеркала, т. е.  $S_p = 0$ . Габаритный расчет выполняем при следующей нормировке вспомогательных лучей:  $\alpha_1 = 0$ ;  $\alpha_3 = \alpha_7 = 1$ ;  $f'_{об} = h_1 = 1$ ;  $H_1 = S_p = 0$ ;  $\beta_1 = 1$ ;  $n_1 = n_3 = n_5 = n_7 = 1$ ;  $n_2 = -1$ ;  $n_4 = n_6 = n$ .

Диаметр второго зеркала определяет экранирование системы:

$$D_3 = D\eta, \tag{8}$$

где  $D$  — диаметр апертуры.

Угол первого параксиального луча с оптической осью запишем так:

$$\alpha_2 = \frac{\eta - 1}{\eta - (\delta/h_1)} = \frac{2h_1}{r_1}, \quad (9)$$

где  $h_1$  — высота первого параксиального луча;  $r_1$  — радиус кривизны первого зеркала.

Расстояние между зеркалами выразим через высоту первого параксиального луча и коэффициент экранирования:

$$d_1 = h_1 ((\delta/h_1) - \eta). \quad (10)$$

Расстояние от второго зеркала до фокальной плоскости объектива определяем по формуле

$$S' = \delta - d_1. \quad (11)$$

Радиусы кривизны зеркал объектива находим через высоту первого параксиального луча:

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{2h_1((\delta/h_1) - \eta)}{1 - \eta}; \\ r_2 &= \frac{2h_2((\delta/h_1) - \eta)}{(\delta/h_1) + 1 - 2\eta}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для зеркальной части объектива первая и вторая суммы Зейделя имеют вид:

$$\begin{aligned} S_{\text{Iзер}} &= \sum_{v=1}^{v=2} h_v P_v = P_1 + \eta P_2 = \frac{-\alpha_2^3 + \eta(\alpha_2^3 - \alpha_2^2 - \alpha_2 + 1)}{4}; \\ S_{\text{IIзер}} &= \sum_{v=1}^{v=2} y_v P_v - 11 \sum_{v=1}^{v=2} W_v = y_2 P_2 + W_1 + W_2 = \frac{d_1(1 - \alpha_2^2 - \alpha_2 + 1)}{4} + \frac{1}{2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Чтобы определить конструктивные параметры компенсатора, необходимо найти значения  $P_k$  и  $W_k$ , для этого составляем уравнения исправления сферической аберрации и комы для всего объектива:

$$\begin{aligned} S_{\text{Iоб}} &= \sum_{v=1} h_v P_v = S_{\text{Iзер}} + h_k P_k = 0; \quad P_k = -S_{\text{Iзер}} / h_k; \\ S_{\text{IIоб}} &= S_{\text{IIзер}} + y_k P_k + W_k = 0; \quad W_k = -S_{\text{IIзер}} - y_k P_k. \end{aligned} \quad (14)$$

Значения высот первого и второго параксиальных лучей на бесконечно тонком компенсаторе находим по формулам расчета хода этих лучей:

$$h_k = h_3 = h_2 - d_2 \alpha_3 = \eta - d_2; \quad d_2 = \frac{1}{2} L; \quad (15)$$

$$y_k = y_3 = y_2 - d_2 \beta_3,$$

где  $\beta_3$  — угол между оптической осью и вторым параксиальным лучом.

Радиусы бесконечно тонких линз компенсатора

$$r_{v \text{ TH}} = \frac{h_k (n'_v - n_v)}{n'_v \alpha'_v - n_v \alpha_v}. \quad (16)$$

При расчете оптических систем особое внимание следует уделять светосиле объективов, так как характеристики оптической системы должны быть рассчитаны из условия, при котором реакция приемника на поток излучения от источника была бы не меньше некоторой величины [14]:

$$i_{\min} = k_{\text{п}} i_{\text{п}}, \quad (17)$$

где  $k_{\text{п}}$  — коэффициент, учитывающий превышение полезного сигнала над пороговым;  $i_{\text{п}}$  — сигнал, соответствующий порогу чувствительности.

Соответствующий порогу чувствительности сигнал будет зависеть от энергетической освещенности, создаваемой оптической системой [14]:

$$i = S E'_e Q. \quad (18)$$

Здесь  $S$  — интегральная чувствительность приемника изображения;  $E'_e$  — энергетическая освещенность, созданная оптической системой;  $Q$  — площадь светочувствительной поверхности.

Созданную оптической системой энергетическую освещенность в случае, когда предмет находится в бесконечности [13], можно выразить так:

$$E'_e = \frac{\tau \pi L_e (D_{\text{эф}} / f')^2}{4}, \quad (19)$$

где  $\tau$  — коэффициент пропускания оптической системы;  $L_e$  — энергетическая яркость излучающего участка поверхности;  $D_{\text{эф}} = D \sqrt{1 - \eta^2}$  — эффективный диаметр оптической системы (связан с геометрическим);  $(D_{\text{эф}} / f')^2$  — квадрат эффективной светосилы оптической системы.

Для получения сигнала, превышающего порог чувствительности матрицы фоточувствительных приборов с зарядовой связью, реализующих режим временной задержки и накопления, геометрическая светосила оптической системы должна находиться в пределах от 1/64 до 1/144, т. е. относительное отверстие объектива должно быть не меньше 1/12.



Это условие накладывает ограничение на минимальный диаметр апертуры при заданном фокусном расстоянии.

Выполним габаритный и абберационный расчеты оптических систем по схемам Корша и Ричи — Кретьена с линзовым корректором со следующими характеристиками: фокусное расстояние систем  $f' = 480$  мм; относительное отверстие  $D / f' = 1 : 11$ ; угловое поле по полосе захвата  $2\omega = 1 \dots 2^\circ$ ; коэффициент экранирования  $\eta = 0,3-0,4$ ; длина оптической системы не более 100 мм.

Конструктивные параметры рассчитанных оптических систем приведены в табл. 2.

Таблица 2

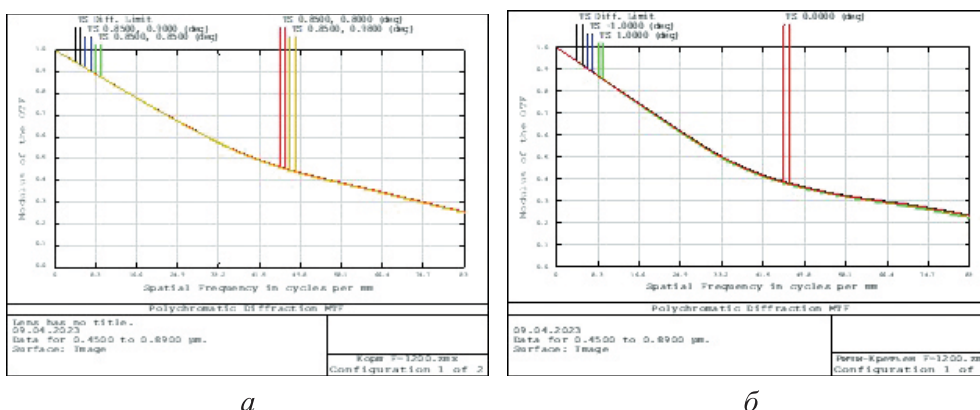
### Конструктивные параметры рассчитанных оптических систем

Номер оптической системы	$r$ , мм	$e^2$	$d$ , мм	$n_{\lambda = 0,65}$ , МКМ	Марка стекла
<i>Схема Корша</i>					
1	-110,46	-0,96991	-42,9 79,7	1	Ситалл CO115-М
2	-34,10	-2,78991		-1	
3	-49,22	-0,51557		1	
4	-	-		-1	-
<i>Схема Ричи — Кретьена с линзовым корректором</i>					
1	-201,68	-1,19793	-78,0	1	Ситалл CO115-М
2	-62,35	-5,38695	65,0	-1	
3	8,54	-	1,9	1	-
4	8,00	-	4,2	1,7526	LZ_СТК19
5	-11,61	-	4,9	1	-
6	-24,10	-	-	1,6189	LZ_TK14
				1	

Рассчитанный объектив по схеме Корша имеет длину  $\sim 80$  мм, длина объектива по схеме Ричи — Кретьена с двухлинзовым компенсатором равна  $\sim 90$  мм.

Окончательная коррекция полученных схем проводилась в пакете прикладных программ для моделирования и проектирования оптических систем Zemax [15]. В процессе оптимизации учитывалось, что разрешение оптических систем в большинстве случаев определяется согласованием фокусного расстояния, относительного отверстия, качества изображения и размера пикселей приемника изображения. Для высокораз-

решающих оптико-электронных комплексов согласование проводится по принципу равенства диаметра пятна рассеяния и размера пикселя. В рассматриваемом случае это 6...18 мкм. Оценку качества изображения принято проводить на характеристической частоте, равной  $2/3$  частоты Найквиста. Из теоремы Котельникова следует, что при дискретизации сигнала полезную информацию будут нести только частоты, которые ниже частоты Найквиста. Частота Найквиста равна  $1/(2d)$ , где  $d$  — размер пикселя матрицы. Для согласованной работы объектива с фильтром низких частот и приемника изображения необходимо, чтобы на характеристической частоте значение модуляционной передаточной функции (МПФ) было равно 0,4. В качестве оценочной функции использовалась МПФ оптической системы [14]. Рассчитанные и оптимизированные оптические системы для длин волн от 0,45 до 0,89 мкм имеют качество изображения, близкое к дифракционному. Модуляционные передаточные функции рассчитанных схем приведены на рис. 3.



**Рис. 3.** Скриншоты МПФ рассчитанных схем Корша (а) и Ричи — Кретьена (б) с линзовым корректором

Рассчитанные оптические системы по схемам Корша и Ричи — Кретьена с линзовым корректором были масштабированы по фокусному расстоянию на 19 вариантов [15, 16].

При расчете массы оптических систем в качестве материала зеркал выбрано стекло марки Ситалл СО115-М, поскольку оно имеет низкую плотность и относительно невысокий коэффициент температурного расширения по сравнению с карбидом кремния и бериллием [17]. Для схем Ричи — Кретьена в качестве линзового компенсатора использована комбинация из двух линз каталога LZOS [18]. Плотность линз составила от 2270 до 3480 кг/м<sup>3</sup> [17].

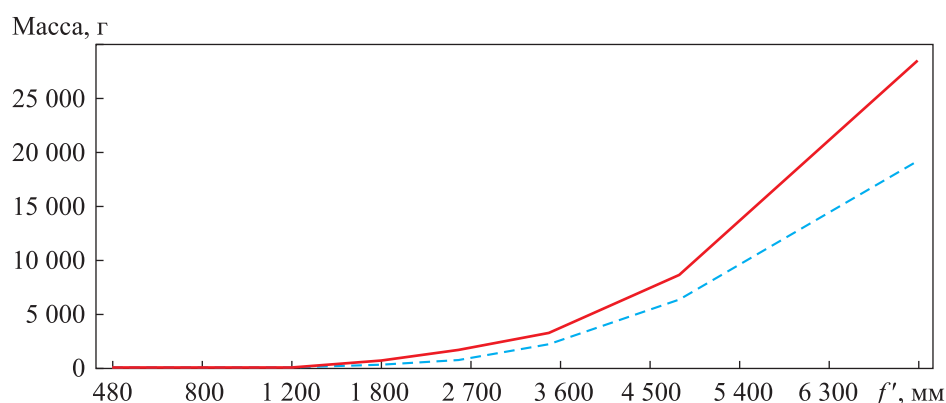
Расчет объема каждого оптического элемента проводился в программе КОМПАС. Плотность материала для зеркал составила  $2460 \text{ кг/м}^3$ . Для обеспечения достаточной прочности оптических элементов толщина подложки зеркал, диаметр которых менее 100 мм, установлена в размере 10 мм вдоль оптической оси. При диаметре зеркал более 100 мм толщина подложки зеркал вдоль оптической оси по отношению к диаметру устанавливалась в соотношении 1/10. Припуск к световым диаметрам взят в пределах 3...10 % диаметра в зависимости от светового диаметра оптического элемента [17]. Толщины линз вдоль оптической оси составили 3...50 мм в зависимости от диаметра апертуры и фокусного расстояния рассчитанных систем по схеме Ричи — Кретьена.

Для уменьшения абсолютного значения массы главного зеркала к зеркалам применялось «облегчение», при этом необходимо обеспечить удовлетворительное соотношение заданной жесткости конструкции при максимально возможном снижении ее массы. Для систем с диаметром апертуры менее 100 мм и толщиной оптических элементов по оптической оси 10 мм облегчение не рассчитывалось, так как такие детали не обеспечивают удовлетворительную жесткость при облегчении [17]. На практике для стекла марки Ситалл СО115-М коэффициент облегчения необходимо закладывать не более 0,65. При увеличении коэффициента облегчения оптические элементы с полным диаметром 100...700 мм не будут иметь достаточную жесткость. В связи с этим произойдет деформация рабочей поверхности с размахом  $PV$  более 0,1 длины волны в зависимости от типа крепления и числа точек крепления оптических элементов, что уже уменьшит коэффициент передачи модуляции (КПМ) системы на пространственной частоте  $83 \text{ мм}^{-1}$  более чем на 10 %.

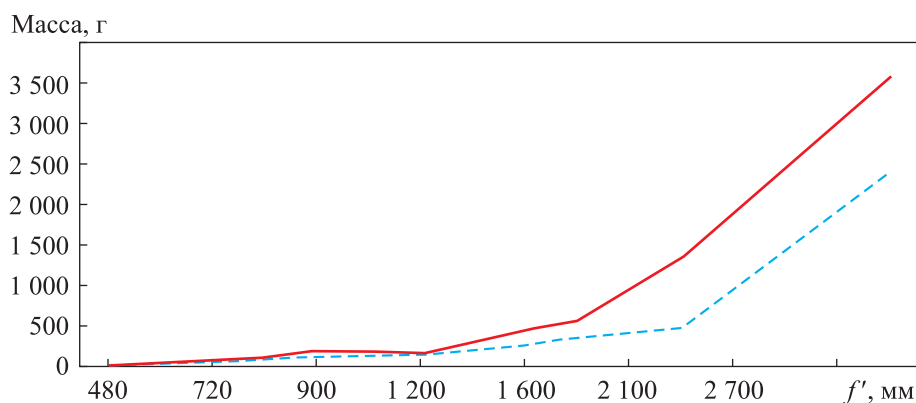
Зависимости массы оптических элементов схем Ричи — Кретьена и Корша с учетом коэффициента облегчения зеркал от их фокусного расстояния приведены на рис. 4.

Следует отметить, что для схем Корша в плоскости  $Y$  используется не полное поле  $2^\circ$ , а поле  $2\omega_y = 0,4^\circ$ , смещенное относительно оптической оси на соответствующую величину, что значительно уменьшает допустимый диаметр третьего зеркала в этой плоскости и соответственно уменьшает общую массу оптической системы по схеме Корша.

Для МКА интерес представляют оптические системы массой менее 4...5 кг [19]. В эту категорию попадают системы с фокусным расстоянием 3750 мм и менее (рис. 5).



**Рис. 4.** Зависимости массы оптических элементов схем Ричи — Кретьена (—) и Корша (---) с учетом коэффициента облегчения зеркал от их фокусного расстояния

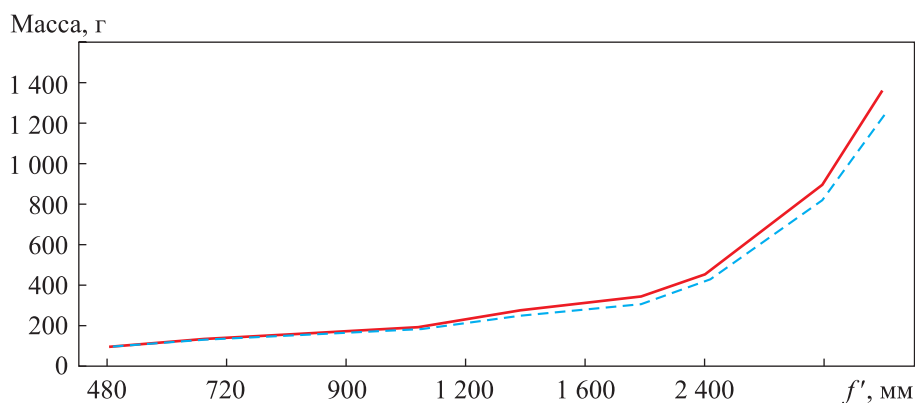


**Рис. 5.** Зависимости массы оптических систем по схемам Ричи — Кретьена (—) и Корша (---) от фокусного расстояния

Проведен анализ относительного вклада массы оптических элементов в суммарную массу схем с фокусными расстояниями 480...3600 мм. По результатам анализа выяснилось, что в относительную массу схем Ричи — Кретьена большой вклад вносит линзовый компенсатор — это 26,12 %, тогда как в схемах Корша вклад третьего зеркала в общую массу составляет лишь 6,6 %.

Для схемы Ричи — Кретьена масса второго зеркала для угловых полей  $0,25^\circ - 2,5^\circ$  увеличилась от 13,16 до 21,62 г, а для схемы Корша — от 14,46 до 17,34 г. В таком случае масса зеркал рассчитана по изменению диаметра в зависимости от углового поля при заданной толщине детали вдоль оптической оси 10 мм. Для схемы Корша менее заметно изменение массы вследствие изменения углового поля только в одной плоскости.

Зависимости длины рассчитанных систем по схемам Ричи — Кретьена и Корша вдоль оптической оси от их фокусного расстояния приведены на рис. 6.



**Рис. 6.** Зависимости длины рассчитанных систем по схемам Ричи — Кретьена (—) и Корша (---) вдоль оптической оси от их фокусного расстояния

Длина системы по схеме Ричи — Кретьена вдоль оптической оси рассчитана от второго зеркала до плоскости наилучшего изображения [13]. При расчете учитывается толщина зеркала 10 мм, если диаметр зеркала менее 100 мм, и толщина зеркала, равная 0,1 диаметра, если диаметр зеркала более 100 мм. Для системы по схеме Корша длина рассчитана от второго зеркала до третьего, так как плоскость наилучшего изображения расположена между главным и третьим зеркалом, с тем же условием на толщину, что и для схем Ричи — Кретьена.

**Обсуждение результатов.** Рассчитывая оптические системы по схемам Корша и Ричи — Кретьена с линзовым корректором полевых аберраций и анализируя массогабаритные характеристики оптических элементов данных систем определили вклад каждого оптического элемента в общую массу систем, на который можно ориентироваться при составлении технического задания и при предварительном проектировании МКА ДЗЗ. Для полноценной оценки общей массы аппаратуры необходимо проводить дополнительную работу по конструкторской части объективов. Масса несущей платформы с корпусной частью объектива также будет увеличиваться с увеличением габаритных размеров оптических систем.

Значение КПМ оптической системы по схеме Ричи — Кретьена в пределах углового поля  $2\omega = 2^\circ$  на пространственной частоте  $83 \text{ мм}^{-1}$  равно 0,23, в том же угловом поле и на той же пространственной частоте КПМ

оптической системы по схеме Корша — 0,25. Что является дифракционным пределом для данных систем при заданных апертурах. Для обеспечения разрешения на максимально высокой частоте Найквиста ( $83,3 \text{ мм}^{-1}$ ) ахроматический КПМ достаточно выдержать равным 0,1. Считая КПМ приемника излучения с приемным трактом равным 0,5, можно определить, что КПМ объектива на пространственной частоте  $83,3 \text{ мм}^{-1}$  должен быть не менее 0,2 [14]. Увеличение КПМ оптических систем ограничено дифракцией. Увеличение КПМ возможно за счет увеличения диаметра главного зеркала и уменьшения второго зеркала. Но для получения минимальных массогабаритных характеристик системы необходимо максимально уменьшать диаметр апертуры [20]. При уменьшении второго зеркала будет возрастать светосила главного зеркала и, как следствие, увеличиваться коэффициент пропорциональности изменения воздушного промежутка между зеркалами и смещением плоскости изображения. Неконтролируемый рост коэффициента пропорциональности приведет к повышенным требованиям к стабильности положения второго зеркала и, следовательно, к корпусной части объектива и системе его терморегулирования. Из имеющейся практики отметим, что целесообразно остановиться на коэффициенте пропорциональности, не превышающем 15–16.

Учитывая, что в относительную массу систем по схемам Ричи — Кретьена большой вклад (26,12 %) вносит линзовый компенсатор (тогда как в схемах Корша третье зеркало вносит в общий вклад массы лишь 6,6 %), массу компенсатора можно уменьшить путем уменьшения числа линз. Однако в этом случае не удастся исправить хроматические aberrации и угловое поле в пространстве изображений, в пределах которого полевые aberrации будут исправлены, будет уменьшаться. Таким образом, самый простой вариант уменьшения массы линзового компенсатора — сокращение углового поля и соответственно допустимых диаметров линз. Основным недостатком этого варианта — соответствующее ему сокращение линейного поля в пространстве предметов, т. е. полосы захвата аппаратуры. Возможно уменьшение числа линз путем введения асферики или киноформа на линзе, но это решение сильно снизит технологичность изделия.

Два разных оптических материала позволяют достичь ахроматической степени коррекции aberrаций. Как правило, подбором материалов линз можно уменьшить вторичный спектр, но не устранить его. Существенно улучшить коррекцию хроматических aberrаций и достичь апо-

хроматической степени исправления аберраций можно применяя три разных марки оптических материалов [7], но это приведет к существенному увеличению массы корректора и объектива в целом.

Угловое поле будет влиять на диаметр третьего зеркала схемы Корша, что отразится на массе зеркала через изменение объема в зависимости от диаметра. Отметим, что в схеме Корша третье зеркало работает не полным диаметром в одной из плоскостей, а определенной апертурой, рассчитанной под заданные угловые поля и соответственно смещенной относительно оптической оси.

Объективы по схеме Корша имеют, как правило, продольные габаритные размеры на 10...15 % меньше, чем двухзеркальные системы с линзовым корректором и их масса в среднем на 15 % меньше. С технологической точки зрения схема Корша имеет на одну асферическую поверхность больше при примерно одинаковых отступлениях асферических слоев.

**Выводы.** Разработана методика расчета оптических систем по схемам Корша и Ричи — Кретьена с линзовым корректором полевых аберраций. Оптические, технические параметры и характеристики объективов позволяют использовать их в качестве оптических систем для оптико-электронных комплексов МКА в широком диапазоне фокусных расстояний и габаритных размеров. Качество изображения оптических систем в процессе оптимизации можно довести до дифракционного предела.

Проведенная оценка вклада каждого оптического элемента в общую массу объективов в зависимости от фокусного расстояния позволяет на начальном этапе проектирования оптимально выбрать фотоприемное устройство, несущую платформу и разработать корпусную часть объектива для МКА.

Предложенная методика расчета и оценки массы объектива уже на начальном этапе проектирования МКА позволяет выбрать наилучшую оптическую схему, которая будет определять характеристики, массу и габаритные размеры МКА, что сократит процессы разработки и выбора носителя для запуска и в результате уменьшит себестоимость конечного продукта.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Landmapper-HD 1, ..., 20 (Corvus-HD). *space.skyrocket.de: веб-сайт*. URL: [https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/landmapper-hd.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/landmapper-hd.htm) (дата обращения: 29.09.2022).



- [2] Гансвинд И.Н. Малые космические аппараты — новое направление космической деятельности. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2018, № 12, с. 84–91. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.053>
- [3] Зимин И.И., Валов М.В., Кириллов В.А. Перспективы развития малых космических аппаратов АО «ИСС». *Наукоемкие технологии*, 2018, т. 19, № 12, с. 48–55.
- [4] Arkhipov S.A., Senik B.N., Zavarzin V.I. Developing and fabricating optical systems for prospective remote-earth-probe spacecraft. *J. Opt. Technol.*, 2013, vol. 80, no. 1, pp. 25–27. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.80.000025>
- [5] Zavarzin V.I., Mitrofanova Yu.S. System solutions for prospective hyperspectral equipment. *J. Opt. Technol.*, 2017, vol. 84, no. 4, pp. 226–230. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000226>
- [6] Архипов С.А., Заварзин В.И., Ли А.В. Зеркальные оптические системы для малогабаритной гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования Земли из космоса. *Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации. Матер. 10-й Междунар. науч.-практ. конф.* М., НТЦ УП РАН, 2017, с. 262–264.
- [7] Заварзин В.И., Зайцев И.М., Якубовский С.В. Оптическая система для малогабаритного космического аппарата дистанционного зондирования Земли формата CubeSat. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2023, № 3 (144), с. 18–32. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-3-18-32>
- [8] Атанов С.К. Проектирование многоспутниковых группировок на базе сверхмалых космических аппаратов. *ЕНУ им. Л.Н. Гумилева*, 2012, Спец. вып. URL: <https://dspace.enu.kz/handle/data/1020> (дата обращения: 20.11.2022).
- [9] Зайцев И.М., Морозов С.А. Схемотехнические решения ОЭА ДЗЗ для МКА формата CubeSat. *Матер. XVIII Всерос. НТК «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли»*. Сочи, 2022, с. 71–73.
- [10] Зайцев И.М., Якубовский С.В. Оптическая система для малогабаритного космического аппарата дистанционного зондирования Земли формата CubeSat. *Молодежь и будущее авиации и космонавтики*. М., Перо, 2022, с. 133–134.
- [11] Борисов Ю.И. Россия обладает всеми мощностями для серийного изготовления спутников. *roscosmos.ru: вебсайт*. URL: <https://www.roscosmos.ru/3851> (дата обращения: 17.11.2022).
- [12] Бакланов А.И. Анализ состояния и тенденции развития систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения. *Вестник СГАУ*, 2010, № 2, с. 80–91.
- [13] Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л., Машиностроение, 1969.
- [14] Мосягин Г.М., Лебедев Е.Н., Немтинов В.Б. Теория оптико-электронных систем. М., Машиностроение, 1990.
- [15] Software Zemax 13. Optical design program. User's manual. Redmond, Radiant Zemax LLC, 2014.
- [16] Заварзин В.И., Батшев В.И., Польщикова О.В. Компьютерные технологии и моделирование в оплотехнике. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.



- [17] Панов В.А., ред. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Л., Машиностроение, 1980.
- [18] Zavarzin V.I., Kravchenko S.O., Mitrofanova Y.S. Selection of optical materials to minimize longitudinal chromatic aberration in a prospective broad-coverage medium-resolution multispectral instrument. *J. Opt. Technol.*, 2016, vol. 83, no. 10, pp. 593–598. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.83.000593>
- [19] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., Наука, 1973.
- [20] Аблеков В.К., ред. Космическая оптика. Труды IX Международного конгресса Международной комиссии по оптике. М., Машиностроение, 1980.

**Заварзин Валерий Иванович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», декан факультета «Оптико-электронное приборостроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Орешечкин Сергей Сергеевич** — главный специалист тематического научно-проектного отдела средств ДЗЗ ПАО КМЗ (Российская Федерация, 143400, Московская обл., г. Красногорск, Речная ул., д. 8).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Заварзин В.И., Орешечкин С.С. Проектирование оптических схем Корша и Ричи — Кретьена с линзовым корректором для малогабаритных систем дистанционного зондирования Земли. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2023, № 4 (145), с. 4–23.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-4-4-23>

**DESIGNING KORSCH AND RITCHEY — CHRÉTIEN OPTICAL SCHEMES WITH A LENS CORRECTOR FOR THE SMALL-SIZED EARTH REMOTE SENSING SYSTEMS**

V.I. Zavarzin<sup>1</sup>

[zavarzin@bmstu.ru](mailto:zavarzin@bmstu.ru)

S.S. Oreshechkin<sup>2</sup>

[s.oreshechkin@zenit-kmz.ru](mailto:s.oreshechkin@zenit-kmz.ru)

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> PJSC KMZ, Krasnogorsk, Moscow Region, Russian Federation

**Abstract**

The paper considers the Ritchey — Chrétien optical system with the field aberration lens corrector and the three-mirror Korsch scheme, which could be used as the high-resolution systems for small spacecraft, including the CubeSat format. Lens calculation and mass-dimensional characteristics analysis of their optical

**Keywords**

*Small-sized spacecraft, Earth remote sensing, Korsch scheme, Ritchey — Chrétien scheme*

elements were performed. It presents main optical and technical parameters, as well as the optical systems characteristics, for small spacecraft. Using the modulation transfer function of the optical system, the image quality was assessed. It is shown that the optical elements masses of the Korsch and Ritchey — Chrétien schemes with a lens corrector depend not only on the system focal length and the input aperture diameter, but also on the angular field, which, in turn, depends on the required system capture band and the lightweight mirror manufacture technology. Mass-dimension and aberration capabilities of the calculated schemes were analyzed with the mass of optical elements less than 5 kg being of greatest interest when creating a multi-component satellite constellation of small spacecraft. It is shown that the methodology for calculating and estimating the lens mass already at the initial stage of designing small spacecraft makes it possible to select the best optical design that would determine their characteristics, mass and overall dimensions, which would shorten the development process, selection of a launch vehicle and reduce the final product cost

Received 27.06.2023

Accepted 01.09.2023

© Author(s), 2023

---

## REFERENCES

- [1] Landmapper-HD 1, ..., 20 (Corvus-HD). *space.skyrocket.de: website*. Available at: [https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/landmapper-hd.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/landmapper-hd.htm) (accessed: 29.09.2022).
- [2] Gansvind I.N. Small spacecraft — new direction in space activities. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2018, no. 12, pp. 84–91 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.053>
- [3] Zimin I.I., Valov M.V., Kirillov V.A. Development prospect of JSC “ISS” small satellites. *Naukoemkie tekhnologii* [Science Intensive Technologies], 2018, vol. 19, no. 12, pp. 48–55 (in Russ.).
- [4] Arkhipov S.A., Senik B.N., Zavarzin V.I. Developing and fabricating optical systems for prospective remote-earth-probe spacecraft. *J. Opt. Technol.*, 2013, vol. 80, no. 1, pp. 25–27. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.80.000025>
- [5] Zavarzin V.I., Mitrofanova Yu.S. System solutions for prospective hyperspectral equipment. *J. Opt. Technol.*, 2017, vol. 84, no. 4, pp. 226–230. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000226>
- [6] Arkhipov S.A., Zavarzin V.I., Li A.V. [Mirror optical systems for space compact hyperspectral imagers of remote sensing of the Earth]. *Akustoopticheskie i radiolokatsionnye metody izmereniy i obrabotki informatsii. Mater. 10-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Acousto-Optical and Radar Methods of Measurements and Information

Processing. Proc. Int. Sc.-Pract. Conf.]. Moscow, NTTs UP RAN Publ., 2017, pp. 262–264 (in Russ.).

[7] Zavarzin V.I., Zaytsev I.M., Yakubovskiy S.V. Optical system for the Earth remote sensing small-sized spacecraft of the CubeSat format. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2023, no. 3 (144), pp. 18–32 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-3-18-32>

[8] Atanov S.K. Designing of multisatellite groupings on the basis of midget space vehicles. *ENU im. L.N. Gumileva* [Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University], 2012, Spec. iss. (in Russ.). Available at: <https://dspace.enu.kz/handle/data/1020> (accessed: 20.11.2022).

[9] Zaytsev I.M., Morozov S.A. [OEA remote sensing chemotechnical solutions for CubeSat MCAs]. *Mater. XVIII Vseros. NTK “Sistemy nablyudeniya, monitoringa i distantsionnogo zondirovaniya Zemli”* [Proc. XVIII Russ. Sc.-Tech. Conf. Systems of Earth Observation, Monitoring and Remote Sensing], Sochi, 2022, pp. 71–73 (in Russ.).

[10] Zaytsev I.M., Yakubovskiy S.V. [Optical system for small spacecraft for remote sensing of the Earth in the CubeSat format]. V: *Molodezh i budushchee aviatsii i kosmonavtiki* [Youth and the Future of Aviation and Cosmonautics]. Moscow, Pero Publ., 2022, pp. 133–134 (in Russ.).

[11] Borisov Yu.I. Rossiya obladaet vsemi moshchnostyami dlya seriynogo izgotovleniya sputnikov. *roscosmos.ru: website* (in Russ.).

Available at: <https://www.roscosmos.ru/3851> (accessed: 17.11.2022)

[12] Baklanov A.I. Status analysis and progress trends of high- and ultrahighresolution imaging systems. *Vestnik SGAU*, 2010, no. 2, pp. 80–91 (in Russ.).

[13] Slyusarev G.G. Metody rascheta opticheskikh system [Methods of calculation of optical systems]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1969.

[14] Mosyagin G.M., Lebedev E.N., Nemtinov V.B. Teoriya optiko-elektronnykh system [Theory of optoelectronic systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990.

[15] Software Zemax 13. Optical design program. User’s manual. Redmond, Radiant Zemax LLC, 2014.

[16] Zavarzin V.I., Batshev V.I., Polshchikova O.V. Kompyuternye tekhnologii i modelirovanie v optotekhnike [Computer technologies and modeling in optotechnics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017.

[17] Panov V.A., ed. Spravochnik konstruktora optiko-mekhanicheskikh priborov [Handbook of the designer of optical-mechanical devices]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1980.

[18] Zavarzin V.I., Kravchenko S.O., Mitrofanova Y.S. Selection of optical materials to minimize longitudinal chromatic aberration in a prospective broad-coverage medium-resolution multispectral instrument. *J. Opt. Technol.*, 2016, vol. 83, no. 10, pp. 593–598.

DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.83.000593>

[19] Born M., Wolf E. Principles of optics. Cambridge, Cambridge University Press, 1980.

[20] Ablekov V.K., ed. Kosmicheskaya optika. Trudy IX Mezhdunarodnogo kongressa Mezhdunarodnoy komissii po optike [Space optics. Proceedings of the IX International Congress of the International Commission on Optics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980.

**Zavarzin V.I.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Dean of the Department of Optoelectronic Instrumental Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Oreshechkin S.S.** — Research Engineer, Chief Specialist, Department of Thematic Research and Design of the Earth Remote Sensing Systems, PJSC KMZ (Rechnaya ul. 8, Krasnogorsk, Moscow Region, 143400 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Zavarzin V.I., Oreshechkin S.S. Designing Korsch and Ritchey — Chrétien optical schemes with a lens corrector for the small-sized Earth remote sensing systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2023, no. 4 (145), pp. 4–23 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-4-4-23>