

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ФОРМАТА CUBESAT

В.И. Заварзин¹

zavarzin@bmstu.ru

И.М. Зайцев²

zajcev06061997@mail.ru

С.В. Якубовский²

yakubovskiystas@mail.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² ПАО КМЗ, г. Красногорск, Московская обл., Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрена актуальность создания малогабаритных оптических систем высокого разрешения для малых космических аппаратов. Приведено описание текущего состояния отечественных и зарубежных средств дистанционного зондирования Земли формата CubeSat, подтвердившее необходимость разработки отечественных многосоставных спутниковых группировок. В отличие от крупногабаритных космических аппаратов формат CubeSat подразумевает исполнение спутников микроформата. В целях сокращения габаритных размеров системы и минимизации влияния хроматических аберраций на качество изображения при выборе компонентов оптической схемы, как правило, отдают предпочтение зеркалам. Среди возможных схем построения оптическая схема Ричи — Кретьена является наиболее перспективной из-за своей простоты, малых габаритных размеров и высоких оптических показателей в широком спектральном диапазоне для спутников формата CubeSat. Приведены основные оптические, технические параметры и характеристики оптических систем для малогабаритных космических аппаратов. Для типовых систем предложена методика расчета и создана имитационная модель, которая позволила оценить качество изображения оптической системы. За критерий оценки качества изображения принято среднеквадратическое значение радиуса пятна рассеяния точки в плоскости изображения. Показано, что оптическая схема Ричи — Кретьена и ее элементы характеризуются относительной простотой реализации ввиду

Ключевые слова

Малогобаритный космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, формат CubeSat, схема Ричи — Кретьена

использования изученных технологий изготовления линзовых и зеркальных элементов при обеспечении высокого качества изображения и требуемых габаритных размеров, что позволяет использовать их при создании многосоставной спутниковой группировки

Поступила 11.03.2023

Принята 07.04.2023

© Автор(ы), 2023

Введение. В последнее десятилетие эффективным инструментом получения объективной информации о земной поверхности является дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) с помощью атмосферных или космических аппаратов (КА). Постоянно обновляемые базы данных ДЗЗ — наиболее оперативные, надежные и эффективные источники информации для мониторинга состояния и динамических изменений природных систем, земных ландшафтов, инфраструктурных объектов. Потребность в систематической сплошной съемке земной поверхности с минимальным временным интервалом между просмотром любого района с приемлемыми затратами привела к коренным изменениям структуры космических средств ДЗЗ. Переход от съемки объектов или территорий тяжелыми спутниками сверхдетального разрешения на местности (~ 1 м и менее) к систематической глобальной съемке обеспечили многосоставные спутниковые группировки на низких околоземных орбитах при поддержании структуры их размещения и восполнении численности по истечении срока активного существования или схода с орбиты [1]. Таким образом, технологии ДЗЗ сегодня являются важным производственным ресурсом, совокупные объемы которого в ближайшие годы будут расти на 8...12 % в год [2].

Для увеличения российской космической группировки ДЗЗ Правительством России утвержден федеральный проект «Комплексное развитие космических информационных технологий» («Сфера»). Его основа — пять орбитальных группировок связи и пять новых группировок ДЗЗ на базе малых КА (МКА), которые позволятратно увеличить орбитальную группировку и кардинально повысить ее ценность для потребителей [3].

Развитие информационных возможностей (в том числе с использованием искусственного интеллекта) и элементной базы оптико-электронного приборостроения и технологий делают реальным создание цифрового изображения поверхности Земли практически в реальном масштабе времени. Для обеспечения высокой периодичности наблюдения необходимо увеличивать число КА, а унификация и универсальность должны уменьшить себестоимость конечного продукта [4].

Постановка задачи. Общемировой тенденцией сегодня является объединение разнотипных КА в космическую группировку с единым инфор-

мационным центром. Основу таких группировок составляют малогабаритные спутники. Широкое применение получили МКА формата CubeSat, используемые в различных отраслях науки и техники: научно-образовательных программах, ДЗЗ, тестировании оборудования, услуг связи и т. д. Размер одного блока формата CubeSat, также называемого юнитом (U), составляет $100 \times 100 \times 100$ мм. В мировой классификации по массе спутники формата CubeSat, состоящие из 1–16 блоков, занимают место между спутниками пико (до 1 кг) и спутниками микро (до 100 кг).

Характеристики некоторых отечественных и зарубежных МКА ДЗЗ формата CubeSat [5–7] приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики МКА ДЗЗ формата CubeSat

МКА	Страна	Формат U	Масса, кг	Высота орбиты, км	Разрешение Δ , м	Полоса захвата, км
«ОрбиКрафт — Зоркий»	РФ	6	8,5	550	6,6	16
Flock (Dove)	США	3	4,5	400–475	2,7 (3,7) – 5	$10,9 \times 7,3$ при $\Delta = 2,7$ м
Landmapper-HD	США	16	20	475–625	2,5	25

За рубежом активно разворачиваются спутниковые группировки для ДЗЗ [8]. Спутниковая группировка МКА Flock (Dove) компании Planet Labs (США) составляет более 200 спутников, а спутниковая группировка МКА Landmapper-HD компании Astro Digital (США) — 20 спутников. В России запущен только один экспериментальный малый спутник формата CubeSat для ДЗЗ — МКА «ОрбиКрафт — Зоркий».

Отметим, что в настоящее время является актуальным создание отечественной многосоставной спутниковой группировки, основой которой могут стать МКА с оптической системой (ОС) со следующими характеристиками [9, 10]:

- максимальный диаметр главного зеркала не более 90 мм;
- коэффициент центрального экранирования не более 0,3;
- относительное отверстие 1 : 10;
- вынос изображения за вершину главного зеркала не более 50 мм;
- спектральный диапазон 0,50...0,89 мкм;
- угловое поле $2\omega_x = 0,6^\circ$, $2\omega_y = 1,16^\circ$;
- продольная длина системы не более $3U$.

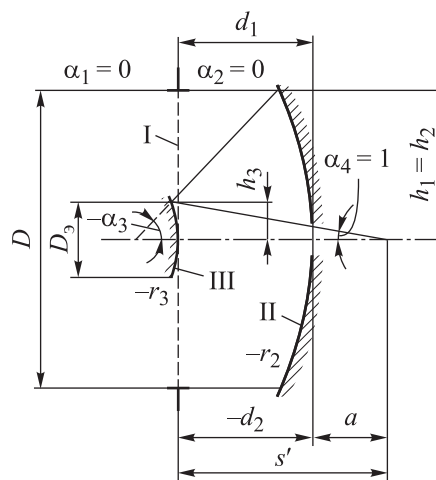
Наиболее востребованным продуктом ДЗЗ является цифровое изображение Земли с пространственным разрешением 1 м и менее. Разрешение ОС определяется согласованием фокусного расстояния, относительного отверстия, качества изображения и размера пикселей приемника изображения. Для высокоразрешающих оптико-электронных комплексов согласование проводится, как правило, по принципу равенства диаметра пятна рассеяния и размера пикселя (6...12 мкм) [11, 12].

Цель настоящей работы — исследование возможности создания простой, технологичной и относительно дешевой ОС с высоким качеством изображения для МКА ДЗЗ формата CubeSat.

Решение задачи. Ввиду габаритных ограничений, накладываемых форматом CubeSat, в настоящее время наиболее реализуемыми являются зеркальная схема Кассегрена и ее модификация — схема Ричи — Кретьена (апланатическая версия схемы Кассегрена), приведенная на рис. 1. Уменьшение комы достигается путем замены параболоидального главного зеркала гиперболоидом, так что оба зеркала становятся однотипными коническими сечениями [13].

Рис. 1. К габаритному расчету схемы Ричи — Кретьена:

D — диаметр главного зеркала;
 D_3 — диаметр вторичного экранирующего зеркала; α_i, h_i — углы и высоты (определяются нормировкой) первого вспомогательного луча; d_i — расстояния между поверхностями I и II и поверхностями II и III; a — вынос плоскости изображения за вершину главного зеркала; s' — задний фокальный отрезок



Расчет ОС выполним в три этапа. На первом этапе проведем габаритный расчет зеркальной системы, на втором этапе рассмотрим возможный вариант схемного решения корректора aberrаций, присущих классической схеме Ричи — Кретьена, на третьем этапе выполним оптимизацию полученной ОС.

Плоскость I (плоскость входного зрачка) является мнимой и расположена на вершине поверхности III. Поэтому нумерация поверхностей зеркал объектива начинается со второй (поверхности II и III).

Условия нормировки для данной ОС следующие: $h_1 = f$, $h_2 = h_1$, $h_3 = h_1\eta$ (η — коэффициент центрального экранирования), $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, $\alpha_4 = 1$, $n_1 = 1$, $n_2 = 1$, $n_3 = -1$, $n_4 = 1$.

Диаметр вторичного экранирующего зеркала D_3 определяется из условия

$$D_3 = D\eta; \quad (1)$$

фокусное расстояние f' — по формуле

$$f' = DK, \quad (2)$$

где K — диафрагменное число.

С учетом условий нормировки угол α_3 можно записать в виде

$$\alpha_3 = \frac{\eta - 1}{\eta - a/h_1}; \quad (3)$$

$$\alpha_3 = \frac{2h_1}{r_2}. \quad (4)$$

Расстояния между зеркалами d_1 и d_2 с учетом условий нормировки определяются следующим образом:

$$d_1 = -d_2;$$

$$d_2 = h_1 \left(\frac{a}{h_1} - \eta \right). \quad (5)$$

Положение изображения s' (расстояние от вершины поверхности III до фокальной плоскости) вычисляется как

$$s' = a - d_2. \quad (6)$$

С учетом нормировки, а также формул углов и высот, радиусы зеркал определяются так:

$$r_2 = \frac{2h_1(a/h_1 - \eta)}{1 - \eta}; \quad (7)$$

$$r_3 = \frac{2h_3(a/h_1 - \eta)}{a/h_1 + 1 - 2\eta}. \quad (8)$$

В результате габаритного расчета (1)–(8) получены следующие конструктивные параметры и характеристики ОС:

- радиусы главного и вторичного зеркал $r_2 = -628,57$ мм и $r_3 = -289,76$ мм;
- расстояния между зеркалами $d_2 = -220$ мм;
- положение изображения $s' = 270$ мм;
- квадраты эксцентриситетов главного зеркала и контрзеркала $\varepsilon_1^2 = 1,1$ и $\varepsilon_2^2 = 4,8$;
- продольная длина оптической системы $L = 270$ мм.

Проверка угла α_3 по формулам (3) и (4) показывает полное совпадение значений ($\alpha_3 = -2,863$ и $2h_1/r_2 = -2,863$), что подтверждает верность расчетов.

Моделирование рассчитанной ОС проведем в программе *Zemax* и оценим качество изображения [14, 15]. В качестве критерия оценки качества изображения используется среднеквадратический размер (RMS) пятна рассеяния в плоскости изображения. Диаграмма пятна рассеяния ОС в заданном угловом поле приведена на рис. 2.

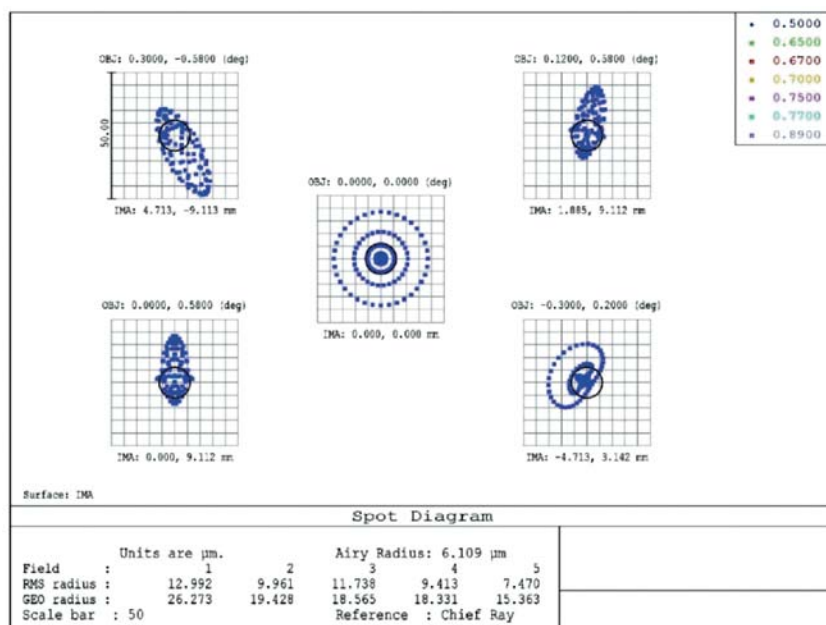


Рис. 2. Скриншот диаграммы пятна рассеяния ОС в заданном угловом поле, полученной в программе *Zemax*

Синтезированная система имеет следующие aberrации (по абсолютному значению): меридиональная кома не более 0,0105 мм; астигматическая разность не более 0,3 мм; дисторсия не более 0,2 %, среднеквадратическое значение радиуса пятна рассеяния 12,99 мкм.

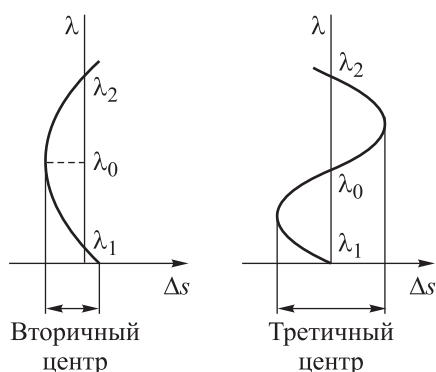


Рис. 3. Исправление хроматических aberrаций

абerrаций необходимо устранение не только хроматизма положения, но и значительное уменьшение вторичного спектра. Для этого необходимо, чтобы компенсатор aberrаций имел апохроматическую степень коррекции хроматических aberrаций. До 60–70-х гг. XX в. полагалось, что для получения апохроматов необходимо применение особых стекол. В настоящее время показано, что в трехлинзовой тонкой ОС может быть исправлен вторичный спектр и существенно уменьшен третичный спектр при использовании обычных стекол (рис. 3) [16, 17].

Для ахроматизации тонкого линзового компенсатора в зеркально-линзовой схеме необходимо выполнение следующего условия [18, 19]:

$$s_{I \text{ хром}} = \sum_{a=1}^{a=n} C_a = 0,$$

где

$$C_a = \begin{pmatrix} \alpha'_a - \alpha_a \\ \frac{1}{n'_a} - \frac{1}{n_a} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta n'_a \\ \Delta n_a \end{pmatrix}.$$

После расчета схемы Ричи — Кретьена с линзовым компенсатором в сходящихся пучках (рис. 4) проведена оптимизация в программе *Zemax* в целях улучшения качества изображения и достижения требуемых габаритных характеристик.

Полученные конструктивные параметры оптимизированной ОС с компенсатором приведены в табл. 2.

Продольная длина полученной ОС $L = 212,5$ мм. Зеркально-линзовый объектив имеет следующие aberrации для длины волны $\lambda_0 = 0,70$ мкм

(по абсолютному значению): меридиональная кома не более 0,0015 мм; астигматическая разность не более 0,03 мм; дисторсия не более 0,14 %; среднеквадратическое значение радиуса пятна рассеяния 1,9 мкм.

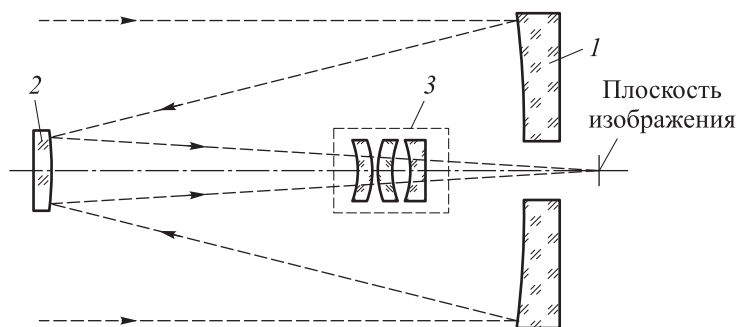


Рис. 4. Схема Ричи — Кретьена с трехлинзовым компенсатором:
1 — главное зеркало; 2 — контрзеркало; 3 — линзовый компенсатор

Таблица 2

Конструктивные параметры ОС с компенсатором

Радиус, мм	Толщина, мм	Компенсатор аберрации	Показатель преломления для длины волны $\lambda_0 = 0,70$ мкм	Квадрат эксцентриситета ε^2
–	–	Воздух	1	–
∞	200	Воздух	1	–
–370,44	–143,35	Зеркало	–1	1,25
–120,31	93,92	Зеркало	1	7,27
–17,75	3,55	Стекло LZ_F13	1,61029474	–
–18,81	1,2	Воздух	1	–
29,47	4,5	Стекло LZ_BF21	1,60559826	–
47,43	5,38	Воздух	1	–
–37,76	4,8	Стекло LZ_TK20	1,61552089	–
103,83	42,53	Воздух	1	–

Диаграмма пятна рассеяния полученной ОС приведена на рис. 5. Оптическая система имеет высокое качество изображения, так как максимальный радиус пятна рассеяния (RMS-radius), составляющий 1,9 мкм, не превышает радиуса кружка Эйри (Airy Radius), равного 6,1 мкм. Таким образом, ОС соответствует требованиям, характеристикам и габаритным размерам, предъявляемым к системам, используемым в МКА формата CubeSat.

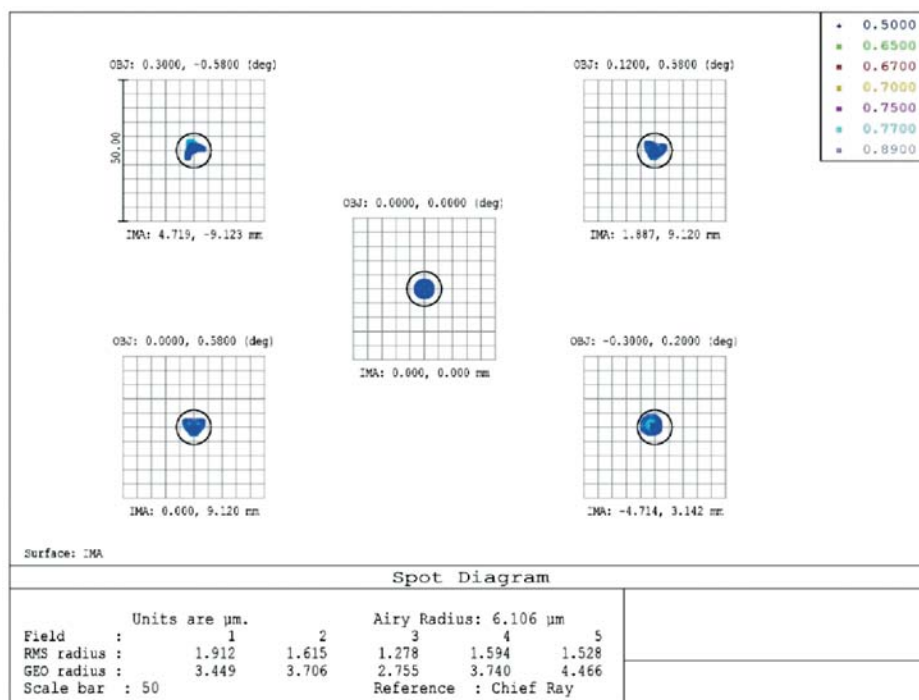


Рис. 5. Скриншот диаграммы пятна рассеяния ОС, полученной в программе *Zemax*

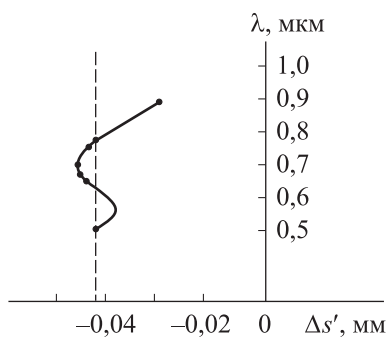


Рис. 6. Хроматизм положения ОС в плоскости наилучшей установки

Хроматизм положения полученной ОС в плоскости наилучшей установки показан на рис. 6. Пересечение штриховой вертикали графиком в трех местах свидетельствует о том, что полученный объектив является апохроматом [19, 20].

Обсуждение полученных результатов.

Реализация схемных решений ОС для МКА формата CubeSat (из-за габаритных размеров, массы и высокого качества изображения) представляет довольно трудно решаемую задачу. Двухзеркальная система Кассегрена, в отличие от ее вариации — схемы Ричи — Кретьена с линзовым компенсатором, имеет достаточно большие продольные габаритные размеры, что негативно влияет на массогабаритные характеристики КА. Линзовый корректор вблизи плоскости изображения позволяет уменьшить на 15...20 % продольные габаритные размеры системы. В общем случае объектив, построенный на основе схемы Ричи — Кретьена, имеет большую све-

тосилу, угловое поле, относительно прост для конструирования и удовлетворяет требованиям к ОС для МКА формата CubeSat.

Объективы по схеме Ричи — Кретьена с линзовым компенсатором имеют апохроматическую степень коррекции хроматических аберраций, но при этом присутствуют остаточный хроматизм (третичный спектр порядка 10...15 мкм) и его увеличение при расширении спектрального диапазона в длинноволновую область спектра до 1 мкм.

Схема Ричи — Кретьена не лишена недостатков, например, имеются трудности в определении оптических осей асферических зеркал, юстировки их взаимной соосности и соосности с линзовым компенсатором. Правда, для ОС с главным зеркалом диаметром до 100 мм эта проблема может быть решена с помощью многозональной голограммы, технология изготовления и применения которой в настоящее время разработаны.

Число линз в схеме можно уменьшить, используя асферические линзы или киноформный элемент, который позволяет целенаправленно изменять фазу волнового фронта, проходящего через него. Такие нововведения, безусловно, приведут к уменьшению массы объектива, но существенно снизят технологичность и увеличат его себестоимость.

Заключение. Зеркально-линзовый объектив, построенный на основе оптической схемы Ричи — Кретьена, позволяет получать изображение высокого качества, близкое к дифракционному, при обеспечении минимальных массогабаритных характеристик. Зеркала объектива представляют собой асферические поверхности второго порядка, а трехлинзовый корректор в сходящихся пучках лучей может быть исправлен от вторичного спектра и иметь существенно уменьшенный третичный спектр при использовании обычных стекол из каталога LZOS.

Это позволяет создать оптико-электронную аппаратуру для МКА формата CubeSat, характеризующуюся относительной простотой реализации ввиду использования изученных технологий изготовления линзовых и зеркальных элементов при обеспечении высокого качества изображения и минимальных габаритных размеров.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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>
- [2] Remote Sensing Technology. Market estimates and Trend analysis to 2027. San Francisco, Grand View Research, 2020.

- [3] Борисов Ю.И. Россия обладает всеми мощностями для серийного изготовления спутников. *roscosmos.ru: веб-сайт*. URL: <https://roscosmos.ru/38511> (дата обращения: 17.11.2022).
- [4] 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).
- [5] Flock-1, -1b, -1c, -1d, -1d', -1e, -1f, -2b, -2e, -2e', -2k, -2p, -3m, -3p, -3p', -3r, -3s, -4a, -4e, -4e', -4p, -4s, -4v, -4x. *space.skyrocket.de: веб-сайт*. URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/flock-1.htm (дата обращения: 12.09.2022).
- [6] Landmapper-HD 1, ..., 20 (Corvus-HD). *space.skyrocket.de: веб-сайт*. URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/landmapper-hd.htm (дата обращения: 29.09.2022).
- [7] Бакланов А.И. Анализ состояния и тенденции развития систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения. *Вестник СГАУ*, 2010, № 2, с. 80–91.
- [8] 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.
- [9] Зайцев И.М., Морозов С.А. Схемотехнические решения ОЭА ДЗЗ для МКА формата CubeSat. *Матер. XVIII Науч.-техн. конф. «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли»*, 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] 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>
- [12] Заварзин В.И., Ли А.В. Расчет центрированного зеркального объектива с эксцентрично расположенным полем изображения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана Сер. Приборостроение*, 2016, № 2 (107), с. 103–116. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2016-2-103-116>
- [13] Заварзин В.И. Двухзеркальные оптические системы с заданным значением сферической аберрации и требуемым изопланатизмом. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана Сер. Приборостроение*, 2003, № 3 (52), с. 29–43.
- [14] Software Zemax 13. Optical design program. User's manual. Redmond, Radiant Zemax LLC, 2014.
- [15] Заварзин В.И., Батшев В.И., Польщикова О.В. Компьютерные технологии и моделирование в оплотехнике. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.
- [16] 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>

- [17] Парко В.Л., Хацевич Т.Н. Апохроматический объектив без использования особых стекол. *Сб. матер. VII Междунар. науч. конг. «ГЕО-Сибирь-2010»*. Новосибирск, СГГА, 2010, с. 125–129.
- [18] Грамматин А.П. Синтез оптических систем, состоящих из линз с апланатическими и изопланатическими поверхностями и бесконечно тонких компонентов. *Труды ГОИ*, 1981, т. 49, № 183, с. 23–24.
- [19] Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л., Машиностроение, 1969.
- [20] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., Наука, 1973.

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).

Зайцев Иван Михайлович — инженер-исследователь тематического научно-проектного отдела средств ДЗЗ ПАО КМЗ (Российская Федерация, 143400, Московская обл., г. Красногорск, Речная ул., д. 8).

Якубовский Станислав Владимирович — инженер-исследователь 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., 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>

**OPTICAL SYSTEM FOR THE EARTH REMOTE SENSING
SMALL-SIZED SPACECRAFT OF THE CUBESAT FORMAT**

V.I. Zavarzin¹

zavarzin@bmstu.ru

I.M. Zaytsev²

zajcev06061997@mail.ru

S.V. Yakubovskiy²

yakubovskiy@bmstu.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² PJSC KMZ, Krasnogorsk, Moscow Region, Russian Federation

Abstract

The paper considers relevance of creating the small-sized high-resolution optical systems for the small spacecraft. It describes the current state of domestic and foreign systems engaged in the Earth remote sensing of the CubeSat format that confirmed the need to de-

Keywords

Small spacecraft, Earth remote sensing, CubeSat format, Ritchey — Chrétien scheme

velop domestic multi-component satellite constellations. Unlike the large-sized spacecraft, the CubeSat standard implies introduction of the micro-format satellites. In order to reduce overall dimensions of the system and minimize the chromatic aberrations effect on the image quality in selecting the optical scheme components, mirrors are preferred, as a rule. Among all possible design schemes, the Ritchey — Chrétien optical scheme is the most promising due to its simplicity, small overall dimensions and high optical performance in a wide spectral range for the CubeSat satellites. Main optical and technical parameters, as well as the optical system characteristics for a small spacecraft are provided. For typical systems, the paper proposes a calculation technique; and a simulation model was created making it possible to assess the optical system image quality. The root-mean-square value of the point scatter spot radius in the image plane was taken as the criterion in evaluating the image quality. It is shown that the Ritchey — Chrétien optical scheme and its elements are characterized by its relative easiness in implementation due to using the studied technologies of the lens and mirror elements manufacture and ensuring high image quality and required overall dimensions, which makes it possible to use them in creating a multi-component satellite constellation

Received 11.03.2023

Accepted 07.04.2023

© Author(s), 2023

REFERENCES

- [1] 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>
- [2] Remote Sensing Technology. Market estimates and Trend analysis to 2027. San Francisco, Grand View Research, 2020.
- [3] Borisov Yu.I. Rossiya obladaet vsemi moshchnostyami dlya seriynogo izgotovleniya sputnikov. *roscosmos.ru: website*. Available at: <https://www.roscosmos.ru/38511> (accessed: 17.11.2022) (in Russ.).
- [4] 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. Available at: <https://dspace.enu.kz/handle/data/1020> (accessed: 20.11.2022) (in Russ.).
- [5] Flock-1, -1b, -1c, -1d, -1d', -1e, -1f, -2b, -2e, -2e', -2k, -2p, -3m, -3p, -3p', -3r, -3s, -4a, -4e, -4e', -4p, -4s, -4v, -4x. *space.skyrocket.de: website*. Available at: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/flock-1.htm (accessed: 12.09.2022).

- [6] Landmapper-HD 1, ..., 20 (Corvus-HD). *space.skyrocket.de: website*. Available at: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/landmapper-hd.htm (accessed: 29.09.2022).
- [7] Baklanov A.I. A Status analysis and progress trends of high- and ultrahighresolution imaging systems. *Vestnik SGAU*, 2010, no. 2, pp. 80–91 (in Russ.).
- [8] 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.).
- [9] Zaytsev I.M., Morozov S.A. [OEA remote sensing chemotechnical solutions for CubeSat MCAs]. *Mater. XVIII Nauch.-tekh. konf. “Sistemy nablyudeniya, monitoringa i distantsionnogo zondirovaniya Zemli”*. [Proc. XVIII Sc.-Tech. Conf. Systems of Earth Observation, Monitoring and Remote Sensing], 2022, pp. 71–73 (in Russ.).
- [10] Zaytsev I.M., Yakubovskiy S.V. [Optical system for a small spacecraft for Earth remote sensing in the CubeSat format]. *Molodezh i budushchee aviatsii i kosmonavtiki* [Youth and the Future of Aviation and Cosmonautics]. Moscow, Pero Publ., 2022, pp. 133–134 (in Russ.).
- [11] 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>
- [12] Zavarzin V.I., Li A.V. Calculation of the centered reflecting objective with eccentrically located image field. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2016, no. 2 (107), pp. 103–116 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2016-2-103-116>
- [13] Zavarzin V.I. Two-mirror optical systems with specified spherical aberration and required deviation from sine condition. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2003, no. 3 (52), pp. 29–43 (in Russ.).
- [14] Software Zemax 13. Optical design program. User’s manual. Redmond, Radiant Zemax LLC, 2013.
- [15] 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.
- [16] 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>
- [17] Parko V.L., Khatsevich T.N. [Achromatic lens without the use of special glasses]. *Sb. mater. VII Mezhdunar. nauch. kong. “GEO-Sibir-2010”* [Proc. VII Int. Sc. Cong. GEO-Sibir-2010]. Novosibirsk, SGGGA Publ., 2010, pp. 125–129 (in Russ.).
- [18] Grammatin A.P. Synthesis of optical systems consisting of lenses with aplanatic and isoplanatic surfaces and infinitely thin components. *Trudy GOI*, 1981, vol. 49, no. 183, pp. 23–24 (in Russ.).

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

[20] Born M., Wolf E. *Principles of optics*. Cambridge, Cambridge University Press, 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).

Zaytsev I.M. — Research Engineer, Department of Thematic Research and Design of the Earth Remote Sensing Systems, PJSC KMZ (Rechnaya ul. 8, Krasnogorsk, Moscow Region, 143400 Russian Federation).

Yakubovskiy S.V. — Research Engineer, 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., 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>