

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 528.835.042.3 DOI 10.30894/issn2409-0239.2023.10.3.19.31 EDN LPXOEE

**Перспективы создания съемочных систем
высокого разрешения для спутников ДЗЗ малого класса**

П. А. Агапов, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Д. С. Серебряков, *к. т. н., contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

И. О. Подчапаев, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. В. Дрожжин, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

М. А. Блинов, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Зайцев, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Д. В. Кирюшин, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассматриваются основные проблемные вопросы, возникающие при создании перспективной съемочной системы дистанционного зондирования Земли высокого пространственного разрешения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов для малых космических аппаратов.

Рассмотрена возможность применения перспективных материалов для построения съемочной системы. Благодаря использованию элементов из спеченного карбида кремния разработанный объектив не имеет аналогов среди отечественных систем дистанционного зондирования Земли по сочетанию оптических и массогабаритных характеристик.

Описана возможность использования нескольких крупноформатных КМОП-матриц для увеличения полосы захвата. Авторами выбран максимально технологичный вариант, предусматривающий размещение в фокальной плоскости объектива 3 фотоприемных устройств и сочетающий относительную простоту изготовления и юстировки оптических элементов с высокими показателями характеристик, позволяющих достичь полосы захвата 12 км.

Установка узкополосных спектральных фильтров непосредственно на фотоприемном устройстве позволяет вести съемку с проекцией пикселя 0,53 м во всех спектральных каналах: 0,45–0,52 мкм, 0,52–0,60 мкм, 0,63–0,69 мкм и 0,77–0,89 мкм.

Предложен способ компенсации смаза изображения, позволяющий значительно увеличить время экспозиции в целях получения высокоинформативного сигнала. Примененная система перемещения фотоматрицы позволяет увеличить время накопления заряда фоточувствительным элементом с 75 мкс до 15 мс, что значительно повышает отношение сигнал/шум опико-электронной системы и дает возможность получать качественные снимки в условиях плохой освещенности объектов съемки.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, съемочная система, высокое разрешение, видимый спектральный диапазон, спеченный карбид кремния, система компенсации смаза

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

Prospects for Creating High-Resolution Imaging Systems for Small-Class Remote Sensing Satellites

P. A. Agapov, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

D. S. Serebryakov, *Cand. Sci. (Engineering)*, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

I. O. Podchapaev, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

V. V. Drozhzhin, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

M. A. Blinov, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Zaytsev, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

D. V. Kiryushin, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper reviews the basic problems that arise in the design of the advanced high resolution visible and near infrared Earth Remote Sensing imagers for small spacecraft.

The possibility of using advanced materials in the imager's design is considered. Due to the elements made of sintered silicon carbide, the developed optical system has no analogues among Russian Earth remote sensing systems in terms of the combination of optical and weight-size characteristics.

The possibility of using several large-format CMOS matrices to increase the field of view is described. The Authors have chosen the most technologically advanced option, which provides the 3 photodetectors mounting in the focal plane and combines the relatively simple manufacture and alignment of optical elements with high performance indicators to achieve the field of view of 12 km.

The installation of narrow-band spectral filters directly on the photo-detector allows imaging with a ground sample distance of 0.53 m in all spectral channels: 0.45–0.52 μm , 0.52–0.60 μm , 0.63–0.69 μm and 0.77–0.89 μm .

The method compensating an image blur is proposed, which significantly increases the exposure time in order to obtain a highly informative signal. The applied system of the photomatrix movement increases the accumulation time of the photosensitive element charge from 75 μs to 15 ms, which significantly increases the signal-to-noise ratio of the optoelectronic system and makes it possible to obtain high-quality images in the low irradiance conditions of the surveyed objects.

Keywords: Earth remote sensing, imaging system, high resolution, visible spectral range, sintered silicon carbide, blur compensation system

Введение

В статье рассмотрены основные проблемы и пути их решения, возникающие при разработке и создании системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) высокого пространственного разрешения видимого диапазона спектра. При разработке аппаратуры одной из основных задач, решение которой определяет технический облик системы и требует новых подходов к конструкции и построению оптической системы, является минимизация массы при условии сохранения высокого разрешения приемной оптической системы.

Концепция построения аппаратуры

Ключевыми моментами, определяющими возможность реализации требуемых характеристик и конструктивный облик оптико-электронной аппаратуры, ее технологичность, массу и габариты, являются:

- выбор типа и конкретного образца приемника излучения (ПИ);
- выбор типа и схемы объектива;
- выбор материалов и моделирование конструкции.

Приемник излучения

В мировой практике создания аппаратуры высокого и сверхвысокого разрешений применяются приемники излучения 2 типов: линейные многорядные, формирующие изображение построчно в режиме временной задержки и накопления (ВЗН), и крупноформатные матричные ПИ, посредством которых осуществляется покадровая съемка [1–3]. В настоящее время предпочтение отдается матричным ПИ, т.к. требования к точности выполнения закона изменения угловой скорости при тангажном замедлении для них значительно мягче. Кроме того, они дают возможность формирования всех спектральных диапазонов на одной матрице. При применении ВЗН-сенсоров на каждый диапазон требуется свой ПИ. Так, с учетом требований по полосе захвата, потребуется 12 ВЗН-сенсоров и угловое поле порядка $2,5^\circ$ в фокальной плоскости объектива, что приведет к существенному усложнению оптической

системы и к увеличению ее габаритов и массы. В результате проведенного анализа был выбран ПИ GMAX4651 [4], характеристики которого приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры КМОП ПИ GMAX4651

Параметр	Значение
Формат матрицы, пикселей	8424 × 6032
Размер пикселя, мкм	4,6 × 4,6
Емкость потенциальной ямы, e^-	12 500–18 000
Тип затвора	Глобальный затвор
Разрядность сигнала, бит	12
Квантовая эффективность, %	67 (510 нм)
Динамический диапазон, дБ	64,3–65,8
Максимальная кадровая/строчная частота	30 кадров/с
Темновой ток, $e^-/с$	6 (45 °С)
Потребляемая мощность, Вт	2,7
Выходные интерфейсы	24 sub-LVDS выходов

Размер проекции пикселя на поверхность Земли $0,5 \times 0,5$ м и полоса захвата 12 км требуют размещения в фокальной плоскости объектива 3 фотоприемных устройств (ФПУ), вариант расположения которых представлен на рис. 1.



Рис. 1. Вариант установки матриц в фокальной плоскости объектива

Установка узкополосных спектральных светофильтров непосредственно перед площадкой ФПУ, как показано на рис. 2, обеспечивает возможность мультиспектральной съемки в четырех спектральных каналах.



Рис. 2. Расположение спектральных фильтров на ФПУ и их полосы пропускания

С высоты орбиты 500 км и при угле крена 35° скорость бега изображения в фокальной плоскости составляет:

- в центре углового поля — 49,16 мм/с;
- на краях поля — 49,67 мм/с, 48,64 мм/с.

Величина бокового смаза изображения для максимального времени экспозиции 15 мс составляет:

- на левом краю поля — 7,85 мкм;
- на правом краю поля — 7,69 мкм.

Как видно, величина смаза при угле крена 35° составляет 170% от размера пикселя ФПУ. Данный эффект можно компенсировать поворотом КА по рысканью с угловой скоростью не более 0,0091 рад/с.

Как результат, съемку можно будет вести с проекцией пикселя 0,53 м во всех спектральных каналах.

Оптическая система

Выбор конкретного типа объектива аппаратуры ДЗЗ определяется требованиями в части разрешающей способности, углового и линейного полей оптической системы, спектрального диапазона, а также ограничениями по массе и габаритам [5].

Анализ существующих оптических систем по технологичности, простоте изготовления и юстировке оптических элементов с высокими показателями характеристик, позволяющих достичь требуемой полосы захвата 12 км, дал в результате двухзеркальную оптическую систему с входным зрачком,

равным 510 мм. Выбранное фокусное расстояние 4300 мм позволяет получить проекцию пикселя приемника излучения на земную поверхность 0,53 м с орбиты высотой 500 км.

Для исправления aberrаций, растущих с увеличением углового поля, в схеме использованы асферическая поверхность и линзовый квазифокальный корректор полевых aberrаций. В результате оптимизации оптической системы по параметрам конической постоянной асферической поверхности, количеству линз и марок стекол удалось получить объектив с продольным габаритом по оси 1200 мм, что в 3,6 раза меньше фокусного расстояния. Данный параметр, называемый коэффициентом телукокоротения, крайне важен для уменьшения массы аппаратуры [6].

Результатом оптимизации стала оптическая схема с одной асферической поверхностью, сложность юстировки которой существенно снижается и реализуется традиционными способами [7]. Благодаря достаточно широкому диапазону допустимых отклонений геометрических параметров оптической системы (0,2 мм для осевых расстояний) аппаратура сможет функционировать на орбите после выведения без каких-либо сложных систем подъюстировок вторичного и главного зеркал.

Конструктивные решения

Конструируемая аппаратура должна иметь минимальные массу и габариты и обеспечивать необходимые прочность и жесткость, достаточные для сохранения характеристик оптической системы после воздействия нагрузок на этапе выведения на орбиту.

По этим требованиям был разработан и изготовлен полномасштабный макетный образец объектива (рис. 3), в котором впервые в отечественной практике применен спеченный карбид кремния (SSiC) в качестве материала главного и вторичного зеркал, а также основных несущих элементов конструкции [8–10].

В сравнении с наиболее широко применяемыми для оптических и конструктивных элементов — оптическим ситаллом и алюминиевым сплавом — этот материал обладает рядом уникальных механических и физических характеристик, которые приведены в табл. 2 [11].



Рис. 3. Макетный образец объектива

Таблица 2. Характеристики материалов для изготовления зеркал

Характеристика	Карбид кремния	Ситалл	Алюминий
Плотность, г/см ³	3,14	2,53	2,70
Модуль упругости, ГПа	420	91	69
Относительная жесткость, ГПа · см ³ /г	133	36	26
Теплопроводность, Вт/м · К	130	1,6	236
КТР, 10 ⁻⁶ · К ⁻¹	2,4	0,05	24,5
Теплоемкость, Дж/кг · К	750	821	897
Возможность получения оптической поверхности ВД спектра	Есть	Есть	Есть
Возможность изготовления несущей конструкции	Есть	Отсутствует	Есть
Возможность облегчения	Есть	Есть	Есть

Как видно из рисунка, основным несущим элементом конструкции является цилиндрический тубус, который изготовлен из SSiC. Главное зеркало из спеченного карбида кремния эллиптической формы диаметром 510 мм и массой 7,3 кг установлено на тубусе по высокоточной посадке через цилиндрическое отверстие и закреплено винтами. По результатам отработки макета было принято решение отказаться от крепления зеркала винтами в пользу единой гайки по причине слишком больших искажений формы зеркала. Внутри тубуса установлен трехлинзовый корректор полевых аберраций в корпусе из титана. На тубусе также закреплены 4 тонкие

спицы, несущие сферическое вторичное зеркало диаметром 180 мм и массой 0,5 кг. Материал спиц и вторичного зеркала — SSiC. Тубус и конструкция из 3 штанг, несущая фокальный узел, в который входят механизм перемещения матричных приемников излучения и сами матрицы, крепятся к плите-основанию, через которую происходит установка прибора в КА.

Конструкции зеркала объектива и несущих элементов изготовлены из одного материала, т.е. обладают наивысшей степенью однородности и вследствие этого устойчивы к температурным воздействиям. Достаточно высокая теплопроводность карбида

Таблица 3. Сравнения разъюстировок различных оптических схем

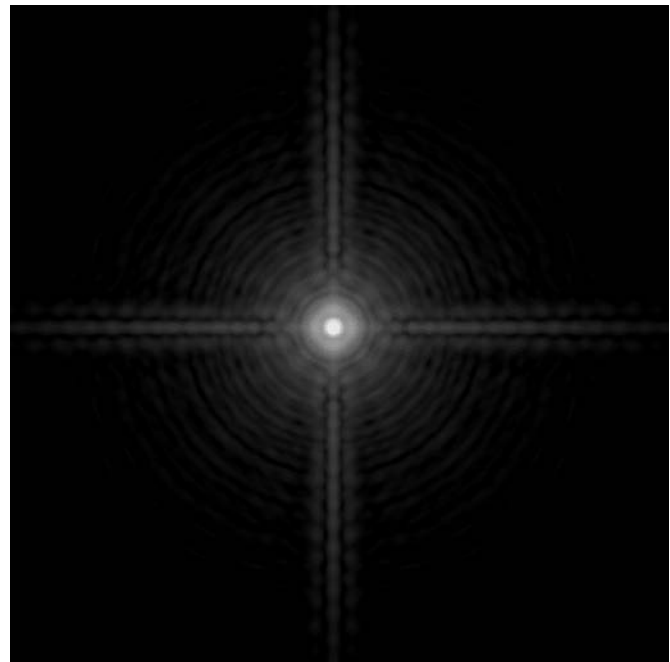
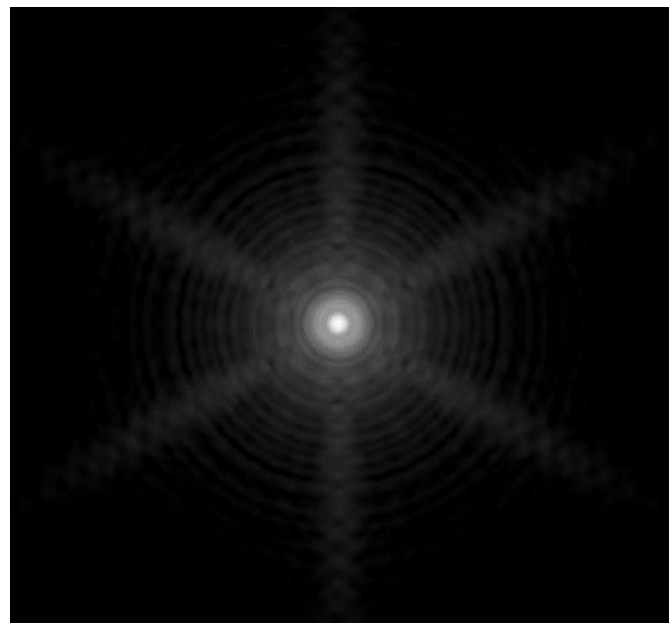
Схема	Направление смещения	Величина разъюстировки
Долла-Киркхэма	Поперечное	0,3 мм
	Продольное	0,2 мм
Ричи-Кретъена	Поперечное	0,05 мм
	Продольное	0,15 мм
Кука	Поперечное	0,2 мм
	Продольное	0,1 мм

кремния способствует уменьшению температурных градиентов, благодаря чему обеспечивается сохранение формы отражающих поверхностей при изменении температуры. Конструкция объектива отличается простотой, имеет минимальное количество деталей, соединений и зазоров, чем обусловлена ее высокая вибро- и механическая прочность. Выбранный тип оптической системы (Долла-Киркхэма) является наименее требовательным в плане допустимой величины относительных смещений оптических элементов (что отражено в приведенной ниже табл. 3) и имеет минимальное количество необходимых юстировочных подвижек. Уникальное крепление главного зеркала на тубусе-основании обеспечивает его центрировку относительно оптической оси системы. При этом масса узла главного зеркала по сравнению со стандартным вариантом крепления по внешнему диаметру снижается на 20–30%, а количество деталей в этом узле уменьшается с 42 до 7.

Оценка качества изображения

Для оценки качества изображения была проведена оценка пятен рассеяния (рис. 4), а также модуляционно-передаточной функции (рис. 5) с учетом наличия трех и четырех спиц одинаковой толщины в конструкции объектива.

Как видно из рис. 4, *а* и 4, *б*, дифракционные картины имеют различную форму вследствие перераспределения энергии в пятне рассеяния. Это отражается в графиках МПФ, показанных на рис. 5, *а* и 5, *б*: на частоте Найквиста коэффициент передачи

*а**б*Рис. 4. Дифракционная картина при наличии в системе 4 (*а*) и 3 (*б*) растяжек

контраста составляет 0,27 и 0,25 при 4-х и 3-х растяжках соответственно. Отсюда следует вывод, что в системе предпочтительно использование четырех спиц для крепления вторичного зеркала, что также подтверждается прочностными расчетами системы.

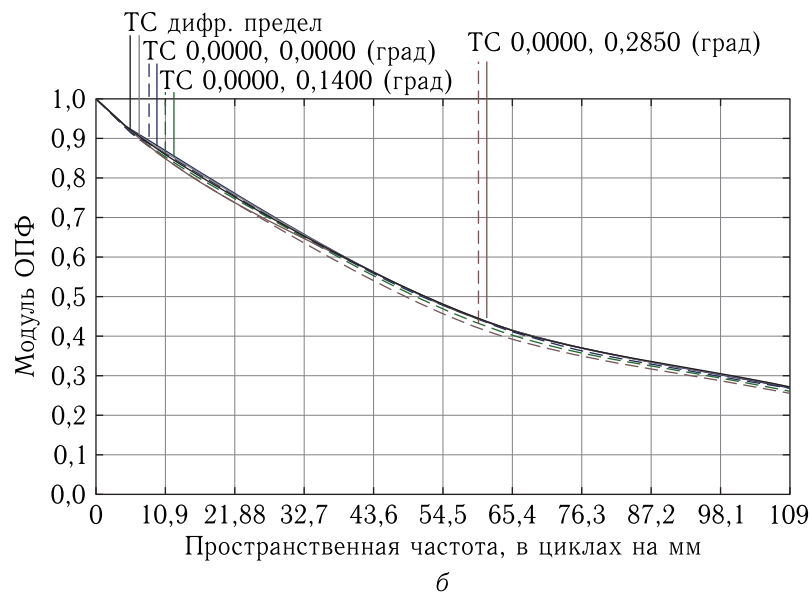
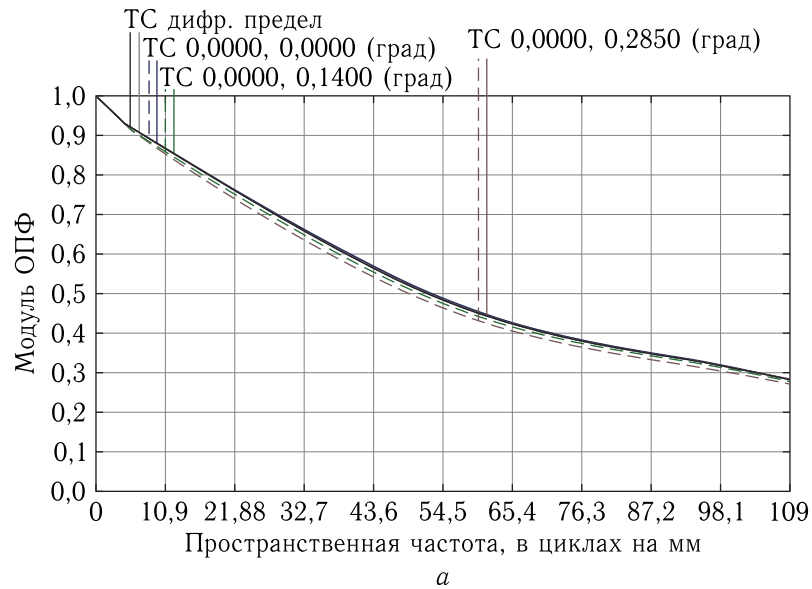


Рис. 5. Модуляционно-передаточная функция (МПФ) при наличии в системе 4 (а) и 3 (б) растяжек

Для оценки степени коррекции aberrаций объектива рассмотрим функцию распределения коэффициента Штреля по длинам волн (рис. 6) и график модуляционно-передаточной функции объектива (рис. 7). Как видно из графиков, объектив обладает достаточно хорошей степенью коррекции aberrаций, что говорит об удовлетворительном качестве изображения с учетом большого углового поля.

С помощью программного анализа было определено значение действительного кружка рассеяния,

равного 4,6 мкм. Линейное разрешение на местности при этом соответствует значению 0,79 м.

Оценка линейного разрешения

Линейное разрешение является одной из основных характеристик съемочной аппаратуры. Зачетные условия, в которых должна выполняться ее проверка, весьма жесткие: высота Солнца 30° , пропускание атмосферы 0,85, тест-объект — трехпальная

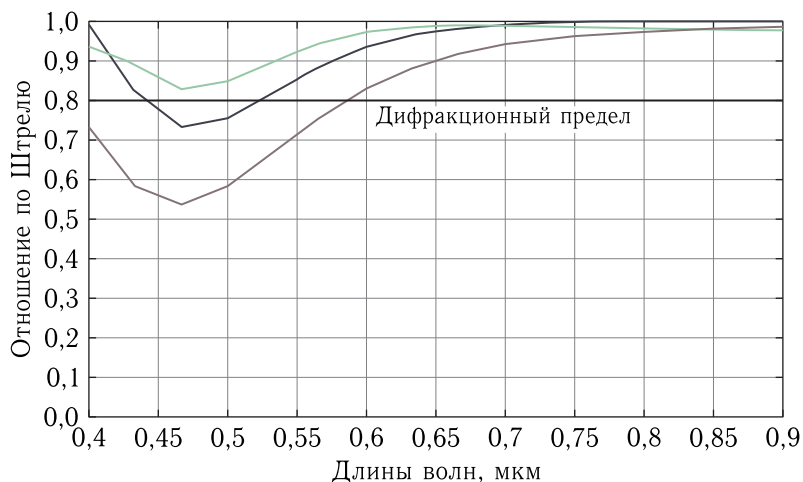
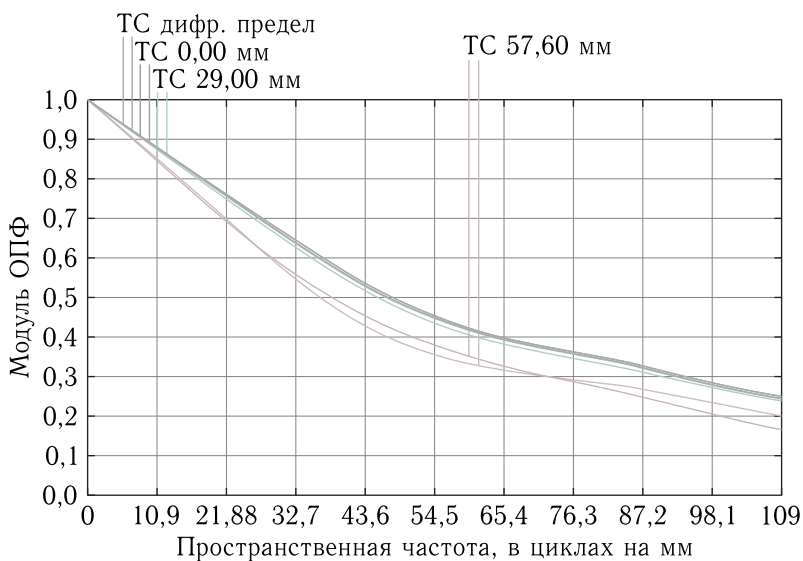


Рис. 6. Распределение коэффициента Штреля по длинам волн

Рис. 7. Модуляционно-передаточная функция объектива с расширенным угловым полем до $1,53^\circ$ (край поля в пространстве изображений — 57,6 мм)

мира с шагом 0,8 м, коэффициент отражения темной шпалы — 0,07, светлой шпалы — 0,13.

Критерий выполнения — различимость изображения тест-объекта на шумовом фоне, при этом элементы теста (шпалы) должны читаться как отдельные.

В целях получения достоверной оценки возможностей рассчитанной системы в плане линейного разрешения была разработана и реализована в среде MATLAB математическая модель формирования изображения земной поверхности [12].

В качестве исходного материала в этой модели используется фотоплан городской застройки с раз-

решением 0,1 м. Исходное изображение с наложенным на него тест-объектом представлено на рис. 8. Тест-объект находится в правом нижнем углу рисунка. На однородном темном фрагменте фотоплана сформирована модель тест-объекта в двух вариантах: с заданным контрастом (слева) и с 100% контрастом (справа). Для большей реалистичности тест-объект развернут относительно оси снимка на угол $\sim 10^\circ$, что позволяет оценить контраст мир при различных пространственных фазах и учесть случайное попадание пикселя изображения на границу, разделяющую темную и светлую шпалы мира.

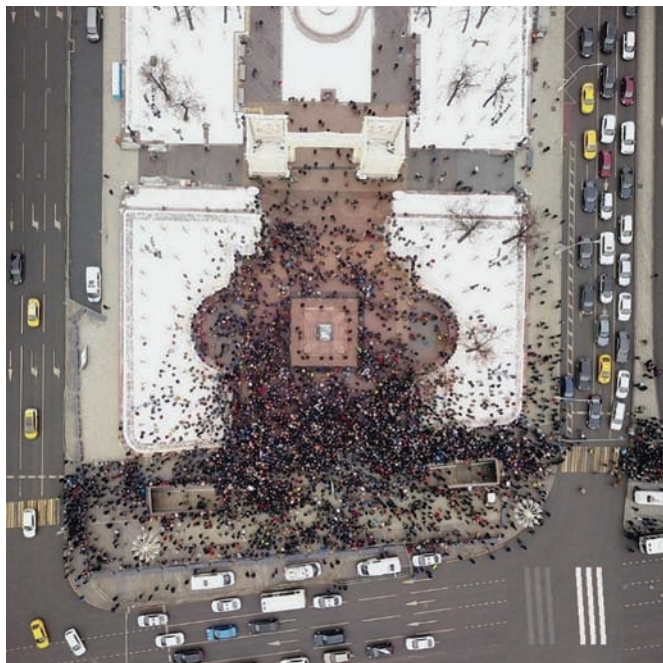


Рис. 8. Исходное изображение с тест-объектом

Это «идеальное», геометрически не искаженное изображение сворачивается маской, представляющей собой свертку распределения энергии в изображении точечного источника излучения (функция рассеяния точки — ФРТ) с пикселем фотоматрицы. Трехмерное представление ФРТ, полученной путем расчета оптической системы в пакете прикладных программ Zemax, показано на рис. 9, а. На рис. 9, б — трехмерное графическое представление свертки ФРТ с пикселем.

Существенное значение для различения на изображении низкоконтрастных малоразмерных объектов имеет уровень шума. Его оценка может быть получена из следующих соображений: предполагается, что при съемке аппаратура настроена таким образом, что при высоте солнца 30° и прозрачной атмосфере сигнальный заряд от наиболее яркого объекта (облака) составляет 90–95% от максимального, то есть порядка $16000e^-$, чему соответствует выходной сигнал ~ 900 уровней квантования в 10-разрядной шкале. Время экспозиции при этом составляет $2,8 \times 10^{-3}$ с для мультиспектральных каналов, отношение сигнал/шум — 56.

К восходящему излучению добавляется рассеянная компонента, с яркостью 0,075 от максималь-

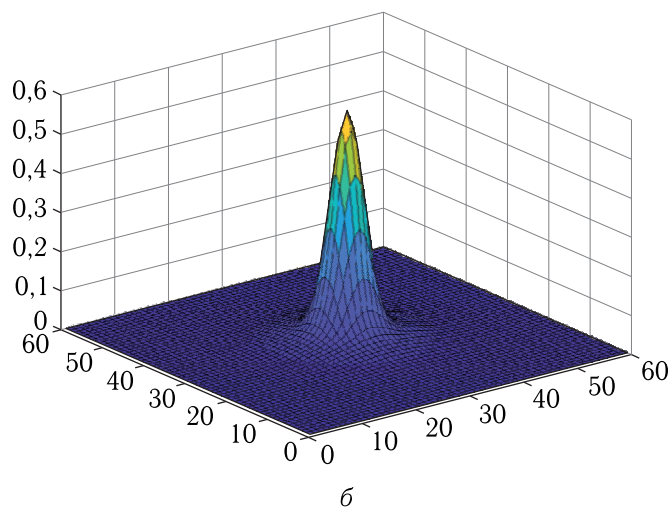
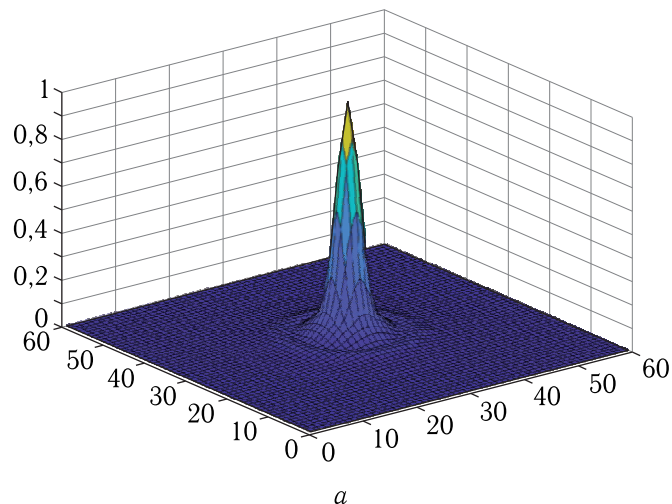


Рис. 9. Трехмерное представление ФРТ (а) и свертки ФРТ с пикселем ПИ (б)

ной, которая вносит дополнительный шум в выходной сигнал. Отношение сигнал/шум на уровне фона (50 ур. кв.) составит порядка 16, СКО сигнала ~ 3 ур. кв. Исходя из этого к смоделированному изображению добавлен белый шум с дисперсией $\sigma^2 = 3^2 = 9$. Анализ модельного изображения показывает, что разность отсчетов на светлых шпалах миры и в промежутках между ними составляет в среднем около 10 ур. кв., т. е. более 3σ . При таком соотношении вероятность различения светлых и темных элементов тест-объекта близка к 100%. Модельное изображение, «пропущенное» через оптическую систему и фотоматрицу, с добавленным шумом, представлено на рис. 10.

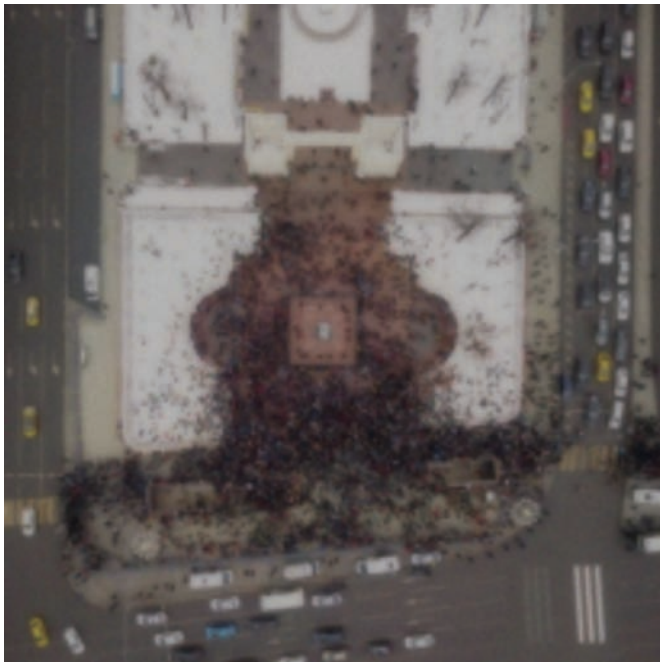


Рис. 10. Смоделированное изображение

По результатам моделирования может быть сделан вывод, что предложенная аппаратура отвечает выдвинутому требованию в части пространственного разрешения.

Увеличение времени экспозиции

Для формирования кадра важной характеристикой является время накопления заряда фоточувствительным элементом ПИ (время экспозиции). Для данной системы, без использования дополнительных методик, это время составляет 75 микросекунд. При такой малой величине времени накопления значение отношения сигнал/шум для зеленого спектрального канала в надире при альбедо подстилающей поверхности 0,8 и высоте Солнца над горизонтом 30° составляет 12, чего явно недостаточно.

Система перемещения фотоматрицы (СПФ) позволяет увеличить время накопления до 400 раз, что значительно повышает отношение сигнал/шум опто-электронной системы и дает возможность получать качественные снимки в условиях плохой освещенности объектов съемки.

Подвижная площадка СПФ с ФПУ колеблется по определенной траектории, состоящей из реверса и линейного участка, на котором осуществляется

движение по направлению бега изображения и производится экспонирование. Тем самым обеспечивается замедление изображения относительно ФПУ во время съемки кадра.

Частота колебаний площадки зависит от разрешающей способности съемочной системы, количества спектральных каналов, требуемой величины перекрытия кадров и является фиксированной величиной для конкретной съемочной системы. При съемке в мультиспектральном режиме (4 канала) пространственное перекрытие кадров должно составлять $\geq 20\%$ при пространственном разрешении съемки 0,5 м.

В рамках инициативной работы были изготовлены макеты системы перемещения фотоматрицы (рис. 11), контрольно-испытательная аппаратура макета СПФ с программным обеспечением, позволяющим управлять работой макета и производить настройку траектории движения СПФ.



Рис. 11. Внешний вид макета СПФ

Частота движения СПФ постоянна и равна 10 Гц. Допустимая нестабильность периода не более 10^{-3} с. Длительность линейного участка траектории составляет не менее 15 мс. Скорость

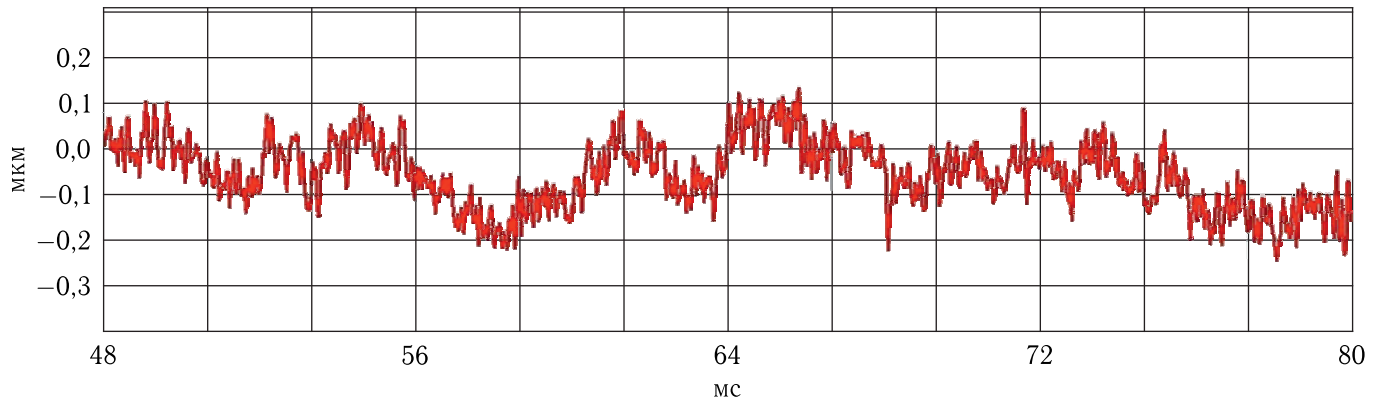


Рис. 12. График отклонения от перемещения фотоматрицы СПФ

движения на линейном участке от 40 до 65 мм/с, задается командами от внешнего устройства с шагом $\leq 0,25$ мм/с. Отклонения скорости движения от заданного значения (СКО) не более 0,2 мм/с. Отклонение перемещения от идеальной траектории движения фотоматрицы (рис. 12) составляет $0,01''$ (0,2 мкм) при мгновенном угловом поле оптико-электронной системы $0,22''$, что эквивалентно $1/23$ размера пикселя ПИ (4,6 мкм).

Заключение

В результате анализа был выбран максимально технологичный вариант, сочетающий относительную простоту изготовления и юстировки оптических элементов с высокими показателями характеристик, позволяющих достичь требуемой полосы захвата 12 км. Объектив представляет из себя двухзеркальную оптическую систему с входным зрачком 510 мм, включающую в себя зеркала и конструктивные элементы из спеченного карбида кремния [13]. Благодаря этому объектив не имеет аналогов среди отечественных систем ДЗЗ по сочетанию оптических и массогабаритных характеристик.

Для увеличения углового поля системы до $1,53^\circ$ и расширения полосы захвата съемки с 4 до 12 км предложено создать фокальный узел из 3 фотоприемных матриц GMAX4651 фирмы Gpixel. Установка узкополосных спектральных светофильтров перед площадкой ФПУ позволяет вести съемку с разрешением (проекцией пикселя) 0,53 м во всех спек-

тральных каналах: 0,45–0,52 мкм, 0,52–0,60 мкм, 0,63–0,69 мкм и 0,77–0,89 мкм.

Существует возможность осреднения 2×2 пикселя, что повысит отношение сигнал/шум в 2 раза. Панхроматический канал может быть реализован путем сложения соответствующих пикселей из всех 4 мультиспектральных каналов, с повышением отношения сигнал/шум в 2 раза при сохранении величины проекции пикселя, как это реализовано в аппаратуре FLOCK космического аппарата PlanetScope (США).

Для увеличения времени экспозиции и повышения отношения сигнал/шум оптико-электронной системы предложено использовать систему перемещения фотоматрицы, которая позволяет увеличить время накопления заряда с 75 мкс до 15 мс, что дает возможность получать качественные снимки в условиях плохой освещенности объектов съемки. Тангажное замедление скорости бега в 4–5 раз целесообразно использовать в сочетании с механической компенсацией для съемки малоконтрастных объектов в условиях очень низкой освещенности. В этом случае отношение сигнал/шум повышается за счет 4–5 кратного перекрытия кадров, но уменьшается длина маршрута съемки. В то же время тангажный способ необходим и является единственно возможным при съемке в режиме видео, когда бег изображения в фокальной плоскости объектива должен быть нулевым.

Тактико-технические характеристики (ТТХ) предлагаемой съемочной системы представлены в табл. 4.

Таблица 4. Сводная таблица ТТХ съемочной системы высокого разрешения

Параметр	Значение ($H = 500$ км)
Фокусное расстояние f' , мм	4300
Диаметр входного зрачка D , мм	510
Полоса захвата (3 матрицы), км	12
Проекция пикселя (500 км), м	0,53
Расчетное значение коэффициента передачи модуляции объектива на частоте 109 мм^{-1} (частота Найквиста), %, не менее	центр 24/14 край
Расчетное значение коэффициента передачи модуляции объектива 55 мм^{-1} , %, не менее	центр 43/32 край
Центральное экранирование ε	0,39
Оптическая схема	Схема Долла–Кирхема с линзовым корректором (ахромат), состоящая из: главного зеркала — эллипсоида вращения, вторичного зеркала — сферы, 3 линз со сферическими поверхностями
Масса оптических деталей, кг	12
Длина объектива, мм	1200
Масса прибора, кг	≤ 90
Спектральные диапазоны, реализуемые аппаратно, мкм	МС1: 0,45–0,52 МС2: 0,52–0,60 МС3: 0,63–0,69 МС4: 0,77–0,89
Отношение сигнал/шум (угол Солнца над горизонтом 30° , альбедо 0,8, в мультиспектральных каналах проекция пикселя 0,53 м, время экспозиции 3 мс)	МС1: ≥ 75 МС2: ≥ 85 МС3: ≥ 66 МС4: ≥ 50 ПХ: ≥ 138
Кадровая частота, Гц (4 спектральных канала)	10
Разрядность сигнала, бит	10
Информационный поток (с учетом кодирования 8b/10b)	19,9 Гбит/с

Список литературы

1. *Формозов Б.Н.* Аэрокосмические фотоприемные устройства видимого и инфракрасного диапазонов: Учеб. пособие. СПб.: СПбГУАП; БГТУ «Военмех», 2004. 127 с.
2. *Ишанин Г.Г., Челибанов В.П.* Приемники оптического излучения: Учебник / Под ред. В. В. Коротаева. СПб.: Лань, 2014. 304 с.
3. *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.* Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. М.: Логос, 2007. 192 с.
4. GMAX4651: 51 Megapixels Global Shutter CMOS Image Sensor. Datasheet v1.3. GPiXEL Inc.
5. *Бетенески Э., Хопкинс Р., Шеннон Р.* Проектирование оптических систем / Пер. с англ. под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта. М.: Мир, 1983. 432 с.

6. *Михельсон Н.Н.* Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета. М.: ИД «ФИЗМАТЛИТ», 1995. 333 с.
7. *Погарев Г.В.* Оптические юстировочные задачи. Справочное пособ. Л.: Машиностроение (Ленинградское отделение), 1974. 224 с.
8. *Мальшев И.В.* Современные достижения и тенденции в изготовлении заготовок крупногабаритных аэрокосмических зеркал из карбида кремния. Сборник трудов III конф. «Будущее оптики», 2015, 9–11.
9. *Добриков Н.С.* Карбид кремния — будущее космической оптики // Спектр, 2017, № 5(77). С. 20–23.
10. *Архипов С.А., Абдулкадыров М.А., Добриков Н.С.* Анализ физико-технологических проблем изготовления облегченных термостабильных оптико-механических систем на основе карбида кремния для оптико-электронной аппаратуры космического базирования // Контенант, 2017, т. 16, № 1. С. 28–46.
11. *Зверев В.А., Кривоустова Е.В., Точилина Т.В.* Оптические материалы. Часть 2. Учеб. пособ. для конструкторов оптических систем и приборов. СПб.: СПб НИУ ИТМО, 2013. 248 с.
12. *Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Пер. с англ. А.В. Кирюшина, А.И. Демьяникова. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
13. Объектив съемочной системы дистанционного зондирования Земли высокого разрешения видимого и ближнего ИК диапазонов для космических аппаратов микро-класса: пат. 2702842 Рос. Федерация. № 2019105075; заявл. 22.02.2019; опубл. 11.10.2019. Бюл. № 29. 10 с.

Дата поступления рукописи
в редакцию 23.05.2023
Дата принятия рукописи
в печать 07.08.2023