



РОССИЙСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

# Перспективы создания съёмочных систем высокого разрешения для спутников ДЗЗ малого класса

Агапов П.А., Серебряков Д.С.,

Подчапаев И.О., Дрожжин В.В.,

Блинов М.А., Зайцев А.А., Кирюшин Д.В.

АО «Российские космические системы»



## Основные задачи:

- Обеспечение высокого пространственного разрешения съемочной системы – GSD 0,5 м с высоты орбиты 500 км
- Минимизация массы при условии сохранения высокого разрешения оптической системы
- Достижение высоких значений отношения сигнал/шум
- Обеспечение простоты и технологичности конструкции съемочной системы

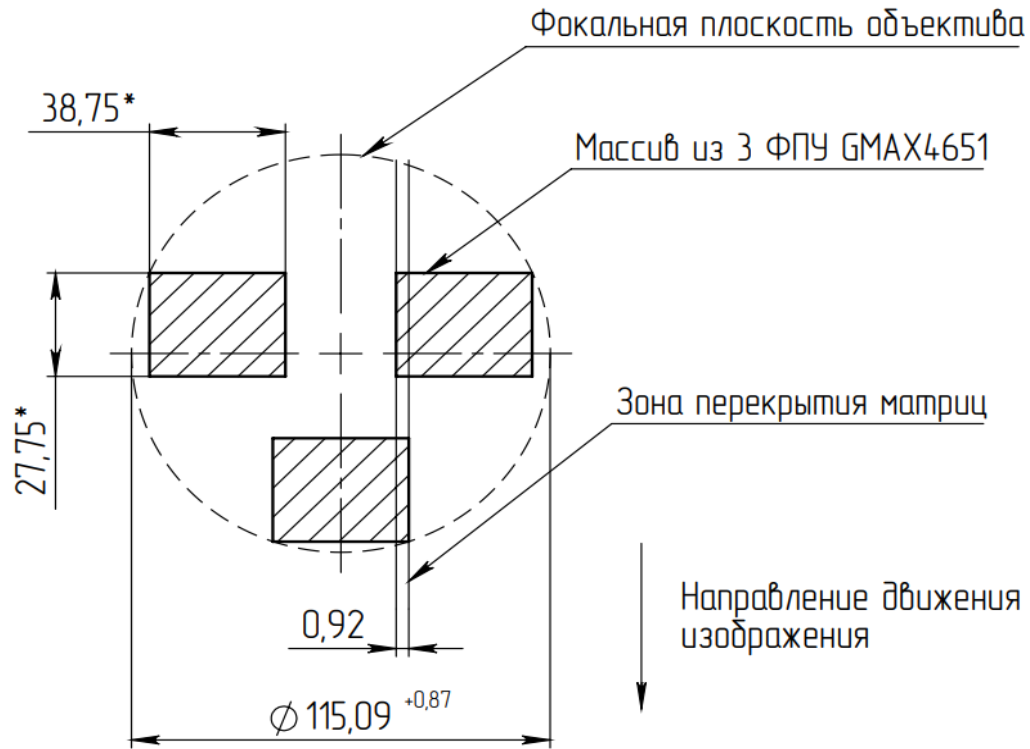
## Ключевые моменты:

- Выбор типа и конкретного образца приемника излучения
- Выбор типа и схемы объектива
- Выбор материалов и моделирование конструкции

# Основные характеристики приемника излучения — КМОП матрицы GMAX4651

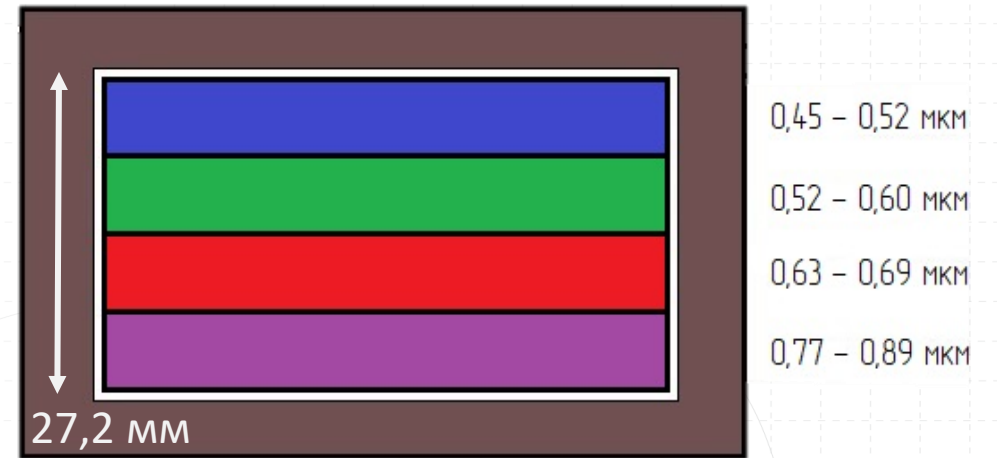
Параметр	Значение
Разрешение, пикселей	8424 × 6032
Размер пикселя, мкм	4,6 × 4,6
Емкость потенциальной ямы, ке-	12,5 ... 18
Тип затвора	Глобальный затвор
Частота кадров, Гц	30 (12 бит)
Квантовая эффективность, %	67 (510 нм)
Динамический диапазон, дБ	64,3 ... 65,8
Минимальное время экспозиции, мкс	25
Оптический формат	35 мм
Темновой ток, е-/с	6 (45 °С)
Потребляемая мощность, Вт	2,7
Выходные интерфейсы	24 sub-LVDS выходов по 864 Мбит/с каждый

# Схема фокальной плоскости съемочной системы высокого разрешения



\* – размеры фоточувствительной области ФПУ для справки

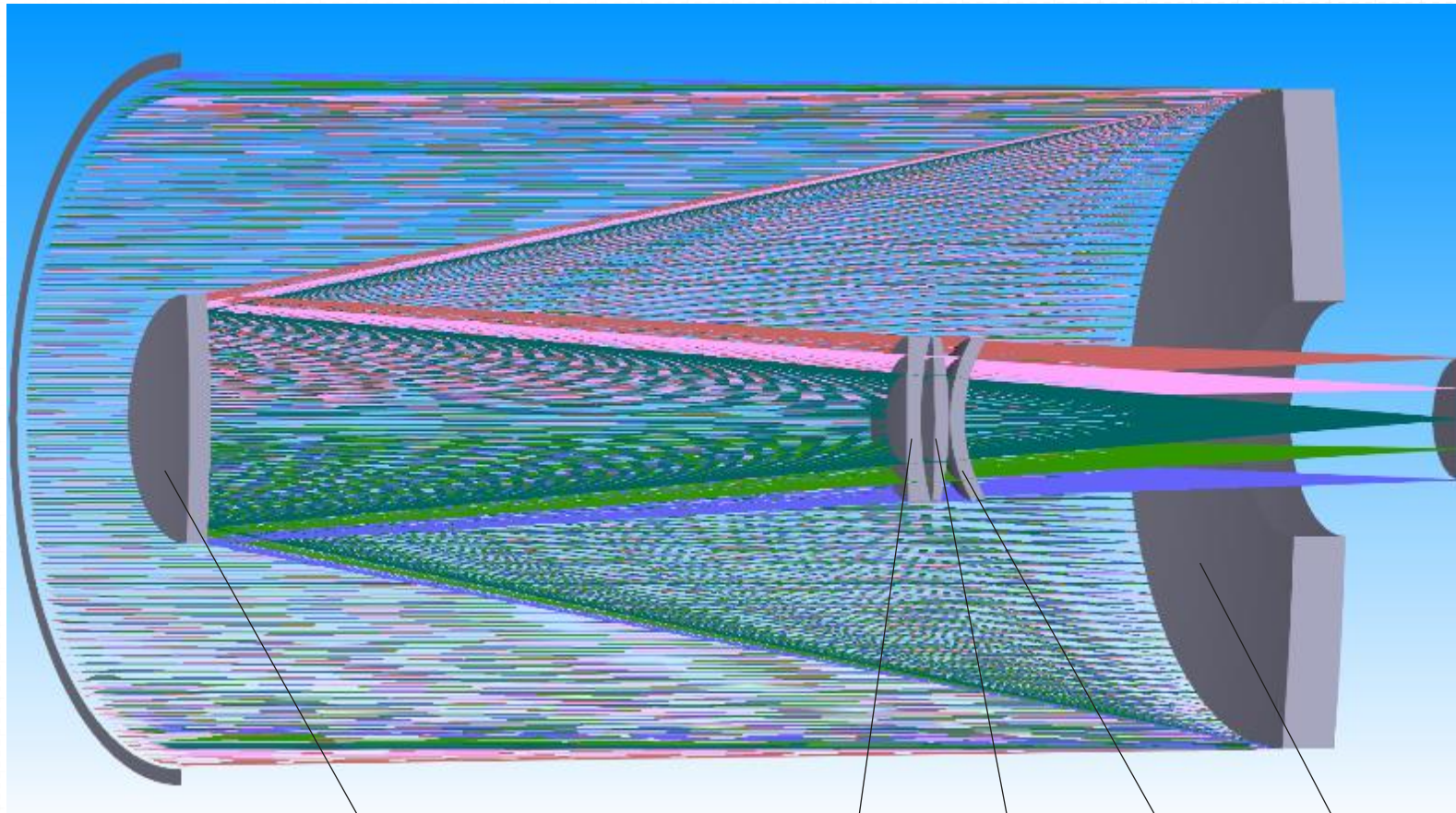
Вариант установки матриц в фокальной плоскости объектива



Расположение спектральных фильтров на матрице и их полосы пропускания



# Оптическая схема съемочной системы высокого разрешения



2

3

4

5

1

Параметр	Значение
Тип схемы	Долла-Киркхэма
Форма главного зеркала	Эллипсоид вращения
$f'$ , мм	4300
$D$ , мм	510
Коэффициент экранирования	0,39
Расчетное значение КПМ на частоте Найквиста, центр / край поля	24 / 14

1 – Главное зеркало

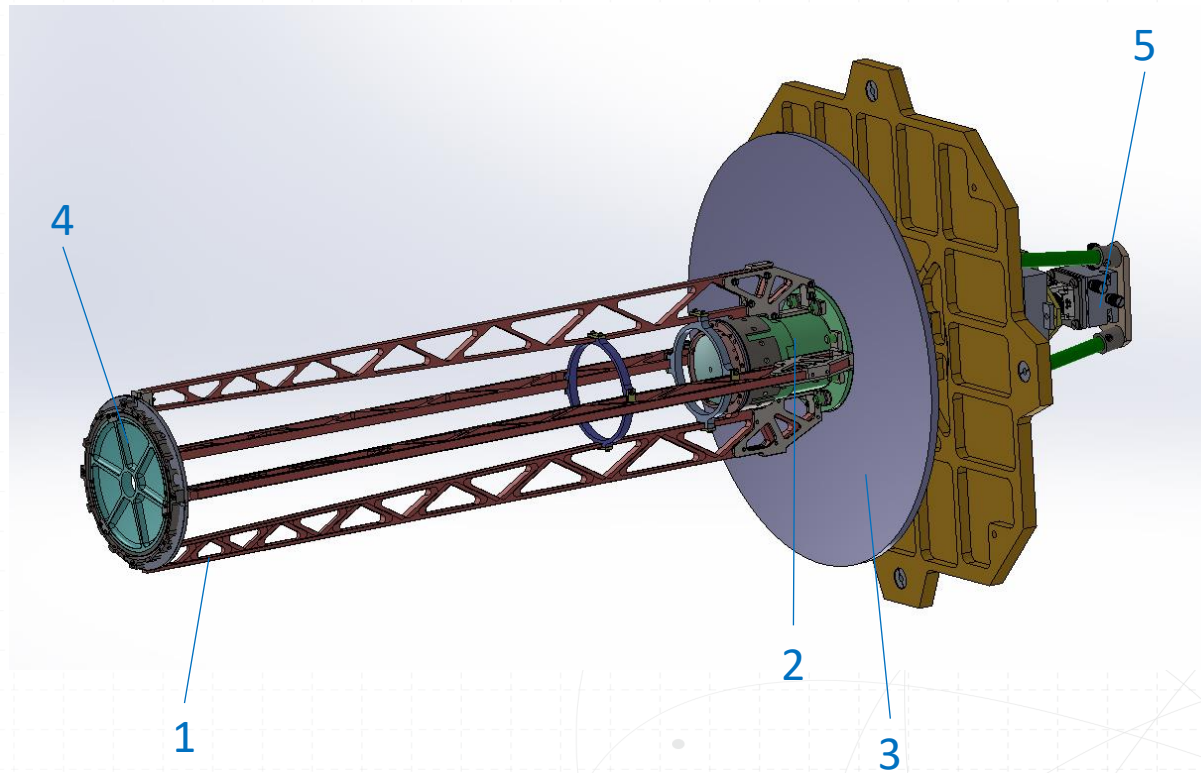
2 – Вторичное зеркало

3,4,5 – Линзовый корректор

## Характеристики материалов для изготовления зеркал съемочных систем

Характеристика	Карбид кремния	Ситалл	Алюминий
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,14	2,53	2,70
Модуль упругости, ГПа	420	91	69
Относительная жесткость ГПа·м <sup>3</sup> /кг	133	36	26
Теплопроводность, Вт/м·К	130	1,6	236
КТР, 10 <sup>-6</sup> ·К <sup>-1</sup>	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

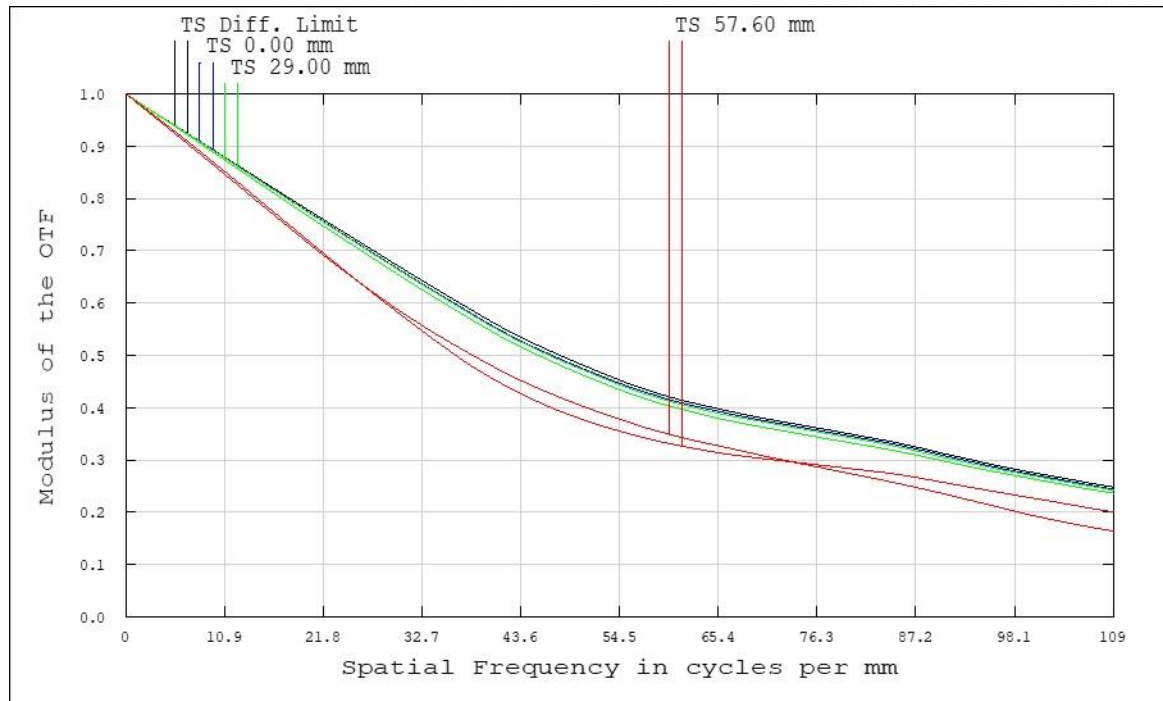
## Модель съемочной системы высокого разрешения



- 1 – Спицы
- 2 – Тубус-основание с установленным линзовым корректором
- 3 – Главное эллиптическое зеркало
- 4 – Вторичное сферическое зеркало
- 5 – Узел фото-приемного устройства



# Оценка качества изображения оптической системы



Исходное изображение с тест-объектом

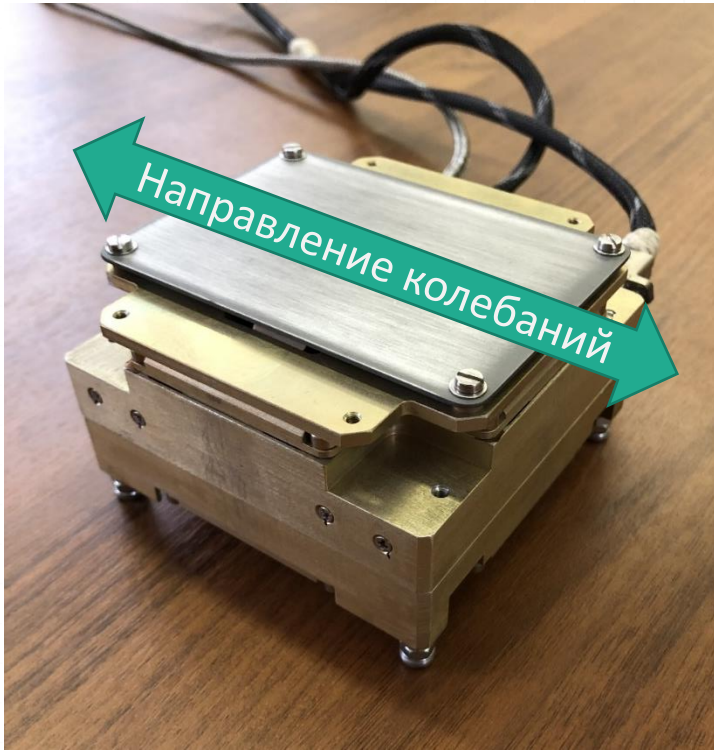


Изображение с тест-объектом, пропущенное через смоделированную оптическую систему

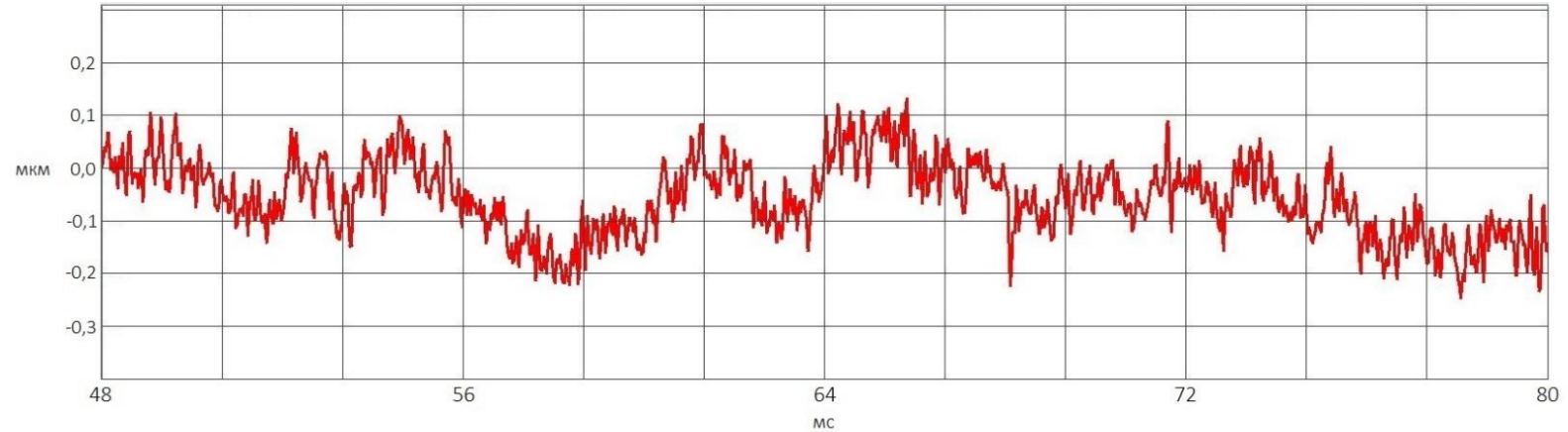
Модуляционно-передаточная функция объектива с расширенным угловым полем до  $1,53^\circ$   
(край поля в пространстве изображений – 57,6 мм)



# Система перемещения фотоматрицы



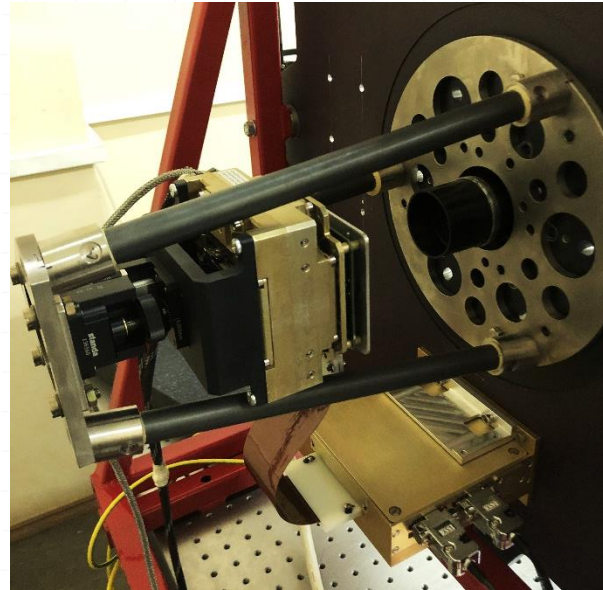
Макет системы перемещения фотоматрицы



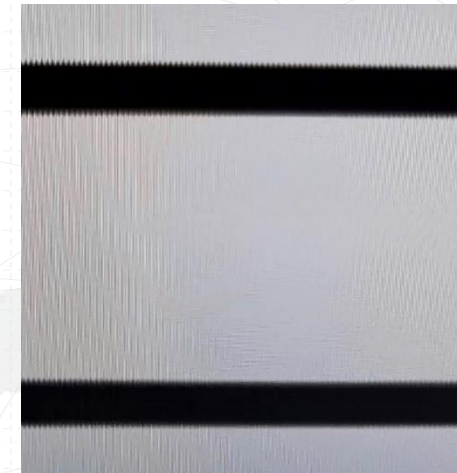
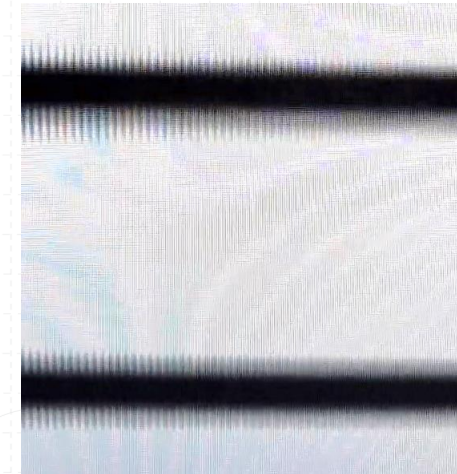
- Частота движения постоянна и равна:  
 $10 \pm 0,1$  Гц
- Скорость движения подвижной платформы на линейном участке:  
от 40 до 65 мм/с
- Точность установки скорости движения на линейном участке:  
 $\leq 0,25$  мм/с
- Отклонение перемещения от идеальной траектории движения:  
не более 0,25 мкм (эквивалентно **1/18** размера пикселя)

# Отработка режимов съемки с компенсацией смаза системой перемещения фотоматрицы

*Работы по изготовлению рабочего места и отработке режимов съемки были проведены совместно с ИКИ РАН*



Стенд для отработки режимов съемки с компенсацией смаза



Компенсация смаза при съемки с частотой 10 Гц в оконном режиме: а) не настроена, б) настроена

# Предлагаемые характеристики съемочной системы высокого разрешения

Параметр	Значение
Фокусное расстояние $f'$ , мм	4300
Диаметр входного зрачка $D$ , мм	510
Полоса захвата (3 матрицы, высота орбиты 500 км), км	12
Проекция пикселя в надире (500 км), м	0,53
Расчетное значение КПМ объектива на частоте $109 \text{ мм}^{-1}$ (частота Найквиста), %, не менее	центр 24 / 14 край
Расчетное значение КПМ объектива $55 \text{ мм}^{-1}$ , %, не менее	центр 43 / 32 край
Оптическая схема	Схема Долла-Киркхэма
Длина объектива, мм	1200
Масса прибора, кг	$\leq 90$
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 $30^\circ$ , альbedo 0,8, в МС-каналах проекция пикселя 0,53 м, время экспозиции 3 мс)	МС1: $\geq 75$ МС2: $\geq 85$ МС3: $\geq 66$ МС4: $\geq 50$
Кадровая частота (4 спектральных канала), Гц	10
Разрядность сигнала, бит	10



**Спасибо за внимание!**





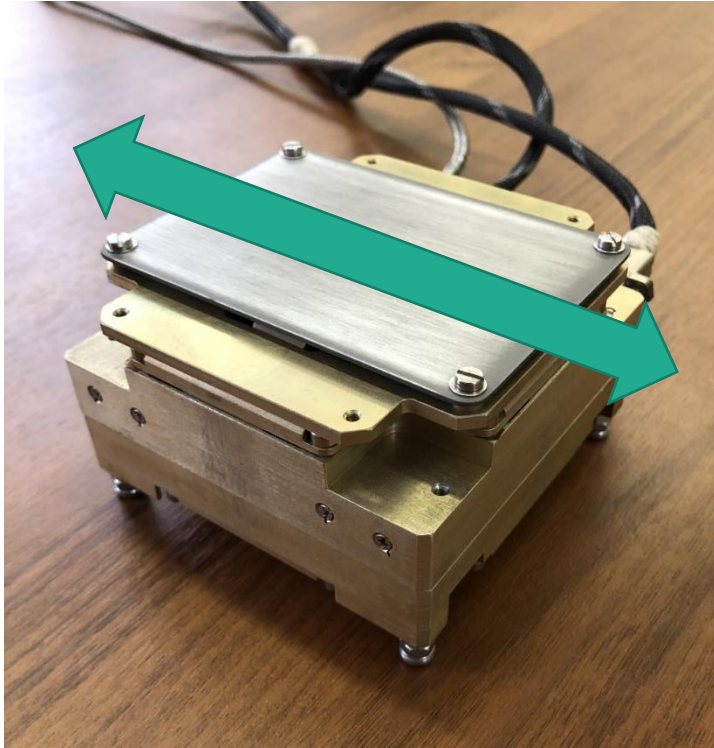
## Список литературы

1. *Формозов Б.Н.* Аэрокосмические фотоприемные устройства видимого и инфракрасного диапазонов: Учеб. пособие /СПбГУАП; БГТУ «Военмех»; СПб., 2004. –127 с.
2. *Ишанин Г.Г., Челибанов В.П.* Приемники оптического излучения: Учебник / Под ред. В.В.Коротаева. –СПб.: Изд-во «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 английского под ред. Шеннона Р., Вайанта Дж. – М.: Мир, 1983. – 432 с.
6. *Михельсон Н.Н.* Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета. – М.: Физматлит, 1995. – 333с.
7. *Погарев Г.В.* Оптические юстировочные задачи. Справочное пособие. Л., «Машиностроение» (Ленинградское отделение), 1974. – 224 с.
8. *Малышев 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. Журнал ЛЗОС «Спектр» №5(77), 2017, 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. Научно-технический журнал «Контенант», 2017, т. 16, № 1, 28–46.
11. *Зверев В.А., Кривоустова Е.В., Точилина Т.В.* Оптические материалы. Часть 2. Учебное пособие 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 английского Кирюшина А.В., Демьяникова А. И. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.

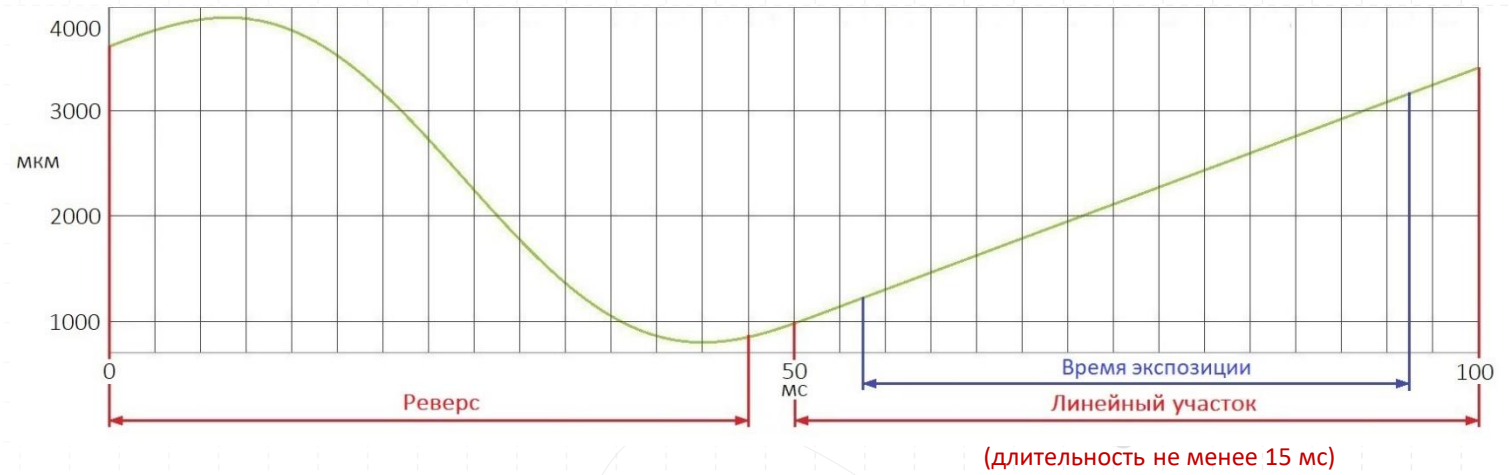
# Объектив съемочной системы высокого разрешения

Параметр	Значение
Фокусное расстояние $f'$ , мм	4300
Диаметр входного зрачка $D$ , мм	510
Проекция пикселя $GSD$ (500 км), м	0,53
Угловое поле объектива $2\omega$ , градусов	1,53 (эквивалентная полоса захвата 12 км)
Центральное экранирование $\varepsilon$	0,39
Расчетное значение КПМ объектива на частоте $109 \text{ мм}^{-1}$ (частота Найквиста), %, не менее	центр 24 / 14 край
Расчетное значение КПМ объектива на частоте $55 \text{ мм}^{-1}$ , %, не менее	центр 43 / 32 край
Оптическая схема	Схема Долла-Киркхэма с линзовым корректором (ахромат), состоящая из: Главное зеркало — эллипсоид вращения, Вторичное зеркало — сфера, 3 линзы со сферическими поверхностями
Масса линзы + зеркала, кг	12
Длина объектива, мм	1200
Спектральные диапазоны, мкм	МС1: 0,45 – 0,52 МС2: 0,52 – 0,60 МС3: 0,63 – 0,69 МС4: 0,77 – 0,89

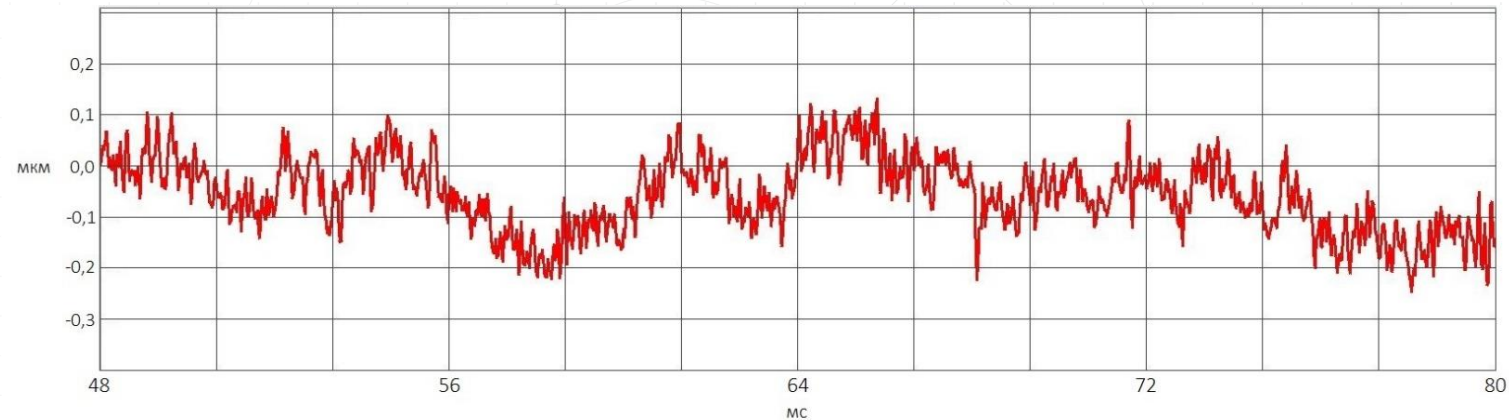
# Система перемещения фотоматрицы



Частота движения постоянна и равна  $10 \pm 0,1$  Гц,  
скорость на линейном участке настраивается



Скорость движения подвижной платформы на линейном участке: от 40 до 65 мм/с  
Точность установки скорости движения на линейном участке:  $\leq 0,25$  мм/с



Отклонение перемещения от идеальной траектории движения:  
не более 0,25 мкм (эквивалентно 1/18 размера пикселя)