

УДК 52(15)(091); 52(15)(092)

Г.Т. Мурзакулов, М.Р. Нургужин, Б.Ш. Альбазаров, Б.Р. Жумажанов

АО «Национальная компания «Казакстан Ғарыш Сапары»», Казакстан, г.

E-mail: b.zhumazhanov@gharysh.kz

### **Современные методы проектирования и анализа оптических систем на примере внеосевой катадиоптрической системы**

Статья посвящена технологии проектирования и анализу оптических параметров телескопа, используемого в целях дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на малых космических аппаратах (КА). Приведено краткое перечисление программных продуктов, используемых для проектирования оптических систем и описаны некоторые их возможности. Описаны основные этапы проектирования телескопа на примере катадиоптрической системы и обоснована их необходимость. Приведены факторы, на основе которых выбирались параметры телескопа. Представлены некоторые результаты анализа оптической системы, которые позволят дать первичную оценку системы. Описан механизм учета влияния механических допусков при производстве элементов системы на основе расчета устойчивости системы как к погрешностям производства и сборки, так и к изменениям условий среды. Изложена используемая философия моделирования, описан этап верификации.

В основе статьи лежит работа, проведенная специалистами АО «Национальная компания «Казакстан Ғарыш Сапары»» (КГС) в рамках проекта «Создание космической системы ДЗЗ Республики Казакстан» («Создание КС ДЗЗ РК»). Работы велись совместно со специалистами компаний EADS Astrium (Франция) и SSTL (Великобритания).

Статья дает общее представление о современных методах разработки оптической полезной нагрузки для малых КА.

**Ключевые слова:** телескоп, проектирование, этапы, катадиоптрическая система, технологии, ДЗЗ.

G. Murzakulov, M. Nurguzhin, B. Albazarov, B. Zhumazhanov

### **Modern methods of design and analysis of optical systems on example of the off-axis catadioptric system**

The article is devoted to design and analysis technology of parameters of the telescope used on small satellites for remote sensing purposes. Software products used for optical systems design are listed and some their capabilities are described. The main design phases for remote sensing telescope are described on the example of catadioptric system and necessity of those phases is shown. The factors which lay on the base of choosing telescope parameters are shown. Some results of analysis of the optical system are presented, so it is possible to make initial estimations of the system capabilities. On the basis of computations of the system tolerance to manufacture and assembly errors and to environment conditions changes, the way of computation of mechanical margins at manufacture of system elements is described. The applied model philosophy is given, verification phase is described.

The article is based on the work done by the specialists of the JSC «National company «Kazakhstan Gharysh sapary»» in frames of the project «Creation of the remote sensing space system of republic of Kazakhstan». The works are done in collaboration with the specialists of companies EADS Astrium (France) and SSTL (Great Britain).

The article presents the general view of modern methods of developing optical payloads for small satellites.

**Keywords:** telescope, design, phases, catadioptric system, technologies, remote sensing.

Ғ.Т. Мырзақұлов, М.Р. Нурғожин, Б.Ш. Альбазаров, Б.Р. Жұмажанов  
**Осьтен тыс катадиоптрикалық жүйе мысалында оптикалық жүйелерді жобалау және сараптау заманауи әдістері**

Мақала кіші ғарыш аппараттарында Жерді қашықтан зондтау (ЖҚЗ) мақсатында пайдаланылатын телескоптың параметрлерін жобалау және сараптау технологияларын баяндауға арналған. Оптикалық жүйелерді жобалауға қолданылатын программалық өнімдер қысқаша аталып өтілді және олардың кейбір мүмкіндіктері баяндалды. Катадиоптрикалық жүйе мысалында ЖҚЗ мақсатында қолданылатын телескопты жобалаудың негізгі кезеңдері мазмұндалды және ол кезеңдердің қажеттілігі дәлелденді. Телескоп параметрлерін таңдау үшін негізге алынған факторлар келтірілді. Оптикалық жүйенің қабілеттеріне алғашқы баға беруге мүмкіндік беретін жүйені сараптаудың кейбір нәтижелері көрсетілді. Жасау және жинау кезеңіндегі қателерге, қоршаған орта жағдайларының өзгеруіне жүйенің төзімділігін есептеу негізінде жүйе элементтерін жасауда механикалық ауытқу шектерін есептеу механизмі сипатталды. Қолданылған модельдеу философиясы келтірілді, верификация кезеңі сипатталды.

Мақала «Қазақстан Ғарыш Сапары» Ұлттық компаниясы» акционерлік қоғамы мамандарының «Қазақстан Республикасы ЖҚЗ ғарыш жүйесін жасау» жобасы шеңберінде жасалған жұмыс негізінде жазылған. Жұмыстар EADS Astrium (Франция) және SSTL (Ұлыбритания) мамандарымен бірлесіп жүргізілді.

Мақала кіші ғарыш аппараттарына оптикалық құралдарды жобалаудың заманауи әдістер туралы жалпы мәлімет береді.

**Түйін сөздер:** телескоп, жобалау, кезеңдер, катадиоптрикалық жүйе, технологиялар, ЖҚЗ.

### Введение

Методы проектирования оптических систем, с появлением специальных программных продуктов, имеют свои особенности. Если раньше для разработки оптической системы (ОС) необходимо было проводить долгие расчеты с учетом геометрических особенностей поверхностей компонентов системы, характеристик используемых стекол (коэффициента преломления, числа Аббе), например [1, 2], то в последнее время этот процесс изменился. Появление такого программного обеспечения (ПО), как CodeV, Zemax, OPAL, OSLO и т.д. дает возможность ускорить процесс проектирования [3].

В рамках проекта «Создание КС ДЗЗ РК» специалисты КГС получили возможность ознакомиться с современными технологиями проектирования, работая со специалистами компаний EADS Astrium (Франция) и SSTL (Великобритания).

Важным моментом в данном сотрудничестве явилось то, что телескоп проектировался не как упражнение по овладению работы с ПО Zemax, а как оптический инструмент, который предполагалось использовать на собственном научно-технологическом космическом аппарате (КА).

В качестве оптической системы была выбрана катадиоптрическая (зеркально-линзовая) си-

стема. Основными достоинствами этой системы являются относительная простота конструкции (используется только одно зеркало Манжена, для всех линз – один сорт стекла), при этом все поверхности компонент являются сферическими, достаточно большой угол обзора и хорошие характеристики получаемого изображения, компактность телескопа. Идея данной конструкции системы принадлежит Дэну Лоббу – одному из ведущих специалистов SSTL.

### Основные этапы проектирования телескопа

На первом этапе необходимо обосновать выбор апертуры телескопа, которая зависит от ряда факторов: характеристик используемой ПЗС – матрицы и получаемого излучения от подстилающей поверхности для обеспечения необходимого отношения сигнала к шуму (ОСШ). Данное соотношение, как и ряд других, таких как требование к орбите, линейное разрешение получаемого изображения, как правило, следуют из требований заказчика космической системы. Размер входного диаметра оптической системы влияет на величину регистрируемого излучения, которое также зависит от условий освещенности объекта (местного угла Солнца), оптических характеристик объекта, а так-

же влияние атмосферы (ее коэффициент спектрального пропускания).

Для выбранного телескопа требуемое значение ОСШ задавалось равным 50 для условий L2 (угол Солнца 30 градусов над горизонтом, альbedo объекта = 0.5). Далее, для получения требуемого значения ОСШ, рассчитывается минимальный диаметр апертуры или, в случае некруглой апертуры, ее минимальная площадь при данной форме апертуры. При расчете формы и площади апертуры отдельное внимание следует уделить недопущению виньетирования.

Значение фокусного расстояния телескопа рассчитывается из знания высоты орбиты (в данном примере – 630 км), размера пикселя матрицы (8 мкм) и требуемого линейного разрешения (10м). Эти данные приводят к значению фокусного расстояния = 504 см.

Важной характеристикой телескопа является его поле зрения (FoV – field of view), определяющее полосу захвата подстилающей поверхности. Как правило, она задается из требований заказчика КА и влияет на выбор высоты орбиты. Обычно для целей ДЗЗ выбирается солнечно – синхронная орбита (ССО), наклонение которой связано с ее высотой. При этом высота орбиты

также влияет на ее цикличность. Так при цикличности 14 витков в сутки на ССО – КА будет проходить над одним объектом 1 раз в сутки в заданное местное солнечное время, при  $14 \frac{1}{2}$  - 1 раз в 2 суток и т.д. Т.о. при требовании, например, возможности получения изображения протяженной поверхности (с востока на запад) 2000 км в течение 10 суток – полоса захвата должна быть около 20 км. В данном примере поставлено условие о возможности съемки территории РК в течение 30 суток, что приводит к требованию к полосе захвата не менее 70 км, с высоты 630 км и к значению FoV = 7.5 градусов.

В результате, с учетом заданных требований заказчика, для разрабатываемой системы, получаем следующую таблицу данных (Таблица 1).

Вычисление основных входных параметров телескопа позволяет проводить проектирование оптической системы, обладающую соответствующими оптическими характеристиками к которым относятся функция передачи модуляции (ФПМ), размер пятна рассеяния, отображающего точку подстилающей поверхности.

При проектировании оптической полезной нагрузки для КА ДЗЗ, с использованием имеющихся ПО, на этом этапе достаточным является

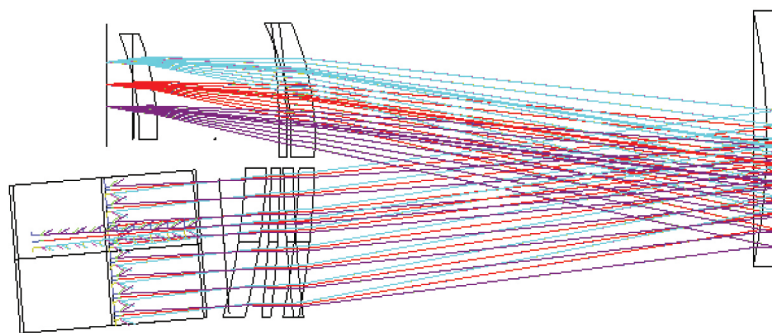
**Таблица 1** – Характеристики разрабатываемой системы

Параметр	Значение
Расчетная высота орбиты	630 км
Проекция пикселя на земную поверхность	10м
Ширина полосы захвата	80км
<b>Спектральные каналы</b>	
Синий	440нм – 510нм;
Зеленый	520нм – 590нм;
Красный	630нм – 685нм;
Ближний инфракрасный-1	776нм – 840нм;
Ближний инфракрасный-2	810нм – 840нм.
Отношение сигнала к шуму при угле Солнца от горизонта $30^0$ и альbedo 0.5	>50 для всех спектральных каналов
Фокальное расстояние	504мм
Размер апертуры	~75см <sup>2</sup>
Угол поля обзора	7.5 <sup>0</sup>
Детектор	5 линеек, 8000 пикселей на канал, (было: 12000 пикселей на канал, но используется только 8000)
Размеры элемента детектора	8мкм
Масса	<25кг

правильный выбор оптической системы: например, из уже известных, таких как чисто линзовых – триплет, 4 – х, 5 – и и т.д. зеркальных систем (Кассегрена, Корша и т.д.), зеркально-линзовых (катадиоптрических). В данном случае выбрана катадиоптрическая система, предварительный анализ которой позволил сделать вывод о ее пригодности с большой вероятностью.

Также, на данной стадии проектирования необходимо определиться с выбором марки стекла для производства линз хотя бы для предварительного проектирования и в дальнейшем, в зависимости от получаемых результатов, можно его заменить.

На рисунке 1 приведена схема выбранной катадиоптрической системы.



На данной схеме приведен ход лучей, позиции зеркала, корректирующих линз, а также блок фокальной плоскости (ФП).

**Рисунок 1** – Оптическая схема системы

После применения оптимизации, которая в ПО ZEMAX позволяет получить оптимальные значения всех геометрических параметров оптических элементов при достижении приемлемых значений оптических характеристик всей оптической системы, таких как ФПМ, диаграмма пятна, имеем значения величин, приведенные на рисунках 2 и 3.

На рисунке 2 представлен график функции передачи модуляции в канале Ближний инфракрасный-2. Данный канал взят для примера как худший случай – канал является наиболее удаленным от центра общего спектрального диапазона, и соответственно его ФПМ ниже, чем в других каналах. В данном случае, для спроектированной системы, имеем высокие значения функции на частоте Найквиста. Значения ФПМ в других каналах и в центре поля еще выше. Разными цветами на графике обозначены разные углы поля зрения телескопа, две линии одного цвета – один и тот же угол поля, но в сагиттальном и тангенциальном направлениях. Величина оптической ФПМ на частоте Найквиста более 60% является приемлемой величиной для телескопа среднего разрешения, с учетом запаса, чтобы это значение после проведения анализа на чувствительность

системы к механическим неточностям при изготовлении и задания температурного режима, не была ниже 45% для худшего канала.

На рисунке 3 представлена диаграмма изображения пятна рассеяния точки для различных углов поля в одном из спектральных каналов. Диаграмма пятна отображает геометрические размеры и форму пятна, отображающего точку подстилающей поверхности. Диаграмма представлена только для одного из спектральных каналов, так как диаграммы во всех каналах схожие. Лучи исходящие из одной точки подстилающей поверхности не могут собираться в точку на фокальной плоскости из-за явления дифракции, поэтому образуют пятно. Кольцо на диаграмме отображает диск Эйри, содержащий не менее 84% приходящего от точки излучения.

Приведенные данные на рисунках 2 и 3 позволяют говорить, что спроектированная система в полной мере с необходимым запасом, который используется при дальнейшем анализе системы, соответствует выставленным требованиям заказчика на значения основной оптической характеристики - ФПМ. В свою очередь эта величина также может быть задана или же рассчитана из требований заказчика к качеству изображения.

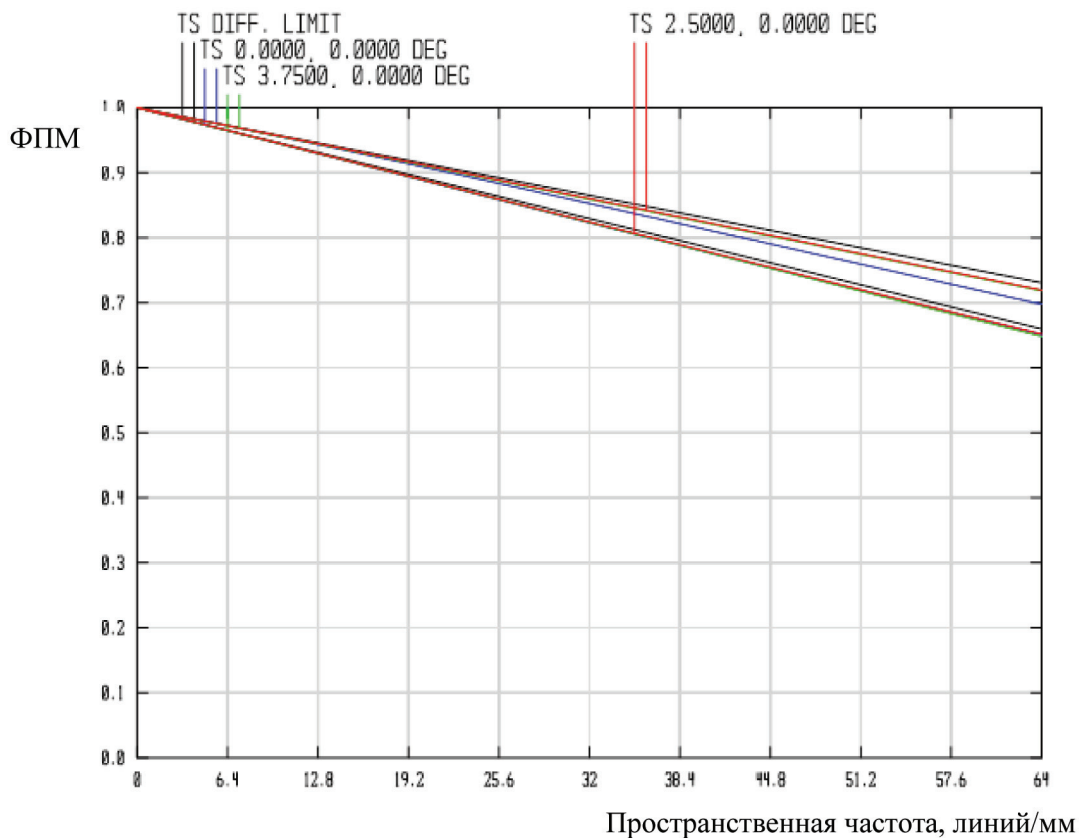


Рисунок 2 – График функции передачи модуляции для одного из спектральных каналов

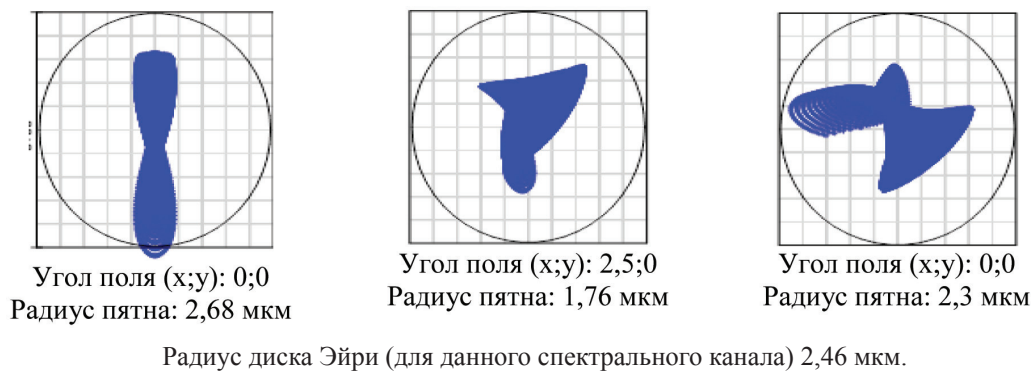


Рисунок 3 – Диаграммы пятна рассеяния точки в сравнении с размерами диска Эйри

Следующим этапом при проектировании телескопа является анализ на влияние внешних факторов, таких как учет влияния давления (вакуум) и изменение температуры. Если учет вакуума сказывается, в основном, на дефокусировке изображения, то изменение внешней температуры влияет на оптические характеристики линз (коэффициент преломления, число Аббе), что существенно сказывается на ходе лучей и, следовательно, на основные оптические характери-

ки. Как правило, рабочий диапазон изменения температуры определяется из требования, чтобы ФПМ в этом диапазоне не ухудшался более чем на 10%. Данный анализ можно провести существующими ПО, было получено, что при изменении температуры в диапазоне 20 град +5 град, значение ФПМ позволяет получить изображение необходимого качества. При этом уменьшение ФПМ идет за счет полученного запаса при проектировании. Полученный температурный диа-

пазон необходим при проектировании системы терморегулировании телескопа.

Следующим этапом при анализе спроектированной оптической системы, является учет влияния механических допусков при производстве ее элементов на оптические характеристики, т.е. чувствительность на механические неточности при монтаже (сборки) телескопа. Этот анализ также позволяет провести ПО Zemax.

В качестве допустимых погрешностей в изготовлении поверхностей линз (качество шлифовки), их толщин, точности установки элементов на требуемые позиции выбраны вполне достижимые следующие значения: обработка поверхностей – 0.02 мкм, точность установки и допуск на толщину линз – 0.05 мкм. Данные допуски также уменьшают полученное на первом этапе проектирования значение ФПМ, но за счет имеющего запаса, полученного на начальном этапе проектирования – оптические характеристики являются удовлетворительными.

Учитывая все эти факторы, ведущие к ухудшению оптических параметров, можно получить наиболее вероятные характеристики с учетом запаса.

Важным моментом при проектировании телескопа для КА ДЗЗ является выбор материала для изготовления его механической части, в частности, соответствия тепловых коэффициентов расширения материала и используемых стекол, соответствия бюджету масс, стоимости, технологичности сборки, а также выбор и компоновка электроники ПН. Данные вопросы выходят за рамки статьи и не будут рассматриваться.

К основным задачам проектирования оптической системы относится исключение попадания на фокальную плоскость излучения, не прошедшего через элементы телескопа – расчет бленды. В принципе, он сводится к определению ее размера и конфигурации. Важным здесь является соответствие ее длины тому размеру, который

отводится всей полезной нагрузке на платформе КА. Если для телескопа КА ДЗЗ этот вопрос не является сложным (так в данном примере длина трубы полностью исключает попадание боковых лучей на фокальную плоскость), то для оптической головки звездного датчика это является отдельной задачей. Современные ПО, такие как ZEMAX позволяют решить задачу расчета бленды в режиме непоследовательного хода лучей.

Одним из требований в технологии проектирования оптических систем для космического использования является проведение испытаний разработанной системы, что приводит к необходимости создания различных моделей инструмента для соответствующих испытаний – выработка философии моделей. В зависимости от важности миссии, бюджета проекта, наличия летной истории и т.д. возможно изготовление до 6 моделей оптического инструмента. Для настоящего проекта предполагается изготовление инженерной модели, протолетной модели, которая будет использована в миссии, т.е. становится летной моделью.

Для соответствия разработанной модели требованиям технической спецификации обязательным является проведение верификации летной модели, т.е. проведение измерений основных параметров оптоэлектронного тракта на соответствие расчетным. Данный процесс проводится с использованием соответствующего оборудования.

### Заключение

Таким образом, в настоящей работе описаны основные этапы проектирования телескопа для целей ДЗЗ на примере катадиоптрической системы, приведена используемая философия моделирования, описан этап верификации, что дает в целом представление о технологии разработки оптической полезной нагрузки.

*Данная работа выполнена при поддержке специалистов SSTL (Гилдфорд, Великобритания) в рамках проекта «Создание КС ДЗЗ РК».*

### References

- 1 Slyusarev G.G. Metody rascheta opticheskikh sistem. – L.: Mashinostroenie, 1969. – 672 s.
- 2 Maksutov D.D. Astronomicheskaya optika. – L.: Nauka, 1979 – 395 s.
- 3 Polezhaev V.V., Korshunova G.E., Tyagur V.M. Cerkal'no – linzovyi ob'ektiv. Patent na izobretenie № 2333518. Zaregistrirvano v Gosreestre RF 10.09.2008.