



# ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

#### ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

Сеник Б.Н., Калюгин В.С., Митрофанова Ю.С.	Проблемные вопросы внедрения промышленного производства инновационных широкоспектральных оптико-электронных изделий	8
Барышников Н.В.	Современные задачи взаимодействия университета с предприятиями оптико-электронной отрасли	10
Якушенко Ю.Г.	Тенденции развития оптико-электронных приборов и комплексов в рамках системного подхода к их проектированию	12
Бездидько С.Н.	Развитие новых направлений вычислительной оптики, обеспечивающих существенное повышение эффективности проектирования оптических систем	17
Бакланов А.И.	Новые тенденции развития космических систем оптико-электронного наблюдения земли высокого разрешения	19
Лукин А.В., Мельников А.Н., Скочилов А.Ф., Пышнов В.Н.	Система осевых синтезированных голограмм как основа прецизионного контроля процессов сборки и юстировки составных зеркал телескопов	30
Кабанов А.С., Пономарев В.А.	Новые горизонты промышленного применения современных вакуумных напылительных установок	32
Морозов С.А., Архипов С.А., Беляев К.С., Генжаев Ш.А., Кравченко С.О., Лузганова М.Ю., Сальникова М.А.	Схемные решения широкозахватной многоспектральной аппаратуры среднего разрешения «Соната»	34
Семенов А.П., Абдулкадыров М.А., Добриков Н.С., Игнатов А.Н., Патрикеев В.Е., Морозов А.Б., Азербайбаев Е.И., Папаев А.Ю.	Асферизация высокоасферичных внеосевых выпуклых элементов из астроситалла с асферичностью до 20 мм	37
Новиков В.П., Мазавин С.М., Тимофеев О.В., Шеваренков Д.Н.	Поликристаллический селенида цинка (CVD-ZnSe), как мультиспектральный материал для силовой и ИК оптики в диапазоне длин волн 0,5-14 микрон	42
Карев П.В.	Ультразвуковые пьезодвигатели Nanomotion для оптико-электронных приборов и комплексов	44
<b>СЕКЦИЯ 1</b>		
<b>ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И КОМПЛЕКСОВ</b>		
Тарасов В.В., Солодков А.А., Куликов В.Б., Маслов Д.В., Барабанов А.Б., Сабиров А.Р., Кобылин А.В., Хайлов А.В., Нечипуренко К.А., Неклюдов М.Ю., Чекмарев В.А., Пухтеев А.И., Запрягаев С.В.	Результаты разработки оптико-электронных приборов на базе охлаждаемых ФПУ в рамках научно-технической программы Союзного государства «Союзный тепловизор»	52
Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Козлов Д.А., Никулин А.Г., Монахов Д.О., Козлов И.А., Архипов С.А., Тышкун Н.В., Романовский А.С.	Опыт эксплуатации на орбите аппаратуры ИКФС-2 в составе КА «Метеор М» №2	55



<p><b>Вельтищева В.В., Тышкунов Н.В., Козлов Д.А., Козлов И.А.</b></p>	<p>Развитие отечественных бортовых ИК фурье-спектрометров</p>	<p>56</p>
<p><b>Клюшников М.В.</b></p>	<p>Высоко или низкоорбитальные? Сравнительный анализ возможных перспективных группировок ДЗЗ</p>	<p>58</p>
<p><b>Володин Е.Б.</b></p>	<p>Новые архитектурно-схемные и приборно-технологические возможности на основе кремниевых субмикронной и МОЭМС технологий для создания мобильных интеллектуальных устройств машинного зрения больших форматов в широком спектральном диапазоне длин волн</p>	<p>62</p>
<p><b>Карев П.В.</b></p>	<p>Пьезоактюаторы для высоконадежных применений</p>	<p>66</p>
<p><b>Заварзин В.И.</b></p>	<p>Обеспечение сохранности фотограмметрических характеристик оптико-электронной аппаратуры в процессе эксплуатации</p>	<p>70</p>
<p><b>Заварзин В.И.</b></p>	<p>Компактный медицинский гиперспектральный аппарат с автоколлимационным диспергирующим устройством</p>	<p>72</p>
<p><b>Заварзин В.И.</b></p>	<p>Зеркальные и зеркально-линзовые объективы с эксцентрично расположенным полем изображения</p>	<p>74</p>
<p><b>Шайда А.Н., Стратилатов Н.Р., Нонин А.С., Ткаченко А.С.</b></p>	<p>Определение параметров сетчатого композитного корпуса телескопа размеростабильного к действию температур</p>	<p>76</p>
<p><b>Ковалев М.С., Красин Г.К., Одинокоев С.Б., Сцепуро Н.Г.</b></p>	<p>Разработка инкрементного преобразователя угловых перемещений встраиваемого типа</p>	<p>77</p>
<p><b>Кортаев В.В., Васильев А.С.</b></p>	<p>Оптико-электронный преобразователь линейных перемещений субмикронной точности на основе штриховой меры</p>	<p>81</p>
<p><b>Малыгин М.С., Шлычков В.И.</b></p>	<p>Исследование способов автоматической фокусировки изображений в авиационных оптико-электронных системах</p>	<p>85</p>
<p><b>Богатова Г.А., Гречухин И.А., Гришин Е.А., Ивлев А.О., Коваль Ю.И., Митин К.В., Новикова О.Ю., Прилепский Б.В., Питик С.Д., Полунадеждин В.В., Польских С.Д.</b></p>	<p>Лазерный излучатель для подсветки низкоорбитальных космических объектов</p>	<p>89</p>
<p><b>Пискунов Д.Е., Павлов В.Ю., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф.</b></p>	<p>Компактные вариообъективы большой кратности для обзорно-поисковых и прицельных авиационных систем</p>	<p>92</p>
<p><b>Алехнович В.И., Ширанков А.Ф.</b></p>	<p>Лазерный прибор для мониторинга и проветривания шахт открытой разработки полезных ископаемых</p>	<p>96</p>
<p><b>Городничев В.А., Иванов С.Е., Федотов Ю.В., Белов М.Л., Филимонов П.А., Кувшинов А.В., Кравцов Д.А., Черпакова А.А.</b></p>	<p>Многофункциональный лазерный измеритель для контроля атмосферы и земной поверхности в УФ области спектра на длине волны 0,355 мкм</p>	<p>97</p>



<b>Чекалин В.Ф., Корнеев С.Л.</b>	Система калибровки целевой аппаратуры КА ДЗЗ	100
<b>Сальникова М.А., Архипов С.А.</b>	Математическая модель «экспресс-оценка» для проектирования прецизионных конструкций	102
<b>Морозов С.А., Архипов С.А., Беляев К.С., Генжаев Ш.А., Лузганова М.Ю., Сальникова М.А., Соловьёв Д.Е.</b>	Особенности схемных решений гиперспектральной аппаратуры «Бисер»	105
<b>Долгих А.Е., Жидков П.М.</b>	Имитационная модель лазерного дальномера, предназначенного для измерения дальности до космического мусора	108
<b>Егошин Д.А., Алешко Е.И., Курт В.И., Лаврухин В.П., Васильев Д.Ю.</b>	Аппаратура для измерения яркости объектов при испытаниях приборов ночного видения	112
<b>Квитка В.Е., Ключников М.В., Блинов В.Д.</b>	Алгоритмы шумоподавления, реализуемые в бортовой аппаратуре	114
<b>Воронин Е.Г.</b>	Изгиб строк оптико-электронных космических снимков	121
<b>Мирохин А.В., Яковчук Е.А.</b>	О совершенствовании программного обеспечения оптико-электронной станции мониторинга космоса	126
<b>Самбаров Г.Е., Сауткин В.А.</b>	Особенности орбитальной эволюции объектов околоземного космического пространства и возможный вариант решения проблемы их утилизации	127
<b>Алещев А.А., Колинко В.И., Коломийцев Е.Г., Ляхов А.Ю., Сауткин В.А.</b>	Разработка, анализ и оптимизация математической модели приемного оптико-электронного канала для мониторинга объектов околоземного космического пространства	129
<b>Байков А.В.</b>	Методика учета состояния облачности при планировании работы оптического информационного средства в автоматическом режиме	132
<b>Зубко А.В., Архипов С.А.</b>	Комплексная методика расчета радиационной стойкости космической аппаратуры ДЗЗ	135
<b>Якушенков П.О.</b>	Проект фотонного АЦП	140
<b>Гладышева Я.В., Барышников Н.В., Патрикеев В.Е.</b>	Разработка методики и исследование погрешностей алгоритма восстановления профиля плоской оптической поверхности высокой точности	144
<b>СЕКЦИЯ 2</b>		
<b>ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И КОМПЛЕКСОВ</b>		
<b>Тер-Нерсесянц Е.В.</b>	Основные направления разработок и производства специальных оптических волокон в АО «НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»	150



Одинокое С.Б., Сагателян Г.Р., Бугорков К.Н., Ковалёв М.С.	Возможности плазмохимического травления стекла с применением высокочастотной диодной системы	151
Бессмельцев В.П., Баев С.Г., Голошевский Н.В., Максимов М.В., Горяев Е.П., Кастеров В.В., Никаноров Ю.Н.	Лазерная технологическая рабочая станция для производства шкал, сеток, фотошаблонов	155
Жердев А.Ю., Шишова М.В., Лушников Д.С., Одинокое С.Б., Маркин В.В.	Оптический энкодер на основе четырёхсекционной дифракционной решётки	158
Валейский Д.В., Дорошкевич А.Г., Демидович Т.И., Красовский С.Н., Шушканова Т.Г.	Современное оптическое оборудование	163
Леун Е.В., Сысоев В.К., Шалай В.В., Беловолов М.И., Курлов В.Н., Волков П.В., Шулепов А.В.	Гибридная 3D измерительная головка для высокоточных контактных и бесконтактных координатных измерений изделий ракетно-космической промышленности	164
Алехнович В. И., Базров Б.М., Четвернин М. Ю., Ширанков А. Ф.	Прибор высокоточного контроля биения оси вращения роторов	167
Тимофеев О.В., Новиков В.П.	Получение высококачественных оптических поверхностей элементов на основе поликристаллического селенида цинка (CVD-ZnSe) в процессе механической и химико-механической обработки	169
Тимофеев О.В., Яшнова Н.А.	Исследование процесса травления и химико-механического полирования CVD-ZnSe с использованием полирующих травителей	171
Абдулкадыров М.А., Белосов С.П., Владимиров Н.М., Добриков Н.С., Игнатов А.Н., Патрикеев В.Е., Придня В.В., Полянщиков А.В., Семенов А.П., Шаров Ю.А.	Выполнение комплекса работ по восстановлению и улучшению оптических характеристик главного зеркала телескопа БТА	174
Добриков Н.С., Абдулкадыров М.А., Владимиров Н.М., Полянщиков А.В., Семенов А.П., Патрикеев В.Е.	Опыт обработки и исследования деформаций рабочей поверхности зеркал из карбида кремния	178
Дубов В.В., Перебейнос В.В., Рыжков А.А., Кузнецов А.Н.	Лазерный измеритель высоты нижней границы облаков	183
Горшков В.А., Васильева Е.Ю., Невров А.С., Щенникова Т.И., Герасименко В.В., Поздняков Ю.И., Склиаров С.Н.	Изготовление и комплексный контроль асферических зеркальных элементов изделия «Аврора-2»	186



<b>Горшков В.А., Корнеев Н.Г., Невров А.С., Казанцев А.О., Пономарёва О.А., Сальникова Л.Ю.</b>	Система адаптации внеосевого асферического зеркала Ø 1100 мм	189
<b>Горшков В.А., Корнеев Н.Г., Чурилин В.А.</b>	Внеосевые зеркальные коллиматоры с рабочим полем 200÷1000 мм для контроля качества оптико-электронных комплексов	193
<b>Андреева Н.П., Барашков М.С., Евстигнеев В.Л., Крымский М.И., Митин К.В., Рогалин В.Е.</b>	Нелинейно-оптические технологии создания источников из- лучения, перестраиваемых в УФ, видимом и ИК диапазонах	196
<b>Лукин А.В., Берденников А.В., Козлов С.Д., Мельни- ков А.Н., Насыров А.Р.</b>	Опыт использования лазерно-голографического инфракрас- ного интерферометра в оптическом производстве АО «НПО ГИПО»	199
<b>Смирнов А.М.</b>	Практические способы достижения требуемой чистоты поверхности оптических деталей перед нанесением оптиче- ских покрытий	201
<b>Пискунов Т.С., Барышни- ков Н.В., Животовский И.В., Чибисов П.В.</b>	Методика теоретического анализа системы измерения угло- вого рассогласования оптических осей приёмного и переда- ющего каналов высокоточных ЛЛС	203
<b>Гончаров Н.В.</b>	Современная отечественная углоизмерительная техника и испытательное оборудование	207
<b>Колинко В.И., Коломийцев Е.Г., Ляхов А.Ю., Сауткин В.А.</b>	Метод повышения чувствительности приёмных каналов астрономических оптико-электронных средств на основе спектрального разложения сигналов от наблюдаемых объектов	210
<b>Заварзин В.И., Белокуров Е.А.</b>	Качество изображения светосильных двухзеркальных объективов	211
<b>Павлов В.Ю., Ширанков А.Ф., Соломашенко А.Б.</b>	Разработка автономного видеоинформационного модуля индикации и прицеливания на основе голограммной оптики	214
<b>Пастухов В.В.</b>	Особенности обучения специалистов среднего звена для оптического производства	217
	<b>ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ</b>	220



**Пленарные доклады**  
**Оптико-электронные приборы**  
**и комплексы**

# ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ВНЕДРЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ИННОВАЦИОННЫХ ШИРОКОСПЕКТРАЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

СЕНИК Б.Н., КАЛЮГИН В.С., МИТРОФАНОВА Ю.С.

ПАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева»

E-mail: juli.05@mail.ru

Одной из актуальных задач сегодняшнего дня в области создания инновационных опτικο-электронных приборов и комплексов является решение целого ряда технических проблем, связанных с расширением возможностей вышеуказанного класса приборов, а именно: возможность их функционирования в видимом и различных ИК-спектральных диапазонах, что очень важно, как для изделий специального назначения, так и гражданского, повышение информативности, обеспечение более высоких выходных оптических параметров, минимизация массогабаритных характеристик, повышение надёжности и т.д.

Наряду с используемыми технологиями изготовления данных приборов для видимого спектрального диапазона, разработка и промышленное производство тепловизионных каналов, как составных частей, требует решения целого ряда задач.

Все вышеуказанные проблемы, так или иначе связаны с комплексными технологиями изготовления тепловизионных оптических каналов. Эти проблемы можно систематизировать по направлениям деятельности.

1. Организация устойчивого производства оптических материалов, используемых для изготовления элементов для оптических трактов: линз, призм, защитных окон и т.д. По данному вопросу, в настоящее время, можно констатировать, что в Российской Федерации, в основном, производство вышеуказанных оптических сред налажено. Требуется корректировка технических условий на материалы в части введения дополнительных нормируемых параметров, ужесточения точности измерения оптических характеристик и т.д.

Это касается целого ряда материалов: монокристаллических германия и кремния, сапфира ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), поликристаллических структур ZnS, ZnSe,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{LiF}_2$  и т.д.

В настоящее время существует целый ряд проблем прецизионного формообразования крупногабаритных оптических элементов из вышеуказанных материалов, которые требуют очень глубокой проработки технологических вопросов.

2. Создание соответствующей метрологической базы для проведения аттестационных измерений как параметров вышеуказанных оптических сред, так и измерений геометрических и светотехнических характеристик.

3. Требование минимизации массогабаритных параметров неизменно связано с сокращением в оптических схемах используемых традиционных оптических элементов: сферических линз, с условием внедрения в оптические тракты нетрадиционных оптических элементов – асферических и киноформных, которые позволяют в значительной степени решить вышеуказанную задачу. Внедрение инновационных технологических процессов изготовления вышеуказанных оптических элементов, методов контроля их качества, подготовка соответствующих отраслевых нормативно-технических документов является очень актуальной задачей сегодняшнего дня.

4. Изготовление оптических элементов для различных ИК-спектральных диапазонов



требует освоение комплексных технологий нанесения светоделительных, просветляющих и других типов покрытий для данных спектральных диапазонов. Это тоже требует подготовки специализированных вакуумных установок, приобретение спектрофотометров, работающих в данном спектральном диапазоне, а также отработки технологий нанесения равнотолщинных просветляющих покрытий, исключающих искривление геометрии на крутых поверхностях оптических элементов.

5. Очень сложной проблемой является отработка комплексных технологий сборки и юстировки объективов для данного класса приборов, в составе которых имеются киноформные и асферические элементы, ломаные оптические оси. В частности, необходимо отработать технологии прецизионной автоколлимационной вточки нетрадиционных оптических элементов в оправы с точностью позиционирования 0,005 мм, технологии юстировки оптических элементов в данных объективах с высокой степенью точности. Для решения вышеуказанных задач требуется, как правило, решение целого ряда вопросов по созданию ИК-контрольно-юстировочных стендов, имитаторов оптико-электронных приборов, которые в свою очередь в значительной степени упрощают выполнение сборочных и юстировочных задач данного класса оптических систем.

*Список литературы:*

1. *А.Б. Бельский, В.В. Потелов, Б.Н. Сенник «Разработка и исследование оптических систем для двухспектральных тепловизионных приборов (3.0-5.0 мкм, 8.0-12.5 мкм)» . Сборник «Техника средств связи», серия «Техника телевидения», выпуск 1, 2009 г. , стр. 77-86.*

# СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УНИВЕРСИТЕТА С ПРЕДПРИЯТИЯМИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ

**БАРЫШНИКОВ Н.В.**

**МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва**

**E-mail:** baryshnikov@bmstu.ru

Начало развития оптико-электронного направления в МГТУ им. Н.Э. Баумана связывается с 1938г., когда была образована кафедра «Оптико-механические приборы». В ее создании и становлении приняли участие крупные ученые-оптики и организаторы промышленности – Иван Афанасьевич Турыгин, Сергей Иванович Фрейберг. Эти ученые заложили учебно-научный фундамент оптико-электронного направления в университете. В настоящее время МГТУ им. Н.Э. Баумана это направление представлено кафедрой «Лазерные и оптико-электронные системы», научно-образовательным центром «Фотоника и ИК техника», а также НИИ «Радиоэлектроники и лазерной техники». Эти структуры имеют в своем распоряжении лаборатории, оснащенные современной техникой, в которых успешно работают выпускники нашей кафедры.

Развитие направления в университете всегда проходило в тесном взаимодействии с предприятиями оптико-электронной отрасли. Традиционно это касается вопросов подготовки кадров, а также вопросов проведения научных исследований в интересах предприятий.

Университет ведет обучение по всем современным направлениям подготовки – бакалавриат, специалитет, магистратура, а также ведет подготовку специалистов высшей квалификации в аспирантуре. В 2017 году контрольные цифры приема составили: бакалавриат – 40 человек, магистратура – 24 человека, специалитет – 91 человек. Это значительный прием, и обеспечение качественной подготовки требует напряженного труда сотрудников кафедры по обновлению учебных программ в соответствии с требованиями федерального государственного стандарта.

Отдельно хочется отметить возрастающие с каждым годом цифры целевого приема. В этом году на специалитет он составил практически 100% . Большим количеством мест выделяется на целевую аспирантуру. Конечно, ответственность предприятий за подбор контингента становится в таких условиях определяющей.

Университет активно участвует в реализации программ повышения квалификации и переподготовки кадров промышленности. Налажена методика согласования программ переподготовки, для их проведения обеспечиваются необходимые условия и квалифицированные преподаватели. В год силами кафедры проводится несколько курсов, объемом от 30 до 300 часов. Приглашаем предприятия отрасли для совместной реализации этих программ.

Практически все наши преподаватели одновременно работают в НИИ РЛ, в НОЦ «Фотоника и ИК техника», выполняют НИР, ОКР по заказам Минобрнауки, Минпромторга, МО, а также предприятий отрасли. Наши преподаватели – это действующие инженеры и научные сотрудники. Этот базовый принцип организации подготовки специалистов на кафедре сохраняется и поддерживается со дня основания кафедры. Особенностью нынешнего времени является актуализация вопросов увеличения выпуска гражданской продукции на предприятиях отрасли. В этой связи очень важно для предприятий и университета наладить постановку и проведение инновационных проектов.

Университет взаимодействует по этому направлению как с конкретными предприятиями, так и с руководством холдинга Швабе. Подготовка таких проектов, определение тематики, источников финансирования – это кропотливая работа. Надеемся, что реализация первых проектов начнется уже в этом году, а полученный опыт мы будем совместно использовать в дальнейшем.

Примером нашего удачного сотрудничества с предприятиями отрасли можно считать создание и оснащение на кафедре учебной лаборатории «Оптические технологии». В последние 3 года кафедра осуществляла методическое обеспечение лаборатории, а ведущие предприятия – ЛЗОС и КМЗ обеспечивали ее материальное оснащение. На сегодня лаборатория обеспечивает проведение лабораторного практикума по курсу «Оптические технологии», составлен план модернизации практикума курса «Сборка и юстировка ОЭП». По общему мнению сотрудников, эта лаборатория является одной из лучших на кафедре. На основе полученного опыта, в настоящее время составлен план модернизации еще двух лабораторий – «Приемников оптического излучения» и «Лазерной техники». Осуществление этого плана совместно с ведущими предприятиями отрасли будет лучшим подарком кафедре, которой исполнится в 2018 году 80 лет!

# ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И КОМПЛЕКСОВ В РАМКАХ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЮ

ЯКУШЕНКОВ Ю.Г.

Московский государственный университет геодезии и картографии

E-mail: yakush@miigaik.ru

*Приводится краткий перечень задач, возникающих перед разработчиками оптико-электронных приборов и комплексов (ОЭПК) в настоящее время. Отмечаются некоторые особенности современного этапа проектирования ОЭПК широкого назначения на базе системного подхода. Рассмотрены основные тенденции развития оптико-электронных систем 3-го поколения (ОЭС-3), работающих в двух и более рабочих спектральных диапазонах и использующих многоэлементные матричные фотоприемные устройства (ФПУ). Кратко рассматриваются проблемы совершенствования многодиапазонных (многоспектральных) и адаптивных систем. Приводятся сведения о некоторых методах и алгоритмах обработки выходных сигналов (изображений), получаемых с помощью ОЭПК.*

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка современных сложных многофункциональных оптико-электронных приборов и комплексов (ОЭПК) требует системного подхода к их проектированию на всех его этапах [1-3]. Это объясняется во многом тем, что оптические сигналы, принимаемые и обрабатываемые с их помощью, являются многомерными и требуют зачастую сложных алгоритмов обработки этих сигналов и изображений, получаемых на их основе. Достаточно характерным примером являются ОЭПК 3-го поколения – оптико-электронные системы (ОЭС - 3), работающие в двух и более рабочих спектральных диапазонах и использующие многоэлементные матричные фотоприемные устройства (ФПУ) [3-5].

Системный подход к проектированию сложных и многофункциональных систем, к которым относятся ОЭПК, неоднократно рассматривался в литературе. Он включает в себя:

- анализ и описание принципов построения и работы ОЭПК (системы) в целом; выбор модели системы;
- установление сходства и различия изучаемой системы и других систем;
- перенос по определенным правилам свойств выбранной модели на свойства изучаемой системы.

Конечной целью системного подхода является структурная оптимизация, состоящая в целенаправленном, обычно итерационном процессе получения конкретных результатов, например показателей качества работы ОЭПК, с целью оптимизации решения задачи, стоящей перед системой, при заданных условиях и ограничениях.

Большинству ОЭС-3 свойственны хорошее энергетическое, пространственное, спектральное и временное (динамическое) разрешение, что позволяет осуществлять автоматическое или полуавтоматическое распознавание и идентификацию различных источников излучения на больших дальностях при наличии помех. В таких системах эффективно используются различия в характере собственного и отраженного оптических излучений разных объектов в различных спектральных диапазонах.

В качестве примеров важнейших областей применения ОЭС-3 можно указать следующие:

- поиск движущихся и неподвижных объектов (целей) на больших площадях (в больших угловых полях) и определение их координат;
- целеуказание и передача данных о координатах целей другим системам и операторам, например, в систему наведения высокоточного оружия;
- круглосуточная разведка, обнаружение и целеуказание в условиях интенсивной маскировки и активного противодействия;
- обнаружение минных полей;
- автоматическое сопровождение движущихся и стационарных целей;
- автоматическая обработка сигналов для выдачи привязанной к карте информации на экран оператора и в систему автоматического обнаружения объектов;
- обнаружение факелов ракет и других излучателей;
- обнаружение и классификация химических, в частности взрывчатых, и отравляющих веществ.

Традиционным стремлением разработчиков ОЭПК является совершенствование элементной базы, в частности, создание новых многодиапазонных (многоспектральных) ФПУ высокого пространственного разрешения; оптических систем, работающих в широком спектральном диапазоне; снижение масс-габаритных параметров и энергопотребления; уменьшение стоимости отдельных компонентов и ОЭПК в целом и т.д.

К другим основным задачам, стоящими перед разработчиками ОЭПК, относятся:

- разработка методики выбора оптимальных спектральных рабочих диапазонов для систем конкретного назначения;
- развитие методов компьютерного моделирования сложных ОЭПК и условий их функционирования;
- определение корреляционных связей между сигналами, получаемыми в различных спектральных диапазонах;
- классификация различных объектов (материалов, покрытий, образований), обнаруживаемых или наблюдаемых с помощью ОЭПК;
- использование различий в поляризационных характеристиках отдельных объектов и фонов, на которых они наблюдаются.

Все большее внимание потребителей, а также разработчиков ОЭПК привлекают многодиапазонные (многоспектральные, спектрозональные) системы [4-7]. Использование двух или более рабочих спектральных поддиапазонов обеспечивается не только использованием отдельных оптических систем или ФПУ с разделенной спектральной характеристикой чувствительности, но и путем образования разностей сигналов, получаемых в схемах вычитания на выходе электронного тракта ОЭПК, или путем образования спектральных отношений [3-5].

Как известно, пути решения задач по выделению объектов на фоне помех и шумов можно разделить на две большие группы: основанные на выделении отдельных признаков и на корреляционной обработке. На практике наиболее часто применяются алгоритмы согласованной фильтрации; алгоритмы, основанные на статистических методах распознавания образов; алгоритмы, использующие в качестве эталонного изображения объекта его модель; алгоритмы на основе обучающихся нейронных сетей [3-12].

При реализации некоторых ОЭПК, построенных по принципу корреляционной обработки принимаемых сигналов, возможно нарушение алгоритма обработки из-за экранирования обнаруживаемого, наблюдаемого или исследуемого объекта или сбоя изображения. В этих случаях полезно иметь систему опорных точек (реперов), распределенных по полю обзора (сцене).

Трудности ее практической реализации состоят в невозможности сопровождения движущихся объектов, а также в зависимости векторов направлений на заданный объект от этих реперов.

Для устранения этих проблем возможно разделение ОЭПК на два канала. Первый может со-

держат реперы, размещенные по всей сцене, а второй состоит из реперов, расположенных в небольшом окне с центром в заданной точке расположения объекта. Здесь оказывается эффективным ряд методов пространственно-временной фильтрации [8-12].

Все шире используются методы пространственно-временной фильтрации сигналов от объектов на фоне помех. В литературе [3,10,11 и др.] содержатся описания этих методов и оценки их эффективности. Так, в [12] приводятся данные о результатах моделирования процесса обнаружения и селекции одного или нескольких ( $\leq 10$ ) движущихся объектов на фоне помех с помощью многоэлементных ФПУ. Они показали, что вероятность ложных тревог при использовании описанных выше алгоритмов и методов может быть сделана очень малой (порядка  $10^{-4} \dots 10^{-6}$  при числе кадров  $n = 10$  и  $10^{-12} \dots 10^{-15}$  при  $n = 20$ ).

Дальнейшее развитие метода пространственно-временной фильтрации предусматривает использование адаптивных фильтров, минимизирующих погрешности определения текущего значения скорости перемещения объекта. При получении ненулевых сигналов с нескольких элементов, образующих окно, которым просматривается вся сцена, можно селективировать сигнал по его амплитуде, а также по степени приближения элемента к центральному элементу окна. Окончательное распознавание движущегося объекта ведется с использованием ряда признаков: степени приближения полученного значения скорости к априорно известной, числа проанализированных кадров, числа потерь объекта при слежении за ним и др.

С учетом разнообразия условий работы ОЭПК весьма актуальным является создание адаптивных ОЭС-3, позволяющих сохранять высокие значения показателей качества и эффективности в самых различных условиях их эксплуатации, а также при совершенствовании их элементной базы [3,10,11]. Перспективной может оказаться ОЭС-3 для определения координат объектов, в которой при случайных изменениях четкости изображения кадра (сцены) и кадровой частоты и ограничении скорости считывания сигнала ФПУ оптимальные их значения определяются путем выравнивания оценок дисперсий межэлементных и межкадровых разностей. Для увеличения времени наблюдения с близкими значениями оценок указанных дисперсий пороги переключения можно снизить путём увеличения инерционности тракта измерения дисперсий [13].

Одним из распространенных методов автоматической адаптации заключается в выравнивании средней яркости изображения и приведении его к определенному (эталонному) значению. Для ряда приложений основной трудностью является неоптимальная регулировка в экстремальных случаях существования значительной облученности или яркости отдельных малоразмерных участков сцены. На среднюю яркость большое влияние оказывает яркость фона. Если динамический диапазон яркости наблюдаемого поля (сцены) велик и превышает динамический диапазон сигналов, обрабатываемых с помощью конкретной системы, возможно ослабить малоинформационную часть спектра пространственных частот, как правило низкочастотную, и усилить высокочастотную часть спектра путем сегментации и коррекции этого динамического диапазона [9].

В современных ОЭС-3 используются последние достижения цифровых методов обработки изображений. Так, нашли практическое применение цифровые системы сложения изображений, образующихся в отдельных рабочих спектральных каналах. При этом проще осуществляются регулировка яркости и выделение отдельных целей, устраняются различия во времени формирования изображений в отдельных каналах, обеспечивается большее угловое поле при независимой работе спектральных каналов. Кроме того, цифровое изображение легче встраивается в общий комплекс наблюдения и управления операциями.

Алгоритмическая (электронная) стабилизация изображения позволяет улучшить масс-энергетические и стоимостные характеристики комплексов, в составе которых работают многие ОЭПК. Она позволяет преобразовать нестабилизированную последовательность кадров (видеосигналов), подверженных межкадровым пространственным смещениям, к выходной по-

следовательности кадров, в которой нежелательные смещения изображения скомпенсированы в инерциальном пространстве в «подвижном» окне. В ОЭПК с электронной стабилизацией приходится применять ФПУ повышенного разрешения и широкопольные объективы с хорошим разрешением.

Последние десятилетия широко обсуждаются возможные применения нейронных сетей в ОЭПК. С их помощью может находиться дискриминантная (решающая, разделяющая) функция, необходимая для разделения кластера полезных сигналов (признаках объекта) от кластера шумов и помех [8,10,11].

Для решения одной из важнейших задач – распознавания сложных образов и целей в реальном масштабе времени эффективным оказывается использование метода нормированных канонических моментов различных порядков, теория которого довольно давно описана в литературе, однако о практическом применении этого метода в открытых публикациях говорится немного.

Обнаружение и идентификация объектов часто происходят путем сопоставления образуемого системой текущего изображения с некоторым эталонным. При этом используется априорная информация об объекте и фоне, на котором объект наблюдается (о сцене). Апостериорная информация представляет собой текущее изображение в том или ином рабочем спектральном диапазоне или поддиапазоне (спектральном канале) на выходе системы первичной обработки информации ОЭС, включающей в себя оптическую систему, ФПУ и первые блоки электронного тракта обработки сигнала, создаваемого ФПУ. Общая схема такого алгоритма неоднократно описывалась в литературе [3,8,10,11].

Основными трудностями на пути реализации этого алгоритма работы оптико-электронного комплекса являются недостаток априорной информации для построения достаточно адекватных имитационных компьютерных моделей [14,15], наличие возможных искажений и деформаций текущего изображения в пространственной, спектральной и временной областях; наличие помех в изображении сцены и затенения объекта.

В этой связи остаются актуальными такие направления исследований как:

- разработка робастных алгоритмов поиска, распознавания и классификации объектов;
- разработка методов и средств формирования эталонных изображений объектов и фонов;
- разработка систем управления, использующих ОЭПК для корректировки и наведения носителей ОЭПК или других систем использования получаемой информации.

Появляются сведения об обработке зашумленных изображений путем использования вейвлет-преобразований, которые применяются после одного из методов фильтрации сигналов, когда путем кодирования и передачи значимых (не равных нулю) вейвлет-коэффициентов производится их цифровая обработка [16].

Новым применительно к ОЭПК и перспективным методом является фрактальный анализ текстуры [17], поскольку фрактальная размерность обладает масштабной инвариантностью, что позволяет использовать ее в качестве дополнительной характеристики, повышающей качество сегментации.

Можно утверждать, что в настоящее время не существует универсальных автоматизированных методов анализа динамически изменяющихся сцен, на которых объект меняет свои параметры и характеристики (координаты, форму, текстуру и др.). Так, известные методы сегментации [11], разработанные главным образом для статических сцен, не всегда могут учитывать динамические характеристики фона, отсутствие априорной информации о пространственном положении объекта и имеющее место отношение сигнал-шум.

Актуальной проблемой становится совершенствование методов проектирования и испытаний ОЭПК, в частности, дальнейшее развитие компьютерного моделирования самих систем и условий их эксплуатации [5,14,15], а также метрологического обеспечения производства, особенно в связи с постоянно возрастающими требованиями к повышению всех видов разрешения ОЭПК.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный краткий обзор позволяет обобщить требования к современным ОЭПК и сформулировать ряд путей их совершенствования. Проектирование современных ОЭПК должно проводиться на основе системного подхода.

### Список литературы

1. Технология системного моделирования / под ред. С.В.Емельянова и др. – М.: Машиностроение; Берлин: Техник, 1988. – 520 с.
2. Щепетов А.Г. Основы проектирования приборов и систем: учебник для вузов. – М.: Академия, 2011. – 368 с.
3. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Введение в проектирование оптико-электронных приборов: системный подход. Учебник / Под ред. Ю.Г.Якушенкова – М.: Университетская книга, 2016.- 488 с.
4. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико- электронные системы с матричными приемниками излучения. – М.: Университетская книга; Логос, 2007. – 192 с.
5. Инфракрасные системы 3-го поколения / Тарасов В.В., Торшина И.П., Якушенков Ю.Г.; под общ.ред. Ю.Г.Якушенкова. - М.: Логос, 2011.-240 с.
6. Sood A.K., Richwine K., Puri Y.R. et al. Multispectral EO/IR sensor model for evaluating UV, visible, SWIR, MWIR and LWIR system performance // SPIE Proc., 2009. V. 7300, P. 73000H – 1...12.
7. Патент РФ на изобретение №2604898. Способ формирования спектрально-видео сигналов: /Ковин С.Д., Сагдуллаев Ю.С., заявл.26.06.2015; опублик. 20.12.2016. Бюл.№35
8. McAulay A., Kadar I. Neural networks for adaptive shape tracking // SPIE Proc, 1989. V. 1099. P. 74 – 82.
9. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: учебник – М.: Логос, 2011. – 568 с.
10. Driggers R.G., Cox P., Edwards T. Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems. – Boston, London: Artech House, 1998. – 427 p.
11. Гонсалес Р., Вуд Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
12. Patterson T.J., Chabries D.M., Christiansen R.W. Image processing for target detection using data from a staring mosaic infrared sensor geosynchronous orbit // Optical Engineering, 1986. V.25,№1. P.166-172.
13. Умбиталиев А.А., Пятков В.В., Цыцупин А.К., Левко Г.В., Морозов А.В. Оптико-электронная система измерений координат объектов с адаптацией параметров разложения. – Измерительная техника, 2017, №4, С.С.42-45.
14. Демин А.В., Которский Н.С. Имитационное моделирование информационно-измерительных и управляющих систем. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. – 139 с.
15. Торшина И.П. Компьютерное моделирование оптико-электронных систем первичной обработки информации. – М.: Университетская книга; Логос, 2009. – 248 с.
16. Бехтин Ю.С., Емельянов С.Г., Титов Д.В. Теоретические основы цифровой обработки изображений встраиваемых оптико-электронных систем. - М.: Аргатак-медиа, 2016.-296 с.
17. Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Фрактальные методы сегментации текстурных изображений. //»Известия вузов. Приборостроение», 2013, т.56, №5, -С.63-71



# РАЗВИТИЕ НОВЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ОПТИКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СУЩЕСТВЕННОЕ ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

БЕЗДИДЬКО С.Н.

ПАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева»

E-mail: sbezdidko@mail.ru

Проектирование (расчет) оптических систем заключается в нахождении конструктивных элементов такой оптической системы, которая, обладая заданными внешними характеристиками (фокусное расстояние, поле зрения, апертура, габариты и т.п.) и, будучи конструктивно целесообразной, обеспечивает получение требуемого по качеству изображения некоторого объекта. Как было показано Максвеллом в общем случае не существует идеальных оптических систем, дающих стигматическое изображение некоторого объекта и, следовательно, оптический прибор дает в какой-то мере размытое изображение точек, то есть обладает неустранимыми аберрациями. Причем величина аберраций зависит как от внешних характеристик оптической системы, так и от внутреннего строения и сложности самой системы (число поверхностей и их расположение, наличие асферических поверхностей, используемые марки стекла и т.п.). Поэтому, расчет оптической системы заключается в нахождении оптимального компромисса между внешними характеристиками системы, ее сложностью и реализуемостью в производстве с одной стороны и величиной допустимых остаточных аберраций с другой стороны, определяющих качество изображения. Отсюда можно сформулировать следующий вывод: *при расчете оптической системы не существует единственного решения, а сам расчет заключается в нахождении все более подходящих компромиссных решений.*

В руководстве пользователя одного из наиболее распространенных программных комплексов ZEMAX по расчету оптических систем уже на 1-й странице сформулировано следующее предупреждение: *«Ни программа ZEMAX, ни документация по ZEMAX не научат Вас, как проектировать оптические системы. Хотя программа и будет помогать Вам в проектировании и анализе оптических систем, все же основной проектировщик – Вы».*

Отсюда вытекает следующий вывод. *До настоящего времени расчет оптической системы во многом остается «искусством», зависящим от опыта и интуиции разработчика, а не точной инженерной дисциплиной, строго и однозначно алгоритмизирующей процесс проектирования.*

Анализ существующих программных комплексов проектирования оптических систем показывает, что в российских и зарубежных комплексах отсутствует этап синтеза, то есть этап, при помощи которого на основе требований технического задания (ТЗ) производится вычисление конструктивных параметров (построение) оптической системы, обладающей необходимыми коррекционными возможностями и являющейся хорошим предварительным решением для дальнейшей оптимизации. Предполагается, что исходная оптическая система уже существует или разработчик каким-либо способом создает ее самостоятельно.

Во-вторых, существующие программы оптимизации обладают значительной локальной ограниченностью, обусловленной многоэкстремальностью минимизируемой оценочной функции и, в большинстве случаев, **оптимизация не приводит к приемлемому решению**, а только лишь к нахождению ближайшего локального экстремума. Более того, **отсутствуют и соответствующие методы анализа коррекционных возможностей оптических систем**, методы определения причин, почему при оптимизации разработчик не получает приемлемого решения. Эти причины существенно снижают эффективность использования комплексов программ по расчету оптических систем.

В связи с этим особую актуальность приобретают работы по развитию новых направлений вычислительной оптики, обеспечивающих существенное повышение формализации процесса проектирования оптических систем и, следовательно, повышение эффективности оптических расчетов. В докладе будут представлены предложения по разработке эффективных подходов по созданию методов, алгоритмов и программного обеспечения синтеза оптических систем, новых подходов к созданию программ оптимизации, обладающих существенно уменьшенной локальной ограниченностью, а также рекомендации по оценке коррекционных возможностей оптических систем.

# НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

БАКЛАНОВ А.И.

Филиал АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС»  
г. Москва, Зеленоград

E-mail: optecs@samspace.ru

*Рассмотрены основные тенденции развития мировой группировки космических оптико-электронных систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения. Проведён анализ изменения основных целевых характеристик спутников и аппаратуры наблюдения, таких как разрешение, полоса захвата, периодичность наблюдения и информационная производительность. Большое внимание уделено технической реализации и способам достижения этих характеристик, в том числе и за счёт построения больших группировок однотипных спутников. Рассмотрены новые направления систем наблюдения, такие как «живое видео».*

*Ключевые слова: Дистанционное зондирование Земли, ДЗЗ, оптико-электронные спутники высокого и сверхвысокого разрешения, пространственное разрешение, информационная производительность, группировки спутников ДЗЗ.*

Начало XXI века стало началом эпохи коммерциализации космических систем ДЗЗ высокого разрешения. Восемнадцать лет назад (24 сентября 1999г.) на орбиту был выведен первый коммерческий оптико-электронный спутник высокого разрешения “Ikonos-2” (США). Потребителям во всём мире впервые стали доступны цифровые изображения земной поверхности с пространственным разрешением 1 метр и мультиспектральные с разрешением 4 метра. Спутник успешно отработал более 15 лет (до 31.03.2015г). Последующие годы стали периодом становления мировой группировки таких систем. Гражданские космические оптико-электронные спутники высокого разрешения появились не только у США (Quickbird-2, WorldView-I, GeoEye-1, WorldView-2, WorldView-3, WorldView-4), но и у Израиля (EROS-A, EROS-B), России (Ресурс-ДК1, Ресурс-П №1, Ресурс-П №2, Ресурс-П №3), Кореи (KompSat-2, KompSat-3, KompSat-3A), Индии (CartoSat-1, CartoSat-2, CartoSat-2A, CartoSat-2B), Франции (Pleiades -1A, Pleiades -1B, Spot-6, Spot-7) и ряда других стран. Характеристики некоторых космических аппаратов с аппаратурой высокого и сверхвысокого приведены в таблице 1.

Далеко не все страны, имеющие в своём распоряжении космические средства наблюдения, обладают техническими возможностями для их создания. В таких случаях государство или компании выступают заказчиком разработки оптико-электронной аппаратуры или спутника целиком или даже покупают и адаптируют для своих потребностей уже ранее созданный аппарат. Количество стран, имеющих собственные средства ДЗЗ исчисляется уже десятками, да и «клуб» государств, самостоятельно разрабатывающих спутники и оптико-электронную аппаратуру, не мал и включает: США, Россию, Францию, Китай, Индию, Израиль, Канаду, Японию, Италию, Великобританию, Германию, Корею. Свои разработки ведут Тайвань, Иран и некоторые другие страны. Разнообразие интересов, технических и экономических возможностей привело к появлению различных вариантов построения космических систем наблюдения. Появляются новые идеи и примеры их реализации, особенно на базе микроспутников. Каковы же современные тенденции развития средств ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения? Какие новые идеи выдвигаются разработчиками? Какие новые инструменты планируется создать? Какие конфигурации спутниковых систем наблюдения

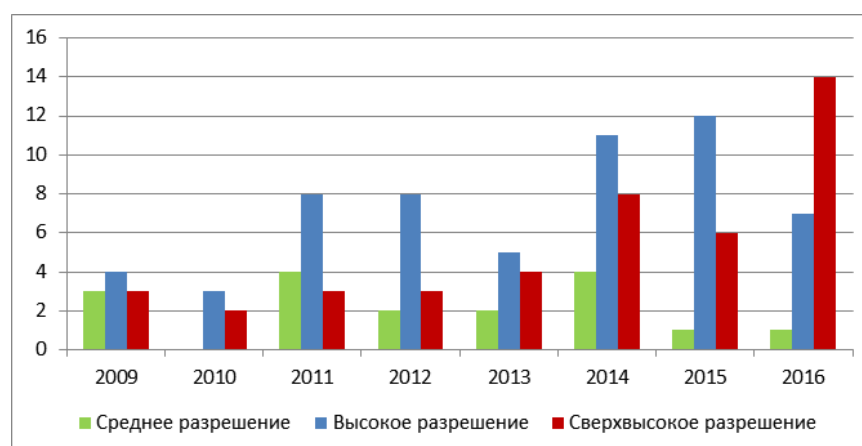
предлагаются реализовать в ближайшем будущем? Как и в какие сроки предполагается их реализовать? Как это повлияет на рынок услуг в ДЗЗ? Попробуем рассмотреть, как новые идеи в построении систем космического наблюдения, появившиеся в последние годы, так и «старые» уже хорошо проверенные концепции.

**Таблица 1. Характеристики спутников ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения**

Спутник	Страна	Год	Разрешение, м		Полоса захвата, км	Высота орбиты, км	Масса, кг
			ПХ	МС			
Ikonos	США	1999	0,81	3,2	11	700	817
Quickbird-2	США	2001	0,61	2,44	16,5	450	1100
Ресурс-ДК1	Россия	2006	0,8	0,8	28,4	350-600	6570
KompSat-2	Корея	2006	1	4	15	685	800
EROS-B	Израиль	2006	0,7	–	7,1	500	350
WorldView-1	США	2007	0,45	–	16,0	496	2500
GeoEye-1	США	2008	0,41	1,64	15,2	681	1955
WorldView-2	США	2009	0,45	1,8	16,4	767	2800
Pleiades-1A	Франция	2011	0,7	2,8	20	694	1015
Pleiades-1B	Франция	2012	0,7	2,8	20	694	1015
KompSat-3	Корея	2012	0,7	2,8	16,8	685	980
Ресурс-П №1	Россия	2013	0,7	2,1	38,6	475	6270
DubaiSat-2	ОЭА	2013	1,0	4,0	12,2	600	300
SkySat-1	США	2013	0,9	2,0	8	600	83

Развитие средств ДЗЗ идет нарастающими темпами. Ежегодно на орбиту выводятся два три десятка спутников ДЗЗ и метеонаблюдений. На диаграмме (рисунок 1) представлена статистика запусков по годам космических аппаратов с оптико-электронной аппаратурой сверхвысокого (менее 1 метра), высокого (от 1 до 10 метра) и среднего (10-250 метров) разрешения.

В этой статистике не учитываются запуски наноспутников Dove и Flock с оптико-электронной аппаратурой высокого разрешения, о которых ниже будет сказано отдельно. Видно, что доминирующими системами оптико-электронного наблюдения стали системы высокого и даже сверхвысокого разрешения. За последние годы на орбиту выведены десятки космических аппаратов с такой аппаратурой. Характеристики некоторых таких аппаратов, выведенных на орбиту в период 2014-2016 г.г. приведены в таблице 2.



**Рисунок 1.**

**Статистика запусков, по годам, спутников оптико-электронного наблюдения среднего, высокого и сверхвысокого разрешения**

**Таблица 2**

Спутник	Страна	Год	Разрешение, м		Полоса захвата, км	Высота орбиты, км	Масса, кг
			ПХ	МС			
EgypSat-2	Египет	2014	1	4	12,6	720	1080
KazEOSat-1	Казахстан	2014	1	4	20	740	830
Deimos-2	ОАЭ	2014	1	4	12	620	310
SkySat-2	США	2014	0,9	2,0	8	640	83
WorldView-3	США	2014	0,31	1,24	13,1	617	2800
Gaofen-2	Китай	2014	0,8	3,2	45 (2 кам)	630	2000
ASNARO-1	Япония	2014	0,5	2	10	520	495
Ресурс-П №2	Россия	2014	0,7	2,1	38,6	475	6570
KompSat-3A	Корея	2015	0,55	2,2	13	530	1112
DMC-3A,-3B,-3C	Китай	2015	1	4	23,4	650	447
Jilin-1	Китай	2015	0,72	2,88	11,6	670	430
Cartosat-2C	Индия	2016	0,65	2,0	11,0	510	727
Ресурс-П №3	Россия	2016	0,7	2,1	38,6	475	6270
SkySat-C1, -C2, -C3, -C4, -C5	США	2016	0,7	1,56	6,25	500	90 120
WorldView-4	США	2016	0,31	1,24	13,1	617	2087
SuperView-01, 02	Китай	2016	0,5	2,0	12,0	500	560

#### ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Анализ показывает, что наиболее общей тенденцией является стремление к повышению разрешающей способности оптико-электронной аппаратуры спутников ДЗЗ. Это постоянный доминирующий лейтмотив развития космических оптико-электронных систем наблюдения, который нашел отражение практически во всех классах решаемых задач дистанционного зондирования: природопользовании, картографии, в решении задач сельского и лесного хозяйства, предупреждении и контроле чрезвычайных ситуаций и т.п. Точно также многие практические подходы, связанные с изменением схем наблюдения, высоты орбиты, конструктивных параметров аппаратуры, её габаритов, а также габаритов спутниковых платформ в первую очередь направлены на повышение разрешения. Это можно проследить по хронологии появления новых поколений спутников высокого и сверхвысокого разрешения как в отдельных группировках и странах, так и в целом. Возьмем только несколько примеров. Первый коммерческий космический аппарат ДЗЗ «Ikonos-2» (1999г., компания «Space Imaging») имел пространственное разрешение (проекцию пикселя на Землю) – 0,81 м., а КА «GeoEye-1» (2008) созданный по заказу одноименной компании, ставшей наследницей «Space Imaging» имеет разрешение 0,41 м. Налицо двойное улучшение разрешения. Конкурент «Space Imaging» компания «DigitalGlobe» стартовала в 2001 году со спутником «Quickbird-2» с разрешением 0,61м. В 2007 г. на орбиту был выведен КА «WorldView-1» (разрешение 0,45 м), в 2008 КА «WorldView-2» (0,45 м.), а в 2014 и 2016 КА «WorldView-3» и «WorldView-3», с разрешением уже 0,31 м. Надо отметить, что спутники «GeoEye-1» и «WorldView-1, 2, 3, 4» создавались после выдачи правительством США лицензии на коммерческие КА с разрешением до 0,25 м. и их аппаратура потенциально может реализовать эти характеристики на более низких орбитах. Однако с коммерческой точки зрения требуется не только высокое разрешение, но и большая полоса захвата.

В техническом плане повышение разрешающей способности реализуется либо через увеличение фокусного расстояния используемой оптической системы, либо через уменьшение размера пикселей фотоприёмных матриц, используемых в аппаратуре, либо просто за счёт уменьшения высоты рабочей орбиты. На практике используются все три способа, причём иногда одновременно. Так если на американских спутниках «*Ikonos-2*» и «*Quickbird-2*» в панхроматическом канале использовались фотоприёмники с размером пикселей 12 мкм, то в следующих поколения спутников GeoEye-1» и «*WorldView-1, 2, 3, 4*» в фотоприёмных устройствах используются детекторы с размером пикселей 8 мкм. При этом существенно увеличились и параметры используемых оптических телескопов. Диаметр апертуры составляет уже 1,1 м вместо 0,6-0,7 м, а фокусное расстояние около 16 метров. Высота рабочих орбит понизилась у спутников последнего поколения до 617 км вместо 681 и 770 км у GeoEye-1» и «*WorldView-2*», соответственно. Аналогично высота рабочей орбиты КА «*KompSat-3A*», запущенного в 2015, была снижена до 530 км по сравнению 685 км у «*KompSat-3*», работающего на орбите с 2012 года. Это позволило довести разрешение до 0,55 вместо 0,7 м. Только полоса захвата соответственно уменьшилась до 13 км вместо имевшихся 16,8 км., т.к. использованы те же детекторы без изменений и длина строки фотоприёмников осталась прежней 24000 пикселей.

В связи с тем, что полоса захвата спутников наблюдения очень важна с коммерческой точки зрения для оперативного выполнения заказов, съёмки площадей, то существенное её уменьшение при увеличении разрешения не приветствуется. Поэтому длина строки фотоприёмников в детекторах новейших американских коммерческих оптико-электронных спутниках сверхвысокого разрешения достигла 43 тыс. пикселей по сравнению с 13,5 и 27 тысяч у аппаратуры КА «*Ikonos-2*» и «*Quickbird-2*». Ещё больше (54024 пикселей) длина строки в оптико-электронных преобразователях российских спутников ДЗЗ «Ресурс-П». Это позволило обеспечить полосу захвата в 38,6 км. Кстати, по сравнению со своим предшественником «Ресурс-ДК» количество пикселей в строке увеличилось ровно в полтора раза, а размер пикселей уменьшился также в 1,5 раза до 6 микрон, т.е. развитие отечественных средств ДЗЗ идёт параллельно теми же путями.

#### **ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ.**

Увеличение пространственного разрешения и полосы захвата, как правило, ведёт к существенному возрастанию количества информации, передаваемой на наземные приёмные пункты и тесно связано с информационной производительностью оптико-электронной аппаратуры. Это является ещё одной доминантой, характерной для коммерческих систем ДЗЗ высокого разрешения. При этом следует выделять информационную производительность как самой съёмочной аппаратуры, так и скорость, и объём передаваемой цифровой информации на приёмные станции, а также производительность космических систем наблюдения в целом. Традиционно производительность определяют, как площадь земной поверхности снимаемую и передаваемую на приёмные станции за одни сутки. Тем не менее определяется она в первую очередь техническими характеристиками оптико-электронной аппаратуры и служебных систем спутника. К уже упоминавшимся длине строки фотоприёмника детектора и полосе захвата, в первую очередь, следует добавить объём бортового запоминающего устройства и скорость сброса информации через радиолинию. При этом определяющим фактором может являться не только возможности бортовой аппаратуры и самого спутника, а сеть наземных станций, обеспечивающих как приём информации ДЗЗ, так и управление спутником (или группировкой спутников) и аппаратурой, установленной на нем. Объём бортовой памяти оптико-электронных спутников, используемой для хранения снимков высокого и сверхвысокого разрешения, непрерывно растёт от поколения к поколению. На первом поколения спутников, к которым следует отнести «*Ikonos-2*» и «*Quickbird-2*», объём бортовой памяти был относительно неболь-

шим и составлял 64 и 128 Гбит соответственно. При этом передача данных на приёмные станции обеспечивалась по радиоканалу с пропускной способностью 320 Мбит/с. Это обеспечивало съёмку до 64-100 сцен на витке до заполнения памяти. Объём бортовой памяти космические аппараты нового поколения увеличился более чем на порядок. Для сравнения, «GeoEye1» - 1000 Гбит, «WorldView» с 1 по 3 – 2199 Гбит, а «WorldView-4» уже 3200 Гбит. Соответственно потребовалось увеличить скорость передачи данных через бортовую радиолинию до 740 («GeoEye1»), 800 «WorldView-1, 2, 4» и 1200 Мбит/с «WorldView-3». Аналогичные эволюции в своём развитии претерпевают и космические системы других стран. При этом следует отметить, что радиолинии передачи информации космос-земля в X-диапазоне уже вышли практически на максимальные скорости и в новых поколениях систем активно рассматривается использование других диапазонов частот, а также исследуются (в том числе и экспериментально) возможности передачи данных на наземные пункты по оптическим каналам.

**Таблица 3. Информационные характеристики группировки спутников сверхвысокого разрешения компании DigitalGlobe**

Характеристика	WorldView-1	GeoEye-1	WorldView-2	WorldView-3	WorldView-4
Рабочая высота орбиты	496 км	681 км	770 км	617 км	617 км
Спектральные диапазоны	Pan	Pan+4MS	Pan+8MS	Pan + 8 MS + + 8 SWIR	Pan + 4 MS
Разрешение в ПХ канале (надир)	0.50 м	0.41 м	0.46 м	0.31 м	0.31 м
Разрешение в МС каналах)	нет	1.64 м	1.85 м	1.24 м	1.24 м
Точность привязки (надир)	6.5 м CE90	3 м CE90	6.5 м CE90	3.5 м CE90	4 м CE90
Полоса захвата	17.7 км	15.3 км	16.4 км	13.2 км	13.1 км
Период повторной съёмки на широте 40° СШ	1.7 дня	<3 дня	1.1 дня	1.0 день	1.0 день
Площадь снимаемой площадки (до 30° от надира)	111x112 км <sup>2</sup> (6 Полос)	45x12 км <sup>2</sup> (3 Полос)	138x112 км <sup>2</sup> (8 Полос)	69x112 км <sup>2</sup> (5 Полос)	66.5x112 км <sup>2</sup> (5 Полос)
Стереоскопическая площадка (до 30° от надира)	51x112 км <sup>2</sup> (3 Пары)	15x112 км <sup>2</sup> (1 Пара)	63x112 км <sup>2</sup> (4 Пары)	28x112 км <sup>2</sup> (2 Пары)	26.6x112 км <sup>2</sup> (2 Пары)
Масса КА	2500 кг	1955 кг	2800 кг	2800 кг	2600 кг
Приводы управления	CMGs	Reaction wheels	CMGs	CMGs	CMGs
Ёмкость бортовой памяти	2199 Гбит	1000 Гбит	2199 Гбит	2199 Гбит	3200 Гбит
Скорость передачи данных	800 Мбит/с	740 Мбит/с	800 Мбит/с	800 или 1200	800 Мбит/с

Историю эволюции основных информационных характеристик группировки американских спутников сверхвысокого разрешения, которая принадлежит сейчас компании DigitalGlobe можно проследить по данным таблицы 3. Группировка включает 5 спутников: «WorldView-1», «GeoEye-1», «WorldView-2», «WorldView-3» и «WorldView-4». На сегодняшний день это крупнейшая мировая группировка спутников сверхвысокого разрешения, данные с которой форми-

руют рынок услуг в этой области. Суточная производительность съёмки каждого из перечисленных космических аппаратов около 700 тысяч квадратных километров. В связи с обозначившейся конкуренцией на рынке данных высокого и сверхвысокого разрешения правомерно говорить о суммарной информационной производительности группировки спутников, принадлежащих одному оператору.

Важными параметрами для спутников высокого и сверхвысокого разрешения является возможность снимать на одном витке площадки заданной площади и разрешения, а также производить стереосъёмку определённых площадок. Для этого платформа космического аппарата должна обеспечивать быстрое перенацеливание на объекты, которое на борту обеспечивается применением маховиков (Reaction wheels) или силовые гиродинны (CMG – Control Moment Gyro). Площадки обычно складываются из 2-8 полос, снятых на одном витке. Важно, чтобы угол отклонения при съёмке не превышал допустимое значение. Это должно гарантировать заданное пространственное разрешение.

Повторяемость и периодичность наблюдения одних и тех же районов космической системой ДЗЗ это ещё одно постоянное требование, которое в значительной степени зависит от орбитального построения. Для спутников последнего поколения этот показатель достиг одного дня (т.е. съёмку одних и тех же объектов можно повторить через сутки). В начале эры коммерческих средств ДЗЗ высокого разрешения этот показатель составлял 3-7 суток. Кстати упомянутая выше группировка спутников DigitalGlobe позволяет снимать объекты в среднем до 4,5 раз в сутки.

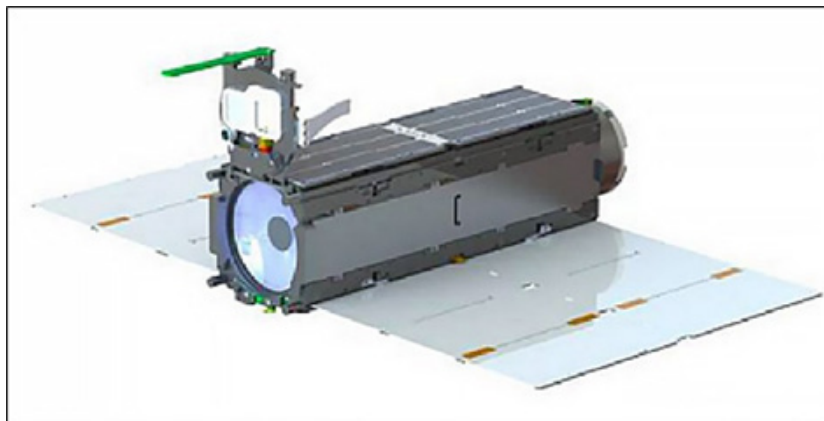
#### **ГРУППИРОВКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СПУТНИКОВ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

Вообще можно отметить, что группировками оптико-электронных спутников высокого и сверхвысокого разрешения обладают не только США (DigitalGlobe), но и Россия (3 спутника «Ресурс-П»), Франция (Pleiades-1A, 1B и Spot-6, 7), Корея (Kompsat-2, Kompsat-3, Kompsat-3A). После запуска КА IGS-O Demo и IGS-05 японская группировка спутников видовой разведки увеличилась до 7 космических аппаратов. Кроме того планируется развертывание группировки с разрешением 0,5 м на основе малогабаритных КА «ASRARO», первый из которых был запущен в 2014 году. Китай постоянно наращивает свою группировку спутников ДЗЗ, причём движется сразу по нескольким направлениям: картография (Tianhui, ZiYuan-3), высокое и сверхвысокое разрешение (ряд спутников из серий Yaogan, Gaofen). Делая ставку, в основном, на собственные силы и промышленность, китайские специалисты не пренебрегают и зарубежным опытом. Так в 2015 году на орбиту одним пуском были выведены сразу три спутника DMC-3 с разрешением 1 метр, разработанные и изготовленные специалистами SSTL (Великобритания) по заказу Китая. В 2016 году на орбиту одним пуском доставлена и приступила к работе пара лёгких (масса всего около 500 кг) китайских спутников, имеющих коммерческое наименование SuperView-01 и SuperView-02 (Gaojing-1-01 и Gaojing-1-02.) с разрешением 0,5 м. Планируется, что до 2022 года будет развёрнута группировка из 16 таких аппаратов и ещё 4-6 КА PCA.

Нужно отметить, что идея создания группировок коммерческих спутников ДЗЗ высокого разрешения не нова. Ещё в 2000 г., когда на орбиту был выведен израильский оптико-электронный спутник «EROS-A» с разрешением 1,9 м., планировалось, что в ближайшее время будет развёрнута группировка из 6 таких миниспутников. Однако время шло, а эта группировка так и не появилась. Только в 2006 г. на орбите появился ещё один израильский гражданский спутник «EROS-B» с улучшенными характеристиками. По всей видимости, тогда в начале двухтысячных ещё не сложилась коммерческая потребность в быстром обновлении данных высокого разрешения и в высокочастотной съёмке и контроле как отдельных объектов, так и больших территорий, вплоть до постоянного обновления данных на всю Землю.



Первым шагом к эре космических коммерческих группировок спутников ДЗЗ высокого разрешения можно считать вывод на орбиту в 2008 г. пяти оптико-электронных миниспутников «RapidEye» с разрешением 6,5 метра. Эта группировка спутников, с учётом характеристик аппаратуры, ориентирована в основном на оперативное получение данных в интересах сельского и лесного хозяйства. С 2013 г. компания «Planet Labs» начала реализовывать свои планы по развёртыванию группировки 3U кубсатов «Dove» («Flock») с разрешением 3-5 метров, нацеленной на оперативную съёмку всей поверхности Земли (рисунок 2).



**Рисунок 2.**  
**Внешний вид спутника Dove (Flock)**

В 2015 компания, переименованная в «Planet», выкупила у «Black Bridge» обанкротившуюся к тому времени группировку «RapidEye». Это объединение группировок одним оператором говорит не только о сохранении приоритетов сбора данных для сельского хозяйства, но и постановке новых задач, нацеленных на постоянный контроль промышленных объектов, транспортных сухопутных и морских перевозок и т.п. По заявлениям компании «Planet» именно за эти оперативные данные сегодня готовы платить заказчики. На конец февраля 2017 года на орбите работало уже 144 наноспутника Flock (Dove) различной модификации. На рисунке 3 «столбиками» показано количество ежегодно запускавшихся спутников типа Dove, а графиком количество реально работавших наноспутников из общего числа выведенных на орбиту. На этом этапе было заявлено, что компания в этот период достигла своей основной цели и создала группировку, способную получать изображение каждой точки на Земле с разрешением до 3,7 м с интервалом не более 24 часов. «Селфи Земли каждые 24 часа». По замыслу группировка этих спутников массой 4,5 кг должна насчитывать более 200 аппаратов. И 14 июля 2017 года попутно с запуском КА «Канопус-В-ИК» на орбиту было доставлено ещё 48 кубсатов типа «Dove». В течение всего периода развёртывания спутники выводились попутными запусками на орбиты близкие к основным космическим аппаратам, а также с МКС. В результате группировка существует на самых разных орбитах как по высоте, так и по наклонению. Пространственное разрешение также различное и составляет от 2,7 до 5 метров. Тем не менее основная (около 3/4) часть на солнечно синхронных орбитах и имеет разрешение около 3,7 метра. Планируется, что суточная производительность системы составит 150 млн. кв. км.

Полезная нагрузка типичного спутника «Dove» представляет собой телескоп Максутов-Кассегрен диаметром 90 мм и камеру на основе кадровой ПЗС матрицы с фильтром Байера, обеспечивающим классические R (610-700 нм), G (500-590 нм), B (420-530 нм) диапазоны цветного изображения. Фокусное расстояние телескопа 1140 мм. Интересно отметить, что собственно телескоп занимает 11/12 объёма всего спутника. По мере развития было создано три генерации полезной нагрузки. У первого поколения оптическая система содержала всего два

оптических элемента и имела матрицу форматом 11 Мегапикселей. В дальнейшем телескоп получил конструкцию из углепластика, стал содержать уже 5 оптических элементов. Его поле зрения увеличилось, качество изображения значительно улучшилось и вместе с ним стала использоваться фотоприёмная матрица форматом 29 Мегапикселей. В некоторых публикациях указывается, что ожидается генерация аппаратуры с дополнительным четвертым спектральным каналом в области ближнего ИК диапазона (760-900 нм). С высоты 475 км проекция пиксела составляет 3,73 метра, а размер снимаемого кадра 24,6 км x 16,4 км, т.е. 405 км<sup>2</sup>. Точность географической привязки — около 20 м (СЕ90).

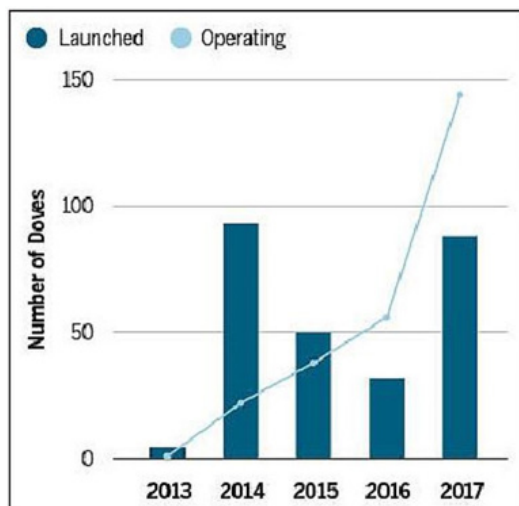


Рисунок 3.

### График развёртывания системы спутников Flock (Dove)

На борту происходит сложная обработка изображений: нелинейное гамма-кодирование; сжатие по алгоритму JPEG2000. В ходе обработки на борту разрешение изображения уменьшается с 12 бит до 8. Формат файлов после наземной обработки — GeoTIFF. Имеется дополнительный слой данных, в котором содержатся «битые» пиксели. Бортовое запоминающее устройство построено на базе коммерческого твердотельного накопителя.

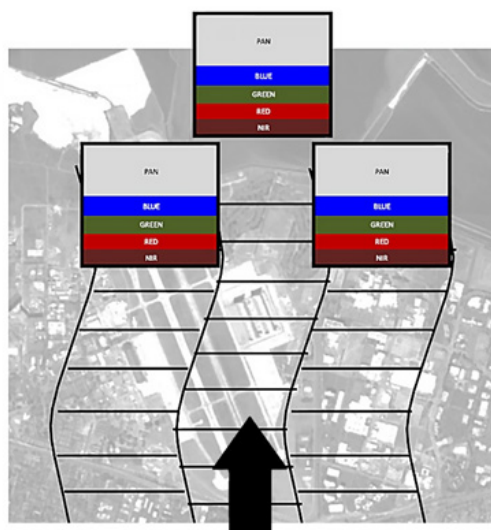
Радиолиния передачи информации на Землю работает в X-диапазоне (8025-8400 МГц, линия «космос-Земля», 2 канала по 66,8 МГц) со скоростью от 12,5 до 120 Мбит/с. Высокочастотная мощность передатчика составляет 2 Вт. Микрополосковая антенна установлена на обратной стороне откидывающейся крышки телескопа. Возможно использование манипуляций: QPSK, 8-PSK, 16-APSK, 32-APSK. Помехоустойчивое кодирование от 1/4 до 9/10. Аппаратура радиолинии выполнена из коммерчески доступных компонентов (разработанных для сотовой связи). Приём информации осуществляется на наземные станции с приемными антеннами диаметром 4,5...8 м. Для приёма целевой информации могут использоваться 36 антенн, размещённых в 12 районах Земного шара. Потенциально созданная наземная сеть может принимать и обрабатывать до 6 Тбайт информации в сутки от 150 спутников. Все процессы по управлению группировкой спутников и приёму информации максимально автоматизированы. По сообщениям компании для этого постоянно задействовано всего несколько человек.

В 2017 году компания Planet сделала следующий шаг в развитии своего бизнеса и приобрела у Google группировку спутников “SkySat” с разрешением лучше одного метра. В настоящее время на орбите находятся 5 таких КА (см. таблицы 1, 2). Масса каждого из первой пары спутников “SkySat-1” и “SkySat-2” около 90 кг. Последующие аппараты оснащаются двигательной установкой для поддержания орбиты и баллистического построения системы (рисунок 4). Планируется, что в будущем группировка будет доведена до 12, или даже до 24 КА, что обеспечит возможность съёмки любого объекта в средних широтах до 8-10 раз в сутки.



**Рисунок 4.**  
**Два поколения КА «SkySat»**

Каждый SkySat оснащён телескопом по схеме Ричи-Кретьена Кассегрена с фокусным расстоянием 3,6 метра. В фокальной плоскости установлены 3 КМОП матричных фотоприёмника форматом 2560 x 2160 пикселей (5,5 Мегапикселей). Размер пикселей 6,5 мкм. Расположение матриц в фокальной плоскости показано на рисунке 5. Верхняя половина детектора используется для получения панхроматических изображений. Нижняя разделена на 4 полосы, накрытые светофильтрами с синим, зелёным, красным и ближним-инфракрасным каналами. Проекция пикселей для первых двух аппаратов составляет 1,1 м. после наземной обработки передискретизации разрешение составляет 0,9 м. На последующих спутниках SkySat разрешение выше (0,7м) за счет снижения высоты орбиты.



**Рисунок 5.**  
**Расположение КМОП матриц SkySat и схема съёмки**

Основной особенностью является то, что съёмка ведётся кадрами с частотой 40Гц. Время накопления (экспозиции) минимизируется, что бы не было «смаза» изображения. Каждый кадр сжимается с использованием алгоритма JPEG2000, сохраняется в памяти общим объёмом 768 ГБ и передаётся на наземные станции со скоростью 450 Мбит/с. На наземной станции множество отдельных перекрывающихся кадров изображения накладываются друг на друга и суммируются обеспечивая повышение сигнала и отношения сигнал/шум. В результате получается 11 разрядный снимок с полосой захвата 8 км.

Положительным моментом такого режима съёмки является существенное снижение требований к точности ориентации и стабилизации космического аппарата в момент съёмки

(рисунок 5). Это облегчает и удешевляет системы космического аппарата и даёт выигрыш в массе и стоимости. Основная тяжесть обработки ложится на наземные алгоритмы, реализующие такой цифровой ВЗН. Однако «платой» за это является существенное увеличение объёма передаваемой на Землю информации в расчёте на один пиксел. Даже с учётом сжатия количество информации на один пиксель вырастит приблизительно пропорционально количеству кадров, используемых при суммировании. Соответственно уменьшится суточная производительность съёмки, выраженная в отснятой площади. Кроме того, для получения качественного изображения с высоким отношением сигнал/шум требуется прибегать к тангажному замедлению и увеличению экспозиции в каждом отдельном кадре. Это сближает спутники “SkySat” с КА “EROS-A” и “OrbView-3”, а также “Cartosat-2”, имевшими в фокальной плоскости только линейные фотоприёмники ПЗС и осуществлявшими съёмку с тангажным замедлением. Можно легко показать, что при прочих равных условиях качество изображения, полученное с использованием «классических» матриц ПЗС-ВЗН будет лучше. Однако в данном проекте приоритеты были, видимо, расставлены в пользу массовых и стоимостных характеристик.

Подводя итог рассмотрения развивающихся группировок спутников ДЗЗ высокого разрешения нужно упомянуть ещё о нескольких проектах, которые планируется реализовать в ближайшие годы. Компания BlackSky Global рассчитывает к 2019 году развернуть группировку из 60 спутников с разрешением 1 метр. Satellogic S.A. в мае 2016 г. осуществил запуск прототипов спутников своей будущей группировки. Спутники будут способны поставлять панхроматические и мультиспектральные данные с разрешением 1м, гиперспектральные – 30м., теплового ИК канала 90м. При развертывании 25 спутников повторная съёмка возможна через 1,2 часа, 100 спутников – 15 минут, а при 300 спутниках – 5 минут.

С появлением на рынке ДЗЗ таких игроков как Planet (спутники Flock и SkySat), BlackSky Global (60 оптических спутников), компании UrtheCast (8 оптических + 8 радиолокационных) значительно изменится цена на космические снимки и производные от них продукты в сторону удешевления.

#### КОСМИЧЕСКАЯ ВИДЕОСЪЁМКА

В последние годы стремительно набирает популярность тенденция к использованию бортовой аппаратуры, обеспечивающей съёмку с высоким пространственным разрешением. И хотя на слуху у всех спутники “SkySat”, обеспечивающие панхроматическую съёмку с разрешением 1,1 м. в формате HD 1920x1080 пикселей с частотой 30 кадров в секунду, пионерами в этом направлении были не они.

В далёком 1994 г. немецкая DLR в сотрудничестве с берлинским техническим университетом создала спутник Tubsat-B, который был выведен на орбиту совместно со спутником «Метеор-3». Проект носил в основном учебный характер. Спутник был оснащён видеокамерой на основе матрицы АЗС форматом всего 384x288 пикселей и имел разрешение 23x30 метров. Это был первый опыт и КА проработал на орбите только 39 дней.

Идея получила продолжение в микроспутнике DLR-Tubsat (1999 г.), который имел в своём составе уже три видеокамеры с разрешением 375, 120 и 6 метров. Камеры были созданы на основе кадровых матриц ПЗС форматом 750x580 пикселей размером 8x8 мкм и отличались только характеристиками использованных объективов. Фокусное расстояние камеры с максимальным разрешением составляло 1000 мм, что обеспечило поле зрения видеокadra 6 км x 4,6 км при разрешении 6 метров. Данные непосредственно передавались на Землю в аналоговом виде в стандарте PAL. Следующие модификации этого КА LAPAN-Tubsat, LAPAN-A2 (с разрешением 6 метра) создавались уже по заказу Индонезии. Индонезия отработала методики контроля судоходства с использованием видеосъёмки. При этом нужно иметь ввиду, что спутники, разработанные DLR, управляются и наводятся на объекты с помощью джойстика в режиме реального времени непосредственно в момент съёмки. Камера КА LAPAN-A2 имеет функции автоматического целеуказания для организации взаимодействия с системой управления во время съёмки

В настоящее время данные видеосъёмки используются для контроля транспортного трафика как на суше, так и на морских и речных коммуникациях, в портах и на рейдах, мониторинга работы промышленных объектов, строительства, разработки полезных ископаемых открытым способом, мониторинге чрезвычайных ситуаций и т.п. Некоторые из реализованных проектов спутников высокого разрешения с аппаратурой, обеспечивающей получение видеороликов, показаны в таблице 4.

Фотоприёмный тракт спутников SkySat реализован на кадровых КМОП матрицах, как это описано выше. Считывание информации происходит с высокой частотой кадров, поэтому реализация режима видеонаблюдения является естественным техническим решением вытекающем из архитектуры аппаратуры. Для получения панхроматических видеороликов спутник наводится на интересующий объект и удерживает его на своей линии визирования. При этом движение изображения в фокальной плоскости на оси визирования практически останавливается. Некомпенсированными остаются только погрешности, связанные с точностью систем стабилизации систем управления движением. Аппаратура SkySat обеспечивает получение 90 секунд видеороликом в формате HD 1920 x 1080 с частотой кадров 30 Гц. Формат представления данных mp4. По просьбе заказчика могут представляться данные в расширенном формате 2560 x 1080 пикселей.

**Таблица 4. Спутники ДЗЗ с аппаратурой видеонаблюдения**

Спутник	Страна	Год	Масса	Формат	Разрешение, м	Поле зрения	Длительность
DLR-Tubsat	Германия	1994	45 кг	750x580 RGB	6 м	4,5x3,5 км <sup>2</sup>	Сеанс связи
LAPAN-Tubsat	Индонезия	2007	56 кг	750x580 RGB	6 м	4,5x3,5 км <sup>2</sup>	Сеанс связи
LAPAN-A2	Индонезия	2015	68 кг	2048x2048 RGB	6 м	12 x 12 км <sup>2</sup>	Сеанс связи
SkySat-1;2-5	США	2013	80/120	2560x1080	1,1 м	2,0 x 1,1 км <sup>2</sup>	90 сек
Lingqia Video-A и -B	Китай	2015	95 кг	4K 3840x2160	1,1 м	4,3 x 2,4 км <sup>2</sup>	120 сек
Kent Ridge-1	Сингапур	2015	78 кг	—	6	5,75x4,75	----
Carbonite-1	Великобритания	2015	91 кг	—	1,5	---	----
Iris (UrtheCast)	Канада	---	---	UFHD	1		60 сек
Aleph-1	Аргентина	---	37	—	1	---	---

В 2015 Китай запустил одновременно два спутника Lingqia Video-A и Lingqia Video-B ориентированных только на видеосъёмку. Спутники оснащены камерами сверхвысокой чёткости 4K форматом 3840x2160 пикселей. Размер наблюдаемого кадра 4,3 x 2,4 км<sup>2</sup> и длительность видеозаписи 120 секунд существенно превышают характеристики аппаратуры SkySat.

На протяжении нескольких лет на МКС эксплуатируется камера Iris канадской фирмы UrtheCast с разрешением 1 метр, осуществляющая съёмку цветных роликов длительностью до 60 секунд с частотой 3 кадра в секунду. Запуск всё новых и новых спутников ДЗЗ, таких как Kent Ridge-1 (Сингапур), Carbonite-1 (Великобритания), свидетельствует о развитии этого направления. Следует ожидать появления специализированных приложений и программных средств для решения специфических задач, основанных на полученных космических видеоданных в режиме, близком к реальному.

# СИСТЕМА ОСЕВЫХ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ КАК ОСНОВА ПРЕЦИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ И ЮСТИРОВКИ СОСТАВНЫХ ЗЕРКАЛ ТЕЛЕСКОПОВ

ЛУКИН А.В., МЕЛЬНИКОВ А.Н., СКОЧИЛОВ А.Ф., \*ПЫШНОВ В.Н.

АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт  
прикладной оптики», г. Казань

\*Астрокосмический центр Физического института имени П. Н. Лебедева РАН, г. Москва

E-mail: gipo@telebit.ru

*Представлено техническое решение на основе использования системы осевых синтезированных голограмм, открывающее возможность выполнять прецизионный лазерно-голографический контроль процессов сборки и юстировки составных главных и вторичных зеркал телескопов. Предложенный подход рассмотрен на примере контроля процессов сборки и юстировки составного главного зеркала космической обсерватории «Миллиметрон».*

Параболическое составное главное зеркало космической обсерватории «Миллиметрон» (уравнение рабочей поверхности  $y^2 = 9600x$ , диаметр 10 метров) состоит из четырех ярусов отдельных панелей, устанавливаемых на подвижных опорах-актуаторах [1, 2]. Разработка конструкции панелей и технологий их прецизионного изготовления из высокомодульного цианатэфирного углепластика в течение ряда лет выполняется в Астрокосмическом центре Физического института имени П. Н. Лебедева РАН [3].

Ввиду чрезвычайно высокой светосилы главного зеркала этого телескопа для осуществления «полноразмерного» лазерно-голографического контроля [4 – 7] панелей крайних ярусов требуются крупногабаритные голограммы. К примеру, для контроля панелей четвертого яруса потребовалась бы голограмма двухметрового светового диаметра, для изготовления которой в настоящее время нет технологических возможностей. Поэтому предлагается альтернативное техническое решение этой проблемы – контролировать точность взаиморасположения панелей составного главного зеркала с использованием лишь отдельных сравнительно узких зон панелей вблизи их краев, что позволяет осуществить контроль процессов сборки и юстировки с помощью синтезированных голограмм существенно меньших размеров, изготовление которых возможно на имеющемся технологическом оборудовании.

Приводится принципиальная оптическая схема осуществления предложенного технического решения. Для контроля составного главного зеркала телескопа «Миллиметрон» предполагается использовать систему из четырех отражательных осевых синтезированных голограмм и инфракрасный лазерный источник излучения с длиной волны 10,6 мкм. Особенностью этой контрольной схемы является реализация «неавтоколлимационного» хода лучей.

Представлены частотные характеристики голограмм, рассчитанных для контроля процессов сборки и юстировки панелей каждого из четырех ярусов. Глубина штрихов дифракционной структуры голограмм должна быть  $\sim 3$  мкм. Имеющиеся в настоящее время методы, средства, технологии и оптические материалы в полной мере обеспечивают возможность расчета, изготовления и аттестации таких синтезированных голограмм с требуемой точностью [7, 8].

Целесообразно на начальных этапах процессов сборки и юстировки составных зеркал телескопов, когда отклонения от расчетных значений фактического положения образующих их рабочих поверхностей панелей наиболее велики, контроль осуществлять в дальнейшем

инфракрасном спектральном диапазоне. Подходящие для этих целей лазеры и системы регистрации инфракрасных изображений имеются, а отражательные бинарные синтезированные голограммы можно без особых трудностей изготовить на любую заданную лазерную длину волны [6, 7]. На этих этапах для контроля исходной установки панелей может быть также весьма полезно использовать и когерентные свойства излучения лазеров, работающих в многочастотном режиме генерации, – уменьшение практически до нуля контраста полос интерференционной картины при разности хода, кратной нечетному числу половинок оптической длины резонатора используемого лазера. Для полупроводниковых лазеров цена таких «маркерных» полос составляет сотни микрометров и может быть определена с достаточно высокой точностью [9].

На этой же основе при соответствующей доработке возможно, по нашему мнению, создание компактных лазерно-голографических контрольных средств с высокой устойчивостью к внешним воздействиям и малым энергопотреблением, в целом пригодных для функционирования в составе телескопов космического базирования.

#### *Список литературы:*

1. Электронный ресурс <http://millimetron.ru>.
2. Электронный ресурс <http://www.photonics.su/journal/2015/1>. Самое большое зеркало-рефлектор в мире // Фотоника. 2015. № 1 (49). С. 111.
3. *Пышинов В.Н.* Создание размерностабильных панелей из высокомодульного цианат-эфирного углепластика для рефлектора обсерватории «Миллиметрон» // Тез. докл. научно-техн. конф. «Оптико-электронные комплексы наземного и космического базирования». Лыткарино, 2014. С. 159–160.
4. *Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мустафин К.С.* Искусственная голограмма как оптический компенсатор // Оптика и спектроскопия. 1972. Т. 32. Вып. 2. С. 396–399.
5. *Агачев А.Р., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Миронова Т.А., Нюшкин А.А., Протасевич Д.В., Рафиков Р.А.* Синтезированная голограммная оптика // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 12. С. 23–32.
6. *Лукин А.В.* Голограммные оптические элементы // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 1. С. 80–87.
7. *Белозёров А., Ларионов Н., Лукин А., Мельников А.* Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения. Часть I // Фотоника. 2014. № 4 (46). С. 12–32.
8. Справочник технолога-оптика / Под ред. М.А. Окатова. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.
9. *Лукин А.В.* К вопросу о когерентных свойствах лазерных источников в интерферометрии и голографии // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 3. С. 91–96.

# НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ВАКУУМНЫХ НАПЫЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

КАБАНОВ А.С., ПОНОМАРЕВ В.А.

Представитель Leybold Optics, Представительство Бюлер АГ, г. Москва

E-mail: alexey.kabanov@buhlergroup.com

Исторически сложилось, что для производства прецизионной оптики в нашей стране наибольшее распространение получил термический (и его разновидность электронно-лучевой) способ нанесения покрытий. Прежде всего, это связано с относительной простотой технологии и возможностями отечественной промышленности выпускать вакуумные напылительные установки этого типа. Специалистам оптико-механических заводов нашей страны еще в Советское время довелось работать и на импортном оборудовании. Сотрудники предприятий СССР, имевших дело с вакуумным напылительным оборудованием импортного производства, всегда отмечали целый ряд его преимуществ по точности, надежности и технологичности. Вакуумные установки магнетронного типа для прецизионной оптики, появились на отечественных предприятиях в основном благодаря поставкам из-за рубежа. К сожалению, оборудование отечественного производства этого типа так и не вышло на удобоваримый уровень и в случаях, когда перед предприятиями встают предельные задачи, без импортного оборудования бывает не обойтись и сейчас.

Одним из примеров задач переднего края современной оптикоэлектронной промышленности является изготовление сверхкомпактных и точных оптических датчиков. Она заключается в изготовлении оптических фильтров не на стеклянных элементах и последующего их приклеивания к пластинам микропроцессоров, как это было принято ранее, а непосредственно на поверхности кремниевых пластин. Метод нанесения многослойных оптических покрытий на кремниевые пластины был недавно разработан, запатентован и внедрен Бюлер Leybold Optics. Одним из индикаторов состоятельности этой разработки явился заказ на 30 вакуумных напылительных установок HELIOS, который фирма Бюлер Leybold Optics получила в текущем году от одной из европейских компаний.

Технологической платформой для реализации этого метода стали ВНУ семейства HELIOS с технологией PARMS – радиочастотное магнетронное распыление с плазменным ассистированием.

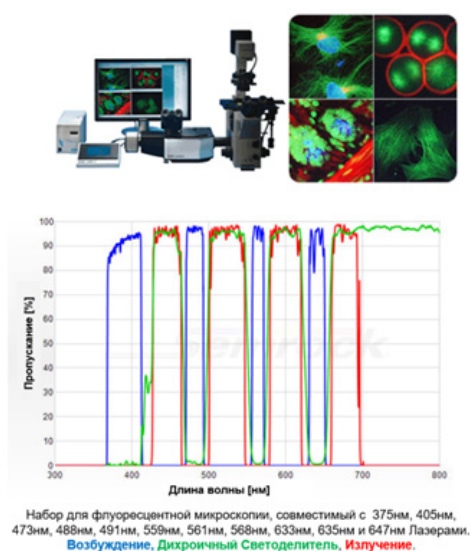


*Рисунок 1. HELIOS\_400*

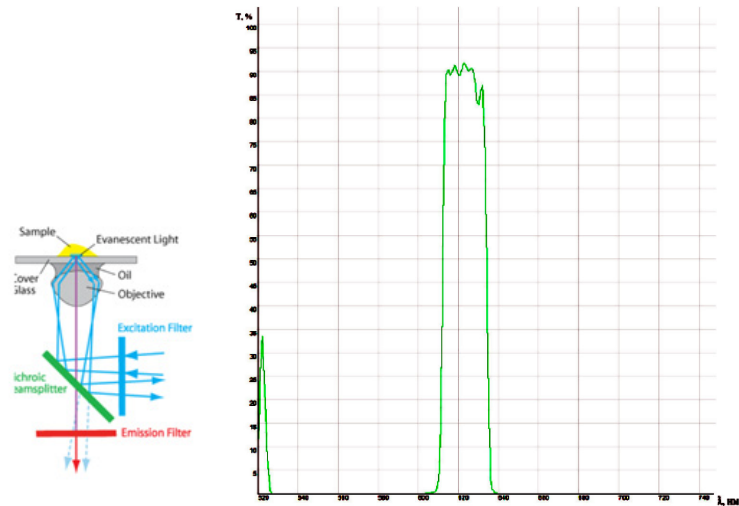


Традиционно это оборудование – установки данного типа выпускаются фирмой уже 15 лет – применяется для изготовления многослойных оптических фильтров со сверхсложными характеристиками. Его ключевыми особенностями являются возможность:

- нанесения покрытий, состоящих из сотен слоев совокупной толщиной в десятки микрон с очень низким поглощением и внутренними напряжениями,
- получения мультидиапазонных режекторных фильтров с высочайшей селективностью и точнейшим соответствием оптических характеристик покрытий расчетным,
- напыления слоев из металлов и субоксидов с помощью двойных MF магнетронов с оптимальным окислением в процессе напыления и последующим доокислением с помощью ионно-плазменного RF источника,
- совместного напыления с двух мишеней для легирования слоев и получения промежуточных показателей преломления,
- управления нанесением покрытий системой оптического контроля OMS 5100 непосредственно по подложке на просвет в широком диапазоне длин волн, начиная от ультрафиолетового.
- контроля свойств и толщин наносимых слоев по времени на основании усредненных значений напыленных в рамках техпроцесса слоев.



**Рисунок 2.**  
**Режекторный фильтр**



**Рисунок 3.**  
**WDM 623nm production\_curve**

К сожалению, на сегодняшний день еще ни одно российское предприятие не получило возможности поработать на ГЕЛИОСе, тогда как установки элетронно-лучевого типа семейства SYRUSpro уже достаточно хорошо известны специалистам российских оптико-механических заводов и коммерческих фирм.

Одной из них является Троицкий наноцентр и его резидент ООО «ОптиСпарк», специалисты которого освоили выпуск нескольких интересных продуктов. Одним из них является воспроизводимая технология напыления сложных 70-ти слойных светофильтров в видимой области спектра. Светофильтры имеют полосу пропускания 30 нм и блокировку 5-6 порядка ( $OD = 5-6$ ) на протяжении не менее 100 нм в обе стороны от медианы светопропускания.

Процесс напыления светофильтров идёт около 6-ти часов и практически не требует участия оператора. Линейные ошибки, неизбежно возникающие в процессе нанесения покрытия, устраняются системой оптического контроля благодаря пересчету точек отключения последующих слоев.

# СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ШИРОКОЗАХВАТНОЙ МНОГОСПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ СРЕДНЕГО РАЗРЕШЕНИЯ «СОНАТА»

МОРОЗОВ С.А., АРХИПОВ С.А., БЕЛЯЕВ К.С., ГЕНЖАЕВ Ш.А., КРАВЧЕНКО С.О.,  
ЛУЗГАНОВА М.Ю., САЛЬНИКОВА М.А.

ПАО «Красногорский завод им С.А. Зверева», г. Красногорск, Московская обл.

E-mail: msa@zenit-kmz.ru

В докладе затронуты проблемные вопросы проектирования современной широкозахватной многоспектральной оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли со средним пространственным разрешением. Рассмотрены особенности её оптической схемы, компоновки и конструкции. Подчеркнута возможность создания современной широкозахватной аппаратуры в сжатые сроки в соответствии с требованиями заказчика.

ШМАСР «Соната» разрабатывается ПАО КМЗ по заказу АО «РКЦ «Прогресс», предназначена для панхроматической и мультиспектральной съемки в полосе захвата 120 км с характеристиками:

Разрешение на местности, м	
- панхроматический диапазон	5
- мультиспектральные диапазоны	10
- коротковолновый ИК диапазон	20
Рабочий спектральный диапазон, мкм	
- панхроматический диапазон	ПХ=0,50-0,80
- мультиспектральные диапазоны	МС1-1=0,45-0,51 МС1-2=0,51-0,58 МС1-3=0,63-0,69 МС1-4=0,77-0,89 МС2-1=0,71-0,75 МС2-2=0,76-0,80 МС2-3=0,85-0,89 МС2-4=0,89-0,96
- коротковолновый ИК диапазон	1,55-1,70
Разрядность квантования сигнала, бит/выборку	12
СКП взаимного положения элементов дискретизации, угл. с.	2,0
СКП определения эффективной энергетической яркости на входном зрачке, %	5,0-7,0

Выбор схемного решения ШМАСР, - двухканальной оптической системы на базе зеркально-линзового объектива типа «Аргонавт» (патент РФ №2556295)\*, - выполнен в рамках проведения СЧ ОКР «Прибор» (Прибор-ШМАСР) [1,2]. Конструктивные параметры схемы оптимизированы для базовой орбиты функционирования КА (H=700 км), требуемого масштаба съёмки, формата импортных фотоприемных устройств, использованных в коротковолновом ИК диапазоне.

\* Пат. 2556295 Российская Федерация, МПК-2016.01 G02B 17/08. Двухканальный зеркально-линзовый объектив/Архипов С.А., Заварзин В.И., Кравченко С.О., Линько В.М., Морозов С.А., Тарасов А.П.; заявитель и правообладатель ПАО КМЗ – №2014105328/28, заявл. 14.02.2014; опубл. 10.07.2015, Бюл. №19, приоритет 14.02.2014 – 11 с.: ил.

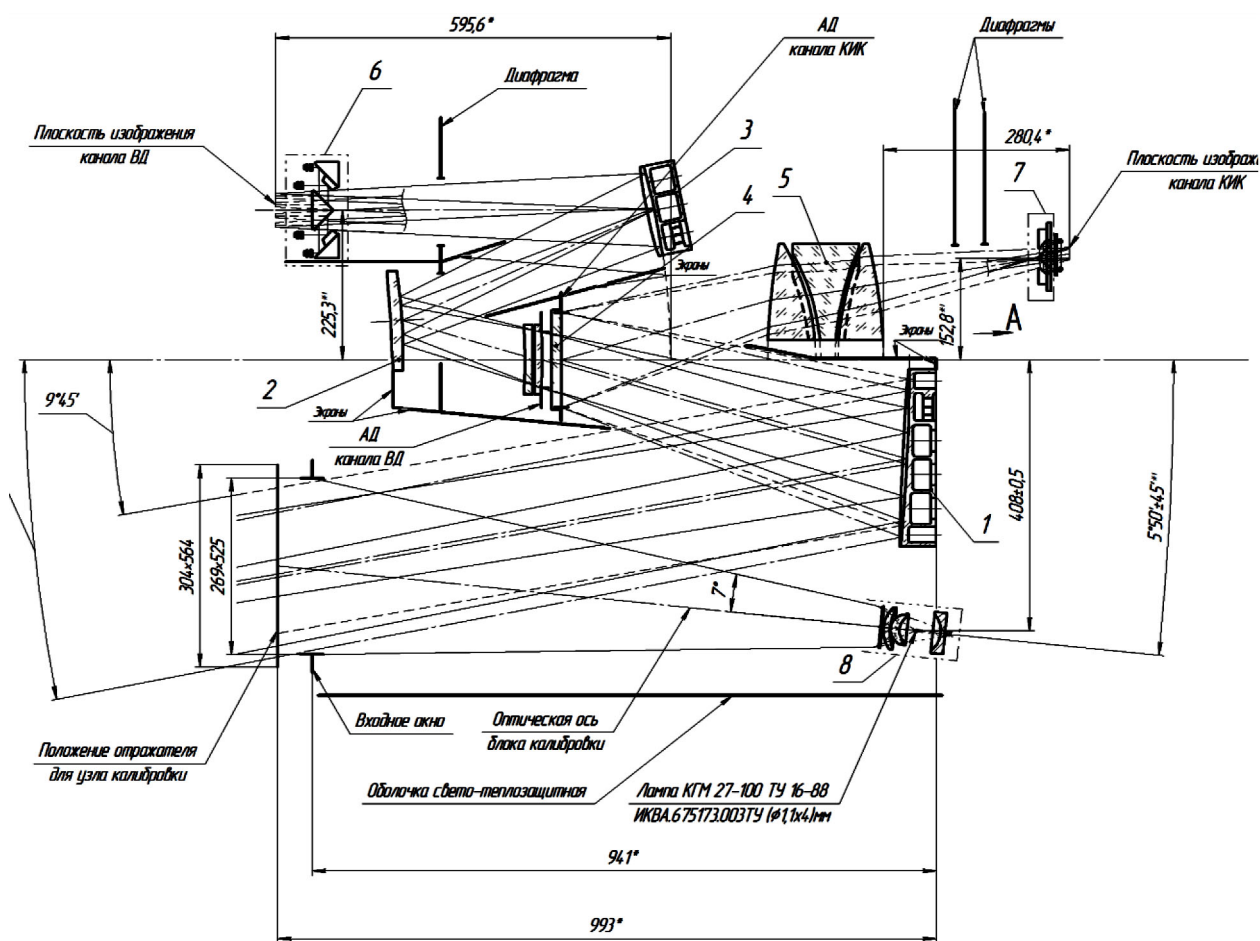
Представлены варианты модернизации ШМАСР «Соната», направленные на применение ФПУ-ИК отечественного производства и предусматривающие.

- увеличение числа каналов съёмки в коротковолновом ИК диапазоне длин волн, с целью расширения возможностей тематической обработки;
- расширение рабочего поля зрения (полосы захвата), с целью повышения периодичности обновления данных по территории России.

Оптическая схема включает (см. рисунок 1):

- объектив,
- устройство радиометрической калибровки (УК);
- блок согласования базовых осей;
- устройство согласования полей (узел фокальный) канала ВД;
- устройство согласования полей (узел фокальный) канала КИК [3].

Конструктивно все компоненты объединены в систему оптико-механическую ШМАСР (СОМ-СР).



**Рисунок 1.**  
**Оптическая схема ШМАСР «Соната»**

Блок согласования базовых осей выполнен в виде прецизионной зеркальной «призмы – куб», материализует приборную систему координат (ПСК) и обеспечивает:

- угловое позиционирование оптических элементов (их установку относительно ПСК) в процессе сборки и юстировки оптико-механической (СОМ-СР);
- аттестацию фотограмметрических параметров (элементов внутреннего ориентирования) при проведении ПСИ;

- контроль взаимного углового положения ПСК и базовой системы координат КА при установке СОМ-СР на платформу КА.

Выделение ПХ и МС рабочих спектральных диапазонов обеспечивается в ФПЗС «Комби» ОЭП-СР с помощью интерференционных фильтров. В каждом ОЭП-СР реализованы по пять фотозон - одна панхроматическая и четыре мультиспектральных. Выделение спектрального диапазона (1,55-1,70) мкм происходит в БРИ-КИК-СР. Длинноволновая граница определяется спектральной чувствительностью ФПУ. Коротковолновая граница – отрезающим покрытием, нанесенным на защитное стекло блока.

Устройство радиометрической калибровки состоит из двух элементов: блока радиометрической калибровки (БК) и диффузного отражателя, сформированного на внутренней поверхности крышки входного окна.

Выбор схемного решения оптической системы ШМАСР «Соната» в значительной мере продиктован несогласованностью параметров приёмников ВД и КИК каналов. Реализация отечественных ФПУ с ВЗН позволит сбалансировать требования к оптической системе ВД и КИК каналов, что предполагает модернизацию оптической схемы. Рассматриваются два направления модернизации:

1. Модернизация с сохранением преимущества конструкции объектива (разделение каналов на первой поверхности линзового компенсатора с помощью дихроичного зеркала);
2. Модернизация на базе одноканального объектива с разделением поля изображения (на ВД и КИК) с помощью дихроичных фильтров в заднем отрезке объектива.

#### *Список литературы:*

1. С.А. Архипов, В.М. Линько, С.А. Морозов. Аппаратура среднего разрешения. Выбор параметров и оптимизация схемного решения. Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: Материалы научно-технической конференции. – М.:МНТОРЭС им. А.С. Попова, филиал ФГУП «ГНП РКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС» - «НПП «ОПТЭКС», 2010.

2. С.А. Архипов, С.О. Кравченко, А.В. Ли, В.М. Линько, С.А. Морозов. Особенности схемного решения Широкозахватной многоспектральной аппаратуры среднего разрешения. Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: Материалы научно-технической конференции. - М.:МНТОРЭС им. А.С. Попова, филиал ФГУП «ГНП РКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС» - «НПП «ОПТЭКС», 2013.

3. В.В. Вельтищева, С.О. Кравченко, В.М. Линько, А.В. Ли, С.А. Морозов, М.А. Сальникова. Методика юстировки узлов фокальных видимого и коротковолнового инфракрасного каналов ШМАСР. Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: Материалы научно-технической конференции. М.:МНТОРЭС им. А.С. Попова, филиал ФГУП «ГНП РКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС» «НПП «ОПТЭКС», 2014.

# АСФЕРИЗАЦИЯ ВЫСОКОАСФЕРИЧНЫХ ВНЕОСЕВЫХ ВЫПУКЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ АСТРОСИТАЛЛА С АСФЕРИЧНОСТЬЮ до 20 мм

СЕМЕНОВ А.П., АБДУЛКАДЫРОВ М.А., ДОБРИКОВ Н.С., ИГНАТОВ А.Н.,  
ПАТРИКЕЕВ В.Е., МОРОЗОВ А.Б., АЗЕРБАЕВА Е.И., ПАПАЕВ А.Ю.

АО «Лыткаринский завод оптического стекла», г. Лыткарино Московской обл.

E-mail: lastro@lzos.ru

*Разработана технология с использованием автоматизированной системы с программным управлением и набором специальных инструментов, позволяющая выполнять асферизацию внеосевых крупногабаритных оптических элементов астрономических и космических телескопов с отклонением от ближайшей сферы до 20 мм. При этом управляемый процесс формообразования оптической поверхности ведется на всех стадиях - фрезерования, шлифования и полирования.*

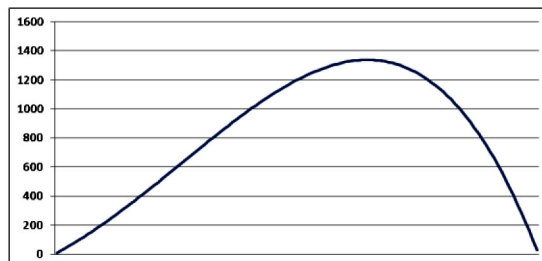
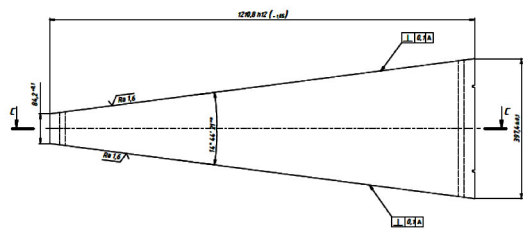
В последнее время в оптике все более активно используются оптические элементы с внеосевыми высокоасферичными оптическими поверхностями, с некруглой формой внешнего периметра детали. Для данных целей в АО ЛЗОС используется комплекс, включающий контрольное, технологическое оборудование и программное обеспечение для формообразования высокоасферичных (до 20 мм) и высокоапертурных (F/1) поверхностей оптических деталей[1,2]. Изготовлено большое количество внеосевых поверхностей оптических деталей, самых сложных в обработке и контроле оптических элементов.

Среди них наиболее сложные – оптические элементы, выполняемые по заказу Астрокосмического центра ФИАН (Физический институт академии наук). Это матрицы из Астроситалла в виде сегментов размером около 1400-1600 мм. Матрицы служат для прессования элементов составного главного зеркала из углепластика космического телескопа «Миллиметрон» (<http://radioastron.ru/>). Характерная особенность - высокая асферичность сегментов (от 1.3 до 20 мм) с отклонением от требуемой параболической формы менее 10 мкм. Допускаемые отклонения для всего главного зеркала обсерватории «Миллиметрон» диаметром 10 м составляют менее 100 микрон при асферичности 140 мм, при этом главное зеркало состоит из отдельных прецизионных панелей, которые устанавливаются на подвижных опорах – актуаторах. Впервые достигнута такая точность при высокой асферичности на крупногабаритном зеркале.

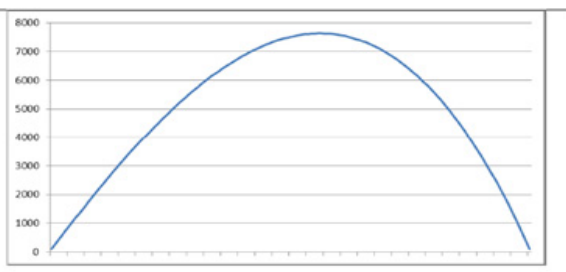
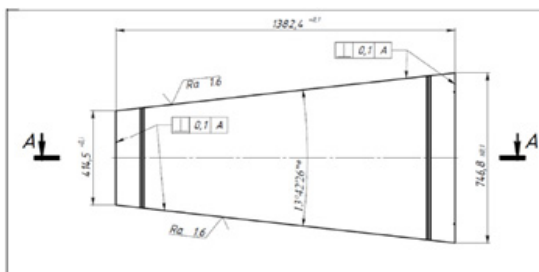
Параметры главного и вторичного зеркал приведены в таблице 1, а параметры сегментов и величина асферичности на рис. 1.

**Таблица 1. Параметры зеркал телескопа «Миллиметрон»**

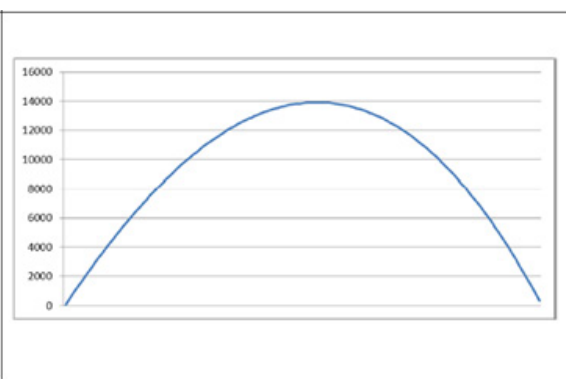
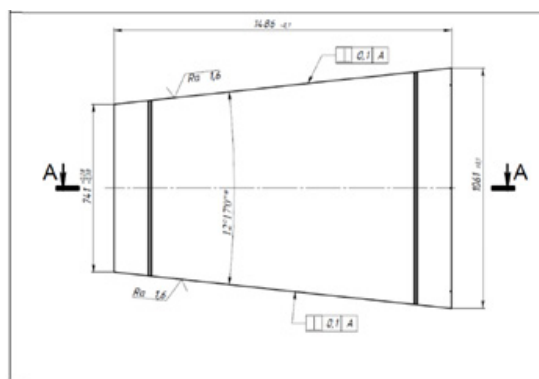
Параметры	Главное зеркало	Вторичное зеркало
Вершинный радиус, мм	-5 600	-275
Коническая константа, мм	-1	-1,1472778
Стрелка прогиба, мм	-3 214,3	-157,1
Световой диаметр, мм	10 000	600
Осевое расстояние, мм	-2 667,2	



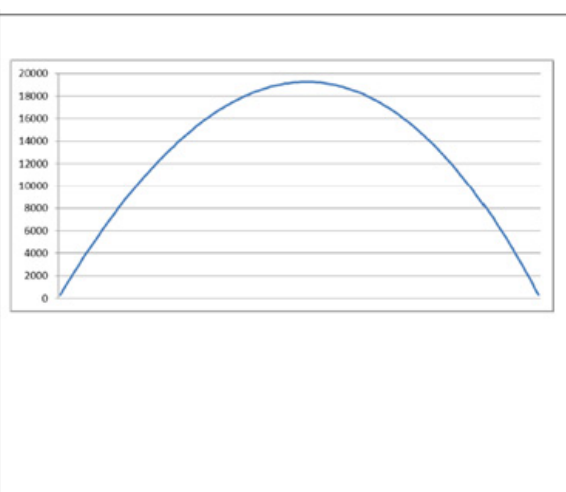
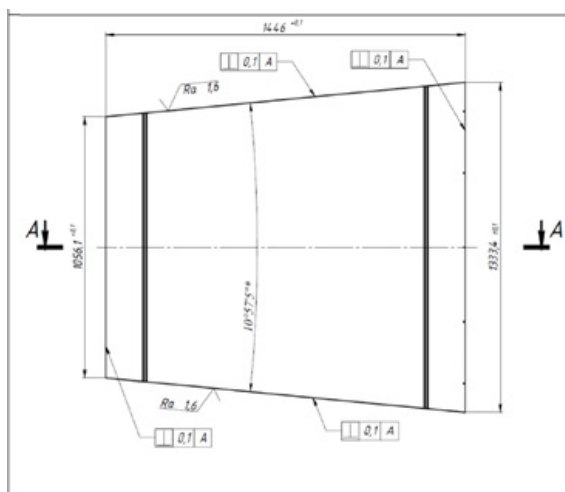
*Асферичность 1.3 мм*



*Асферичность 7.6 мм*



*Асферичность 13.9 мм*



*Асферичность 19.3 мм*

*Рисунок 1.*

*Параметры асферических сегментов*

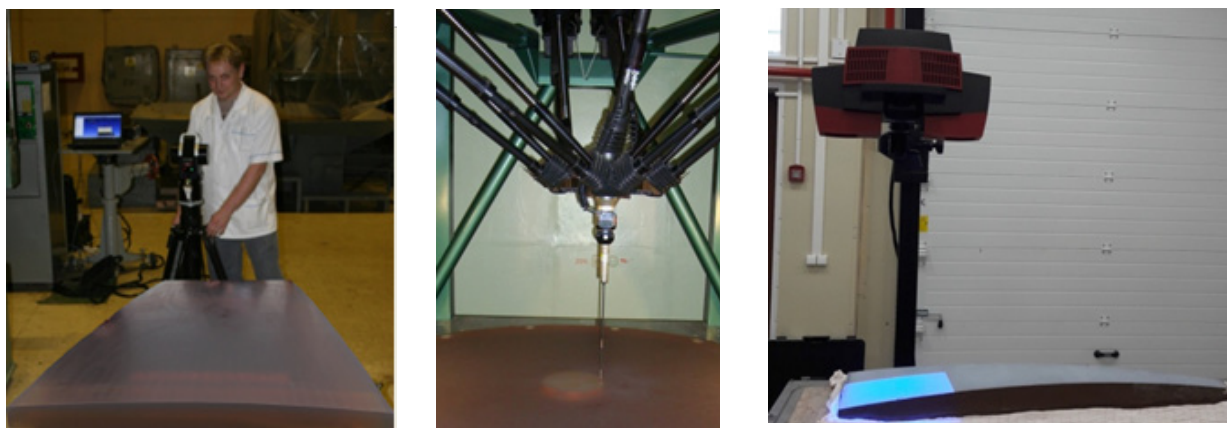
На матрице сразу формировалась выпуклая внеосевая асферическая поверхность. Работа выполнялась путем фрезерования кольцевым алмазным инструментом под управлением ЧПУ. Фрезерование проводилось в два этапа – грубый съём, когда инструмент снимал до 2 мм за про-

ход, и тонкая обработка, когда съем не превышал 0.5 мм. Такой подход позволил также снизить глубину нарушенного слоя. Как показали дальнейшие измерения, полученные асферические поверхности имеют отклонения менее чем 100 микрон. Общее время фрезерования асферической поверхности детали составило до 2 месяцев.



**Рисунок 2.**  
***Программно-управляемое фрезерование внеосевой выпуклой асферической поверхности матрицы***

Контроль формы поверхности после стадии фрезерования и на этапе шлифования выполнялся различными способами, на координатно-измерительной машине КИМ-1400 [3], с использованием лазерного трекера и с помощью измерительной машины ATOS III.



**Рисунок 3.**  
***Проведение контроля формы поверхности различными методами: с помощью лазерного трекера, измерительной машины КИМ-1400 и измерительного комплекса ATOSIII***

На грубой стадии фрезерования измерения можно выполнять с помощью лазерного трекера. Обработка измерений производится путем поиска отклонений от ближайшего параболоида с требуемыми параметрами. Определяется карта съема и корректируются параметры обработки с учетом конфигурации обрабатывающего инструмента и износа его обрабатывающих поверхностей. Точность измерений формы поверхности 10-20 мкм.

Для измерения асферической поверхности детали на КИМ-1400 была разработана оригинальная управляющая программа. Измерения проводились непосредственно в узловых точках сетки, соответствующих требованиям программно-управляемого комплекса. Точность измерений 3-5 мкм.

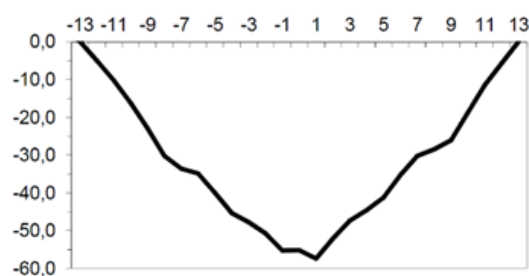
На всех стадиях формообразования и при завершении формообразования поверхности аттестационный контроль формы также проводился с использованием измерительного комплекса ATOS III. Система позволяет сопоставлять полученные результаты измерений с заданной моделью, вычисляя значения отклонений фактической поверхности от модели. При этом выполняется оптимизация по поиску лучшего пространственного соответствия модели и реальных данных. Точность измерений около 10 мкм.

Использование нескольких методов контроля позволяет более точно определять параметры поверхности и гарантированно получать требуемую поверхность.

Шлифование поверхности детали решало две задачи: устранение следов обработки и трещиноватого слоя после фрезерования, и доводка формы поверхности до требований спецификации – среднеквадратичное отклонение (RMS) должно быть меньше 1 мкм. Устранение следов обработки фрезой и дальнейшее шлифование выполнялось с использованием набора малых гибких инструментов на резиновой подложке с латунными пятками на станке с программным управлением.

На первоначальной стадии обработка велась в режиме заглаживания по траекториям так, что инструменты с одинаковой скоростью проходили по всей поверхности детали, реализуя равномерный сьем. Для устранения остаточного рельефа после фрезерования применялась более крупная фракция абразива, а затем все более мелкая для устранения остаточных ошибок и получения требуемой для полировки шероховатости.

Специально разработанная конструкция инструмента (рис. 5) позволяет осуществлять постоянный контакт всей его поверхности с поверхностью обрабатываемой детали при перемещении инструмента по поверхности детали. Инструмент в любой части детали обладает необходимой эластичностью и принимает форму поверхности, соответствующей форме обрабатываемой поверхности в данной области и создает максимально возможное давление на деталь для осуществления съема материала. При этом будет сохраняться постоянный вид профиля съема под инструментом. Профиль съема под инструментом определяется экспериментально (рис. 4). Этот профиль съема вводится в программу для расчета сеанса обработки асферической поверхности.



*Рисунок 4.*

*Профиль съема под инструментом в мкм*



*Рисунок 5.*

*Шлифующий инструмент*

Когда была достигнута асферическая поверхность требуемого качества, она была отполирована. Полировка также проводилась набором малых инструментов (рис. 6).

Например на матрице типа 1 (рис. 1) после устранения выбросов, связанных с погрешностью измерений ATOS III, была проведена аппроксимация полиномами. Размах отклонений составляет 5.73 мкм, RMS – 1.07 мкм. Полученные значения совпадают с измеренными на приборе КИМ-1400. На рис. 7 показана панель из углепластика на матрице. На рис. 8 представлены элементы главного зеркала из углепластика, полученные с использованием матрицы типа 1.

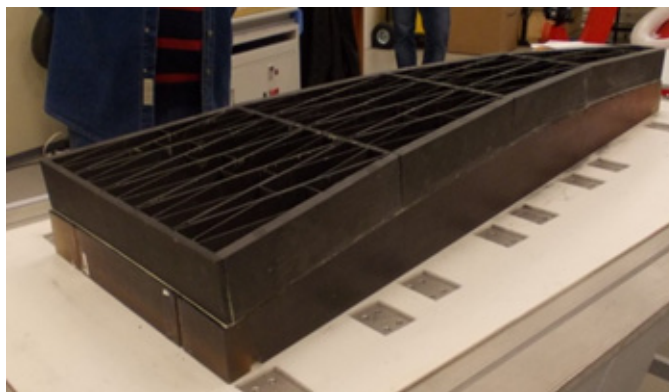
Таким образом, контрольная аппаратура, включающая механические и оптические методы определения формы поверхности оптической детали, технологическое оборудование для ме-



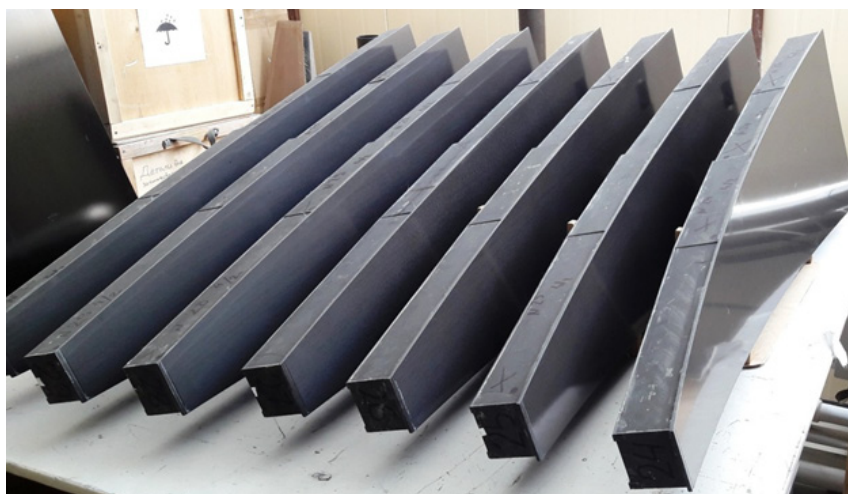
ханической обработки со специальными инструментами для обработки рабочей поверхности позволили выполнить формообразование выпуклой внеосевой поверхности матрицы с асферичностью до 20 мм и с произвольной конфигурацией внешнего периметра.



**Рисунок 6.**  
**Финишная доводка матрицы**



**Рисунок 7.**  
**Панель из углепластика на матрице**



**Рисунок 8.**  
**Элементы главного зеркала из углепластика**

*Список литературы:*

1. *Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Patrikeev V.E., «Aspherization of off-axis high-asphericity mirrors with arbitrary external circuit by means of CNC machines», Proc. SPIE 9912, pp. 991246-1 – 991246-11, (2016).*
2. *Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Pridnya V.V. «Methods of fabrication and testing of unique large size optics in LZOS, JSC (VST, VISTA and other projects)», Proceedings of SPIE 8450, 84504T (2012).*
3. *Semenov, A.P., Abdulkadyrov, M.A., Belousov, S.P., Patrikeev, V.E., Pridnya, V.V., «Methods of fabrication and testing of unique large size optics in LZOS, JSC (VST, VISTA and other projects)», Proc. SPIE 8450, 84504T-1 – 84504T-12 (2012).*

# ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ СЕЛЕНИДА ЦИНКА (CVD-ZnSe), КАК МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ СИЛОВОЙ И ИК ОПТИКИ В ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН 0,5-14 микрон

НОВИКОВ В.П., МАЗАВИН С.М., ТИМОФЕЕВ О.В., ШЕВАРЕНКОВ Д.Н.

R<sup>2</sup>AIN Group (ООО «НН Оптика», ООО «Интеллектуальные системы НН»)  
г. Нижний Новгород

E-mail: novikov@r-aingroup.com

Поликристаллический селенид цинка, полученный методом осаждения из газовой фазы (CVD-метод) применяют в силовой и ИК – оптике, для изготовления выходных окон, фокусирующих линз, делительных пластин, а также призм и полупрозрачных зеркал.

В 2013 году в г. Дзержинск (Нижегородской области) организовано производство, представляющее собой комплексное решение, объединяющее под одной крышей три этапа изготовления оптических элементов: выращивание крупногабаритного мультиспектрального материала CVD-ZnSe, механическую обработку и нанесение покрытий, что в совокупности составляет полный цикл производства оптических элементов.

Для изготовления крупногабаритных деталей из CVD-ZnSe с поперечными размерами более 300 мм, работающих в широком спектральном диапазоне ( $\lambda=0,5-16$  мкм) и имеющих высокое качество обработки (класс чистоты, «цвет» поверхности, клиновидность и т.д.) требуется однородный высококачественный материал толщиной 25-30 мм. К настоящему времени на нашем предприятии отработана технология выращивания высококачественного материала CVD-ZnSe толщиной до 30 мм с однородными характеристиками по толщине образца. Проведенные за последние 3 года исследования позволили отработать технологические режимы синтеза поликристаллического селенида цинка без инородных включений (например: графит) и с однородностью показателя преломления на уровне  $\Delta n=(2-4) \cdot 10^{-4}$ .

Другой важнейшей задачей технологии изготовления оптических элементов является получение высококачественной поверхности, свободной от загрязнений и совершенной по геометрии, морфологии и чистоте. Состояние и качество оптических элементов в значительной степени определяется эффективностью заключительных операций в технологическом процессе их изготовления. В настоящее время, из достаточно мягкого материала, каким является CVD-ZnSe, мы можем изготавливать крупногабаритные изделия следующих размеров: плоские, с диагональю – до 450-500 мм, сферические, диаметром до 300-350 мм. При этом оптические элементы соответствуют 3-4 классу чистоты, с отклонением по «цвету» поверхности менее 1 интерференционного кольца, при местной ошибке менее 0,5 интерференционного кольца, с клиновидностью на уровне 1-2 секунд. Также в номенклатуре изделий выпускаемых нашим предприятием присутствуют изделия сложной геометрической конфигурации (призмы, линзы, спектроделители и т.д.) с предельными (высокими) качественными характеристиками.

Следующее реализуемое направление – это подготовка поверхностей оптических элементов к напылению и нанесение просветляющих покрытий на крупногабаритные изделия. При этом задействованы свойства CVD-ZnSe, как широкополостного материала (область прозрачности

0,5-16 мкм) одновременно в 4-5 диапазонах, при сохранении высоких эксплуатационных характеристик (стойкость к термоударам, нулевая группа по износостойкости, первая группа по влагостойкости).

В рамках данного направления исследованы и разработаны технологии получения покрытий со специальными характеристиками. Во-первых, слабопоглощающие просветляющие покрытия для мощных технологических лазеров, работающих на длине волны 10,6 мкм. При этом, поглощение контролируется на конечных изделиях и оно не превышает 0.15-0,2 %. Во-вторых, толстые покрытия для зеркал, спектроделителей, фильтров для диапазона  $\lambda=1-12$  мкм, работающих при углах падения отличных от нормальных. В ходе исследований установлено влияние толстых покрытий на качественные характеристики готовых изделий. Исследованы некоторые методы компенсации такого влияния.

Таким образом, изготовление конкурентноспособной крупногабаритной оптики для ИК и силовых применений представляет собой многопараметрическую задачу, которая с успехом решается на нашем предприятии с привлечением современных наукоемких технологий.

# УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ПЬЕЗОДВИГАТЕЛИ NANOMOTION ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И КОМПЛЕКСОВ

КАРЕВ П. В.

ООО «Промышленная метрология», г. Санкт-Петербург

E-mail: karev\_p@metrology-spb.ru

Пьезоэлектрические ультразвуковые двигатели обеспечивают высокую скорость и высокую точность. Среди различных возможных конструкций линейный двигатель стоячей волны основан на сочетании первичных продольных и вторичных изгибных режимов (двигатель L1B2). Пьезодвигатели L1B2 позиционируются с повторяемостью в диапазоне десятков нанометров в режиме переменного тока и до долей нанометров в режиме постоянного тока. Далее рассматриваются два семейства двигателей: HR и EDGE. Пьезодвигатели HR работают от синусоидального напряжения с рабочей частотой 39,6 кГц, обеспечивающей максимальное усилие до 4 Н на приводной элемент (при 5 Вт потребляемой мощности на элемент) и максимальную линейную скорость выше 300 мм/с. Малогабаритные пьезодвигатели EDGE применяются в оптико-электронных модулях и приводятся в действие напряжением до 11 В переменного тока, обеспечивая максимальную блокирующую силу до 0,35 Н (потребляемая мощность до 0,75 Вт) и максимальную линейную скорость выше 200 мм/с.

## Обзор существующих решений

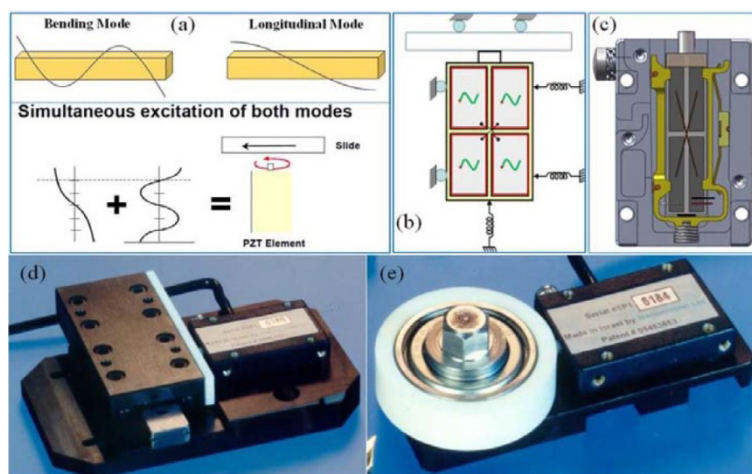
Т.к. эффективность электромагнитного двигателя зависит от его размера, то электромагнитные двигатели размером менее 1 см<sup>3</sup> являются практически неэффективными. Эффективность пьезоэлектрического двигателя не изменяется с размером, что важно для применения в малогабаритных механических системах. Преимуществами небольших пьезоэлектрических ультразвуковых двигателей, по сравнению со стандартными электромагнитными двигателями такого же размера и веса, являются: высокая плотность мощности и эффективность; высокий момент на низких скоростях при малой мощности; немагнитные свойства; тихая работа; отсутствие редуктора; быстрый отклик и малое время установления, отсутствие люфта и отсутствие потребления энергии при удержании положения.

## Пьезодвигатель L1B2

Основным принципом работы ультразвукового пьезодвигателя является передача электрической энергии в механический импульс через соединение трением гибкого вибрирующего статора с подвижной частью сборки. Возбуждается одновременная вибрация первых продольных и вторых изгибных режимов резонанса (см. Рисунок 1а).

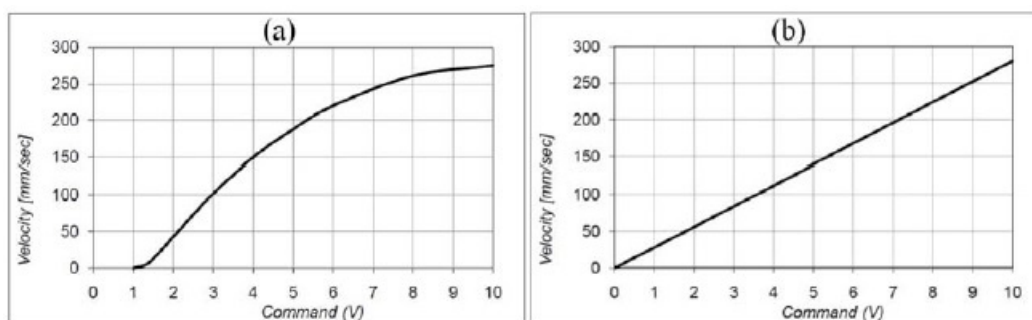
Режим удлинения (L1) и режим изгиба (B2) возбуждаются совместно посредством приложения переменного электрического поля. Подавая напряжение между нижним электродом и одной из пар диагонально расположенных электродов на верхней поверхности пьезоэлемента, получается изгиб и удлинение в средней плоскости пьезоэлемента. Для создания движения вибрирующий пьезоэлемент предварительно прижимается к подвижной части сборки (линейной или поворотной) с использованием задних и боковых пружин, которые подбираются таким образом, чтобы обеспечивать соответственно требуемое усилие перемещения и боковую жесткость (Рис. 1б). Пример такой конструкции показан на Рисунке 1с. Выбор одной или другой пары диагонально расположенных электродов на верхней поверхности определяет направление эллиптической траектории наконечника пьезоэлемента и, следовательно, направление движе-

ния сборки. Чтобы предотвратить износ пьезоэлектрического элемента во время работы двигателя, предварительная нагрузка выполняется с помощью износостойкого твердого керамического наконечника, который крепится в центре на той поверхности балки, которая обращена к сборке (Рис. 1b). Со стороны сборки прикреплена дополнительная износостойкая лента. Линейный или поворотный тип движения определяется путем выбора линейной или поворотной сборки (Рис. 1d, e).



**Рисунок 1.**

**Основная конструкция пьезоэлектрического ультразвукового двигателя L1B2:**  
**(a) Схематическое представление одновременного возбуждения продольного и изгибного режимов. (b) Схематическое представление предварительной нагрузки пьезоэлектрического элемента на движущуюся сборку; (c) Пример чертежа двигателя Nanomotion типа HR1, основанного на одном пьезоэлектрическом элементе L1B2 (Nanomotion HR типа), реализующем схему предварительной нагрузки элемента, которая схематически показана на (b); (d) Изображение линейной сборки, приводимой в действие двигателем Nanomotion HR1; (e) Изображение оси вращения, приводимой в действие двигателем Nanomotion HR1.**



**Рисунок 2.**

**Максимальная скорость линейной сборки в зависимости от управляющего напряжения контроллера, подаваемого на усилительно-преобразующее устройство. Значения приведены для двигателей L1B2 (Nanomotion HR-Type [17]), управляемых усилительно-преобразовательными устройствами Nanomotion AB1A (a) и AB5 (b).**

## Управление двигателем

Контроллер движения подает управляющее напряжение, обычно в диапазоне от -10 В до 10 В, в усилительную цепь. В усилительно-преобразующем устройстве управляющее напряжение преобразуется в высоковольтный сигнал переменного тока, подаваемый на двигатель. Компания Nanomotion разработала собственный усилитель AB5, который уменьшает минимальное напряжения двигателя, требуемое для начала движения сборки [16] и обеспечивает линейную зависимость между командой контроллера и скоростью сборки (см. Рис. 2b).

Сервоконтроллер XCD использует следующие механизмы для повышения точности движения сборки: механизм смещения, обеспечивающий стартовое значение первоначальной команды для преодоления присущей мертвой зоны; механизм упреждающей регулировки нуля, уменьшающий время установления сборки и отключающий контур регулирования скорости в диапазоне от 30 до 50 мкм до целевого положения и тем самым уменьшающий скорость до того уровня, с которого сборка приближается к своему целевому положению и устраняет перерегулирование; механизм мертвой зоны, использующий внутреннее трение двигателя для предотвращения дрожания и улучшения времени установления.

## Условия эксплуатации

В настоящее время доступны двигатели L1B2, работающие в диапазоне температур от -20 °С до 50 °С (двигатели Nanomotion HR), а с использованием специальных материалов этот диапазон может быть расширен -55 °С до 80 °С.

Пьезоэлектрические ультразвуковые двигатели, благодаря своим низким характеристикам по дегазации пьезокерамики, хорошо подходят для работы в высоком вакууме, а общий вес клеящих веществ и эластомеров в двигателе HR4-1-U-1.5 UHV составляет всего 0.14% от общей массы двигателя. Для дальнейшего повышения совместимости с вакуумом следует использовать специальные методы очистки и вакуумного обжига.

Продолжительность непрерывной работы двигателя ограничена балансом скорости генерации тепла и скорости его рассеивания в окружающую среду.

## Точность позиционирования

Для режима ультразвуковых колебаний достигается точность в несколько десятков нанометров. Элементы L1B2 могут использоваться и в режиме удержания приложенным постоянным напряжением в замкнутом контуре, перемещая сборку в субмикронном диапазоне.

В режиме переменного тока полукилограммовая сборка на двигателе HR8 обеспечивает повторяемость в диапазоне 50 нм при перемещении на расстояние 10 мм за время установления 90 миллисекунд.

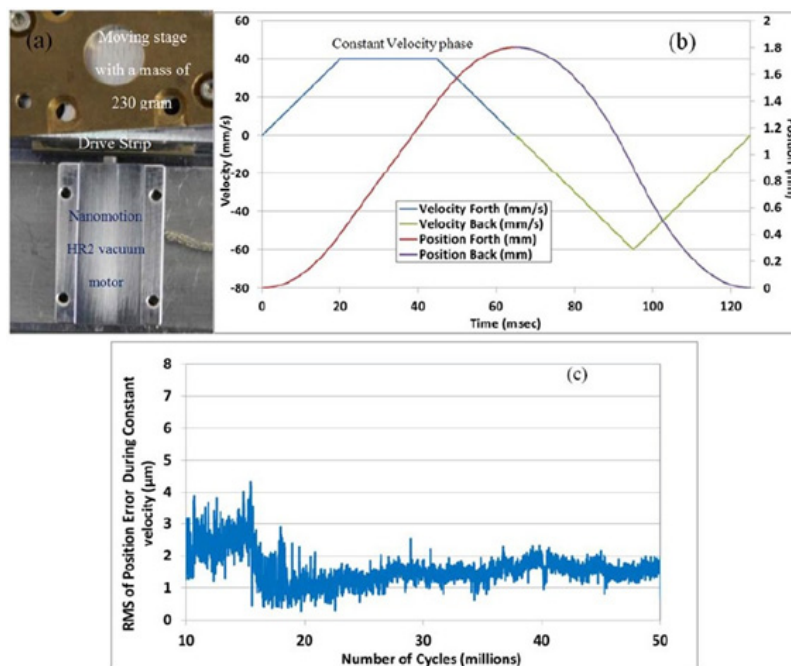
В режиме постоянного тока сборка FB75-100-HR8, оснащенная энкодером с разрешением 0.4 нм, обеспечивает шаг 4 нм удержанием положения с точностью до 1 нм.

Поворотная сборка NM FBR 60, приводимая в действие двумя вакуумными двигателями HR2 при более, чем 42000 шагов в диапазоне углового хода 90 градусов обеспечивает стандартную ошибку положения 1 мкРад.

## Вакуумные сборки для космических применений

Использование двигателей L1B2 имеет ряд преимуществ для применения в космосе. Прямой привод двигателей L1B2 обеспечивает высокую силу/момент на низких скоростях, устраняя необходимость в редукторе (который обычно используется совместно с двигателями постоянного тока для получения высокого момента на низких скоростях), уменьшая расчетный вес, высвобождая объем и устраняя люфт. Отсутствие потребляемой мощности при удержании позиции снижает требования к питанию, в то время как низкая дегазация снижает риск загрязнения.

На Рисунке 3 показан пример миниатюрной сканирующей сборки на основе L1B2 для использования в условиях низкой околоземной орбиты. Используется вакуумный двигатель HR2, работающий и управляемый от усилителя со встроенным контроллером XCD [21]. Двигатель приводит в действие линейную сборку с перемещаемым весом 230 г. Система была протестирована в высоком вакууме ( $10^{-6}$  Торр) при непрерывном выполнении периодического профиля движения с частотой 8 Гц (Рисунок 3b). Интенсивный рабочий цикл включает ускорения  $2 \text{ м/с}^2$ . Средняя погрешность положения во время фазы постоянной скорости движения оставалась ниже 4 мкм в течение 50 миллионов циклов работы в вакууме (Рисунок 3c). Этот тест имитирует трехлетнюю космическую операцию в высоком вакууме.



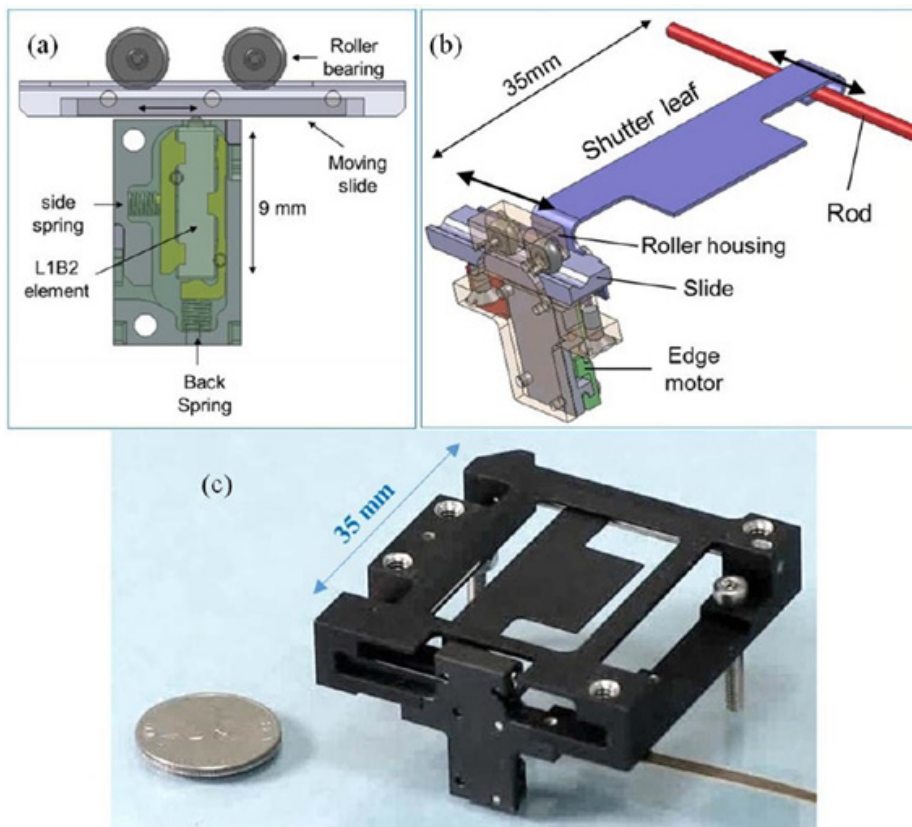
**Рисунок 3.**

**Работа сканирующей сборки в вакууме: (а) Изображение установки, включающей вакуумный двигатель HR2 и линейную сборку с перемещаемой массой 230 г; (б) Профиль движения в течение одного цикла сканирования; (с) Среднеквадратическая ошибка положения, как функция количества выполненных циклов сканирования.**

### Электрооптические модули

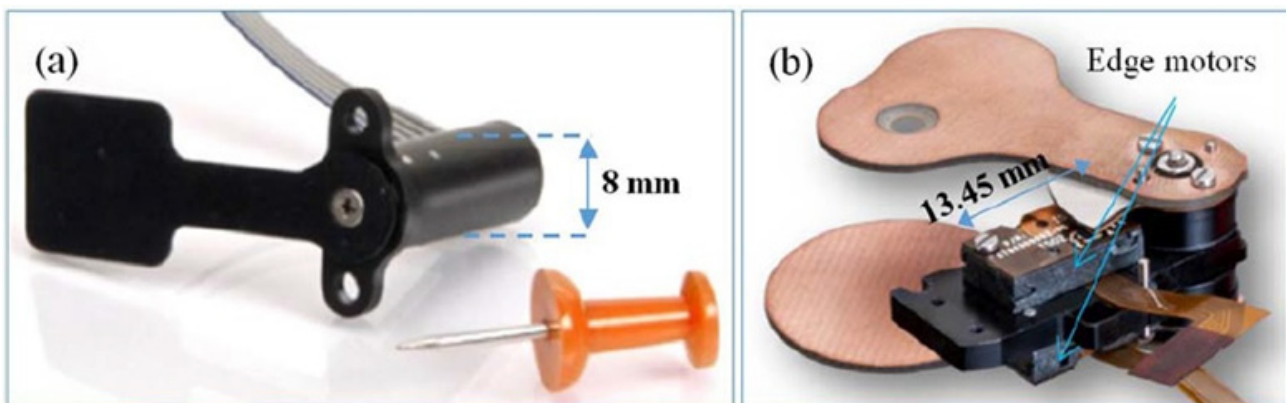
При использовании в небольших электрооптических модулях, двигатели L1B2 обеспечивают быстрое точное движения в малых габаритах, при малых весах и при низком энергопотреблении. Примеры применений: затворы для коррекции неоднородности оптического поля (Non Uniformity Correction - NUC) для неохлаждаемой ИК-камеры и лазерных приложений, - показаны на рисунках ниже. Все затворы изготовлены на двигателе типа Nanomotion EDGE, который основан на элементе L1B2 длиной 9 мм. Двигатель Nanomotion EDGE обеспечивает максимальную скорость более 200 мм/с, максимальное блокирующее усилие выше 0,35 Н при жесткости двигателя более 0,06 Н/мкм. На Рисунке 4 показан пример реализации пьезоэлектрического затвора с линейным перемещением шторки. Общий вес сборки составляет 15 г, перемещаемый вес 1,5 г, площадь апертуры  $14,7 \times 17,0 \text{ мм}^2$ , а время открытия/закрытия 150 миллисекунд.

На Рисунке 5а показан одноосевой модуль поворотной шторки, который весит всего 2 г и способен выполнять поворот на  $90^\circ$  менее чем за 50 миллисекунд. Двухосевой модуль, показанный на Рисунке 5b, может независимо вращать каждый из двух лепестков затвора. Вес каждого лепестка затвора около 2 г. Поворотом  $60^\circ$  обеспечивается за время 100 миллисекунд.



**Рисунок 4.**

*Линейный затвор для коррекции неоднородности оптического поля (Non Uniformity Correction – NUC), на основе двигателя Nanomotion EDGE L1B2: (a) Схематичное изображение двигателя EDGE motor, предварительно нагруженного на приводную полосу; (b) Схематичное изображение механизма движения лепестка затвора; (c) Изображение линейного затвора для коррекции неоднородности оптического поля (Non Uniformity Correction, NUC).*



**Рисунок 5.**

*(a) Изображение NUC затвора для кругового движения на основе элемента L1B2 длиной 9 мм. Длина устройства составляет 20 мм; (b) Изображение модуля затвора с двумя осями вращения.*



## Заключение

В оптико-электронной и космической отраслях преимущества ультразвуковые двигатели L1B2, способны реализовать точное позиционирование в нанометровом диапазоне, обеспечивая высокие силы и большие динамические диапазоны регулировки скорости при высокой плотности мощности.

### *Список литературы:*

1. Uchino, K. Piezoelectric ultrasonic motor: Overview. *Smart Mater. Struct.* 1998, 7, 273–285. [CrossRef]
2. Sashida, T.; Kenjo, T. *An Introduction to Ultrasonic Motors*; Clarendon Press: Oxford, UK, 1993.
3. Nanomotion Ltd. Motion Systems. Available online: <http://www.nanomotion.com/product-type/motion-systems/> (accessed on 11 April 2016).
4. Wiwattananon, P.; Bryant, R.G. Performance Comparisons and Down Selection of Small Motors for Two-Blade Heliogyro Solar Sail 6U CubeSat. NASA Technical Report NASA/TM–2015–218784. 2015. Available online: <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20150017043> (accessed on 11 April 2016).
5. Uchino, K. Introduction to Piezoelectric Actuators and Transducers. Defense Technical Information Center Document ADA429659. 2003. Available online: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA429659> (accessed on 11 April 2016).
6. Hemsel, T.; Mracek, M.; Twiefel, J.; Vasiljev, P. Piezoelectric linear motor concepts based on coupling of longitudinal vibrations. *Ultrasonics* 2006, 44, e591–e596. [CrossRef] [PubMed]
7. Aoyagi, M.; Tomikawa, Y. Ultrasonic motor based on coupled longitudinal-bending vibrations of a diagonally symmetric piezoelectric ceramic plate. *Electron. Commun. Jpn.* 1996, 79, 60–67. [CrossRef]
8. Tsai, M.S.; Lee, C.H.; Hwang, S.H. Dynamic modeling and analysis of a bimodal ultrasonic motor. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 2003, 50, 245–256. [CrossRef] [PubMed]
9. Zumeris, J. Ceramic Motor. U.S. Patent No. 5,453,653, 26 September 1995.
10. Ganor, Z.; Shiv, L.; Karasikov, N.; Avital, A. Piezoelectric Motors and Motor Driving Configurations. U.S. Patent No. 6,979,936 B1, 27 December 2005.
11. Tomikawa, Y.; Takano, T.; Umeda, H. Thin rotary and linear ultrasonic motors using a double-mode piezoelectric vibrator of the first longitudinal and second bending modes. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1992, 31, 3073–3076. [CrossRef]
12. Guo, M.; Dong, S.; Ren, B.; Luo, H. A double-mode piezoelectric single-crystal ultrasonic micro-actuator. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 2010, 57, 2596–2600. [PubMed]
13. Li, X.; Chen, J.; Chen, Z.; Dong, S. A high-temperature double-mode piezoelectric ultrasonic linear motor. *Appl. Phys. Lett.* 2012, 101, 072902. [CrossRef]
14. Ganor, Z.; Rafaeli, I.; Shiv, L.; Karasikov, N. Multilayer Piezoelectric Motor. U.S. Patent No. 7,075,211 B1, 11 July 2006.
15. Nanomotion Ltd. AB1A Driver User Manual. Available online: <http://www.nanomotion.com/wp-content/uploads/2015/01/AB1A458000-00-User-Manual-AB1A1.pdf> (accessed on 11 April 2016).
16. Nanomotion Ltd. AB5 and AB51 Drivers User Manual. Available online: <http://www.nanomotion.com/wp-content/uploads/2015/05/AB05458200-02-User-Manual.pdf> (accessed on 11 April 2016).
17. Nanomotion Ltd. User Manual HR Motors. Available online: <http://www.nanomotion.com/wp-content/uploads/2015/09/HR00458000-00-HR-Motor-User-Manual.pdf> (accessed on 11 April 2016).
18. Nanomotion Ltd. XCD Software Version 1.4.0.7. Available online: <http://www.nanomotion.com/wp-content/uploads/2014/05/XCD-software-version-1-4-0-7.pdf> (accessed on 11 April 2016).
19. Outgassing Data for Selecting Spacecraft Materials Online. Available online: <https://outgassing.nasa.gov/> (accessed on 11 April 2016).
20. Ganor, Z. High Resolution Piezoelectric Motor. U.S. Patent No. 7,061,158 B2, 13 June 2006.
21. User Guide XCD-HR Controller/Drivers. Available online: [http://www.nanomotion.com/wp-content/uploads/2015/05/XCDH458002-00-XCD-HR-Contr-Driver-UM\\_.pdf](http://www.nanomotion.com/wp-content/uploads/2015/05/XCDH458002-00-XCD-HR-Contr-Driver-UM_.pdf) (accessed on 11 April 2016).
22. Nanomotion Ltd. Edge Motor. Available online: <http://www.nanomotion.com/motion-product/edge-motor/> (accessed on 11 April 2016).



**Секция 1**  
**Вопросы разработки**  
**оптико-электронных приборов**  
**и комплексов**

# РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ НА БАЗЕ ОХЛАЖДАЕМЫХ ФПУ В РАМКАХ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЫ СОЮЗНОГО ГОСУДАРСТВА «СОЮЗНЫЙ ТЕПЛОВИЗОР»

ТАРАСОВ В.В., СОЛОДКОВ А.А., КУЛИКОВ В.Б., МАСЛОВ Д.В., БАРАБАНОВ А.Б., САБИРОВ А.Р., КОБЫЛИН А.В., ХАЙЛОВ А.В., НЕЧИПУРЕНКО К.А., НЕКЛУДОВ М.Ю., ЧЕКМАРЕВ В.А., ПУХТЕЕВ А.И., ЗАПРЯГАЕВ С.В.

ОАО «Центральный научно-исследовательский институт «Циклон», г. Москва

E-mail: a.solodkov@cyclone-jsc.ru

В соответствии с заданиями научно-технической программы Союзного государства «Разработка современной и перспективной технологии создания в государствах-участниках Союзного государства тепловизионной техники специального и двойного назначения на базе фотоприёмных устройств инфракрасного диапазона третьего поколения» (шифр «Союзный тепловизор») для подтверждения реализуемости технологий были разработаны тепловизионные приборы (ТВП) 2-х типов, отличающиеся форматами охлаждаемых матричных фотоприёмных устройств (МФПУ). В качестве фоточувствительной структуры в МФПУ применен материал на основе многослойных структур с квантовыми ямами (МСКЯ).

Значения основных параметров ТВП приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения основных параметров ТВП

Наименование параметра	Значение параметра	
Количество чувствительных элементов ФПУ	384×288	640×512
Шаг чувствительного элемента в матрице, мкм	20	
Область спектральной чувствительности, мкм	7,5-9	
Эквивалентная шуму разность температур, К, не более (при $F/2,5$ ; $T_{\text{ф}} = 300$ К; $F_{\text{к}} = 50$ Гц)	0,05	
Минимальная разрешаемая разность температур, К, не более - в широком поле зрения на частоте $1010 \pm 50$ рад <sup>-1</sup> - в узком поле зрения на частоте $2010 \pm 50$ рад <sup>-1</sup>	0,5	0,6
Частота кадров выходного изображения, Гц	50	
Диапазон перестройки фокусного расстояния оптической системы, мм	70...210	
Диапазон перестройки поля зрения, градус	2,1x1,6... 6,3 x 4,7	3,5x2,6... 10,5x7,8
Время перестройки поля зрения, с, не более	2	
Время выхода на рабочий режим, мин, не более (с учетом времени на проведение операции коррекции неоднородности чувствительных элементов)	8	
Напряжение питания, В, не более	12	27
Потребляемая мощность, Вт, не более	20...25	30...35
Масса, кг, не более	6	

Разработка ТВП и его составных частей выполнена при участии следующих предприятий и организаций в рамках созданной кооперации:

НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» (г. Минск) – разработка конструкции и поставка коммутаторов-мультиплексоров сигналов, работающих при криогенных температурах (65 К);

ЗАО «Научное и технологическое оборудование» и ЗАО «Светлана-Рост» (г. Санкт-Петербург) – разработка и изготовление ростовой установки, отработка технологии, изготовление и поставка фоточувствительных структур на основе МСКЯ (AlGaAs/GaAs);

ОАО «Швабе-Фотосистемы» (г. Москва) – разработка конструкции и поставка вакуумноплотных криостатируемых корпусов;

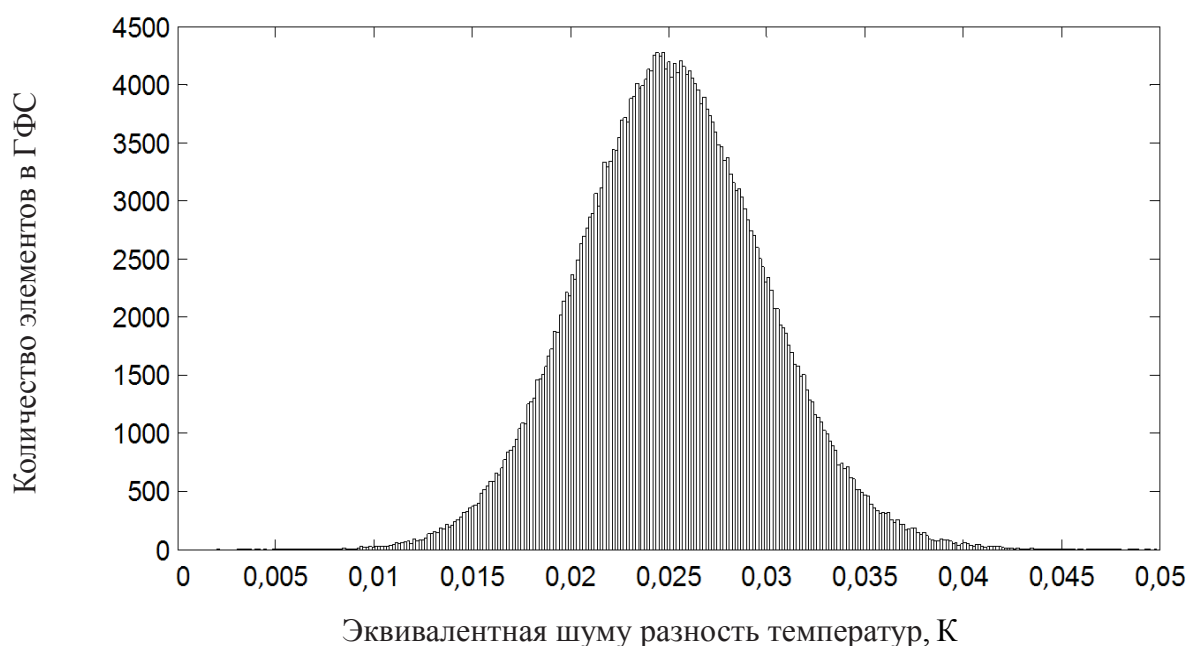
ООО «НТК «Криогенная техника» (г. Омск) – разработка конструкции и поставка микрокриогенных систем охлаждения линейного типа в варианте «интегральный Стирлинг»;

ОАО «ЦНИИ «Циклон» (г. Москва) – разработка и изготовление гибридной фоточувствительной структуры (ГФС), МФПУ, вариофокальной оптической системы, корпусных деталей, схем электронной обработки сигналов и программного обеспечения для управления режимами работы ТВП.

Проведены испытания разработанных ТВП по обнаружению, распознаванию и идентификации слабо нагретых объектов на расстояниях до нескольких километров. Полученные результаты позволяют рассматривать возможность применения данных ТВП в различных системах наблюдения в составе стационарных и подвижных объектов специального и двойного назначения.

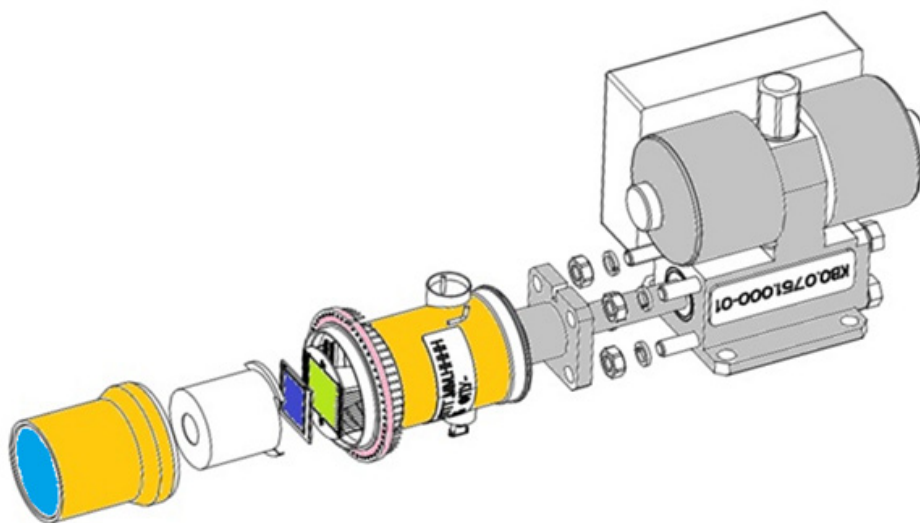
Главным достоинством разработанных ТВП является высокая однородность изображений в широком диапазоне внешних температур и применение отечественных комплектующих изделий (более 90 %), за исключением интегральных микросхем модуля цифровой обработки сигналов.

Гистограмма распределения значений эквивалентной шуму разности температур по матричному массиву ГФС формата 640x512 элементов представлена на рисунке 1.

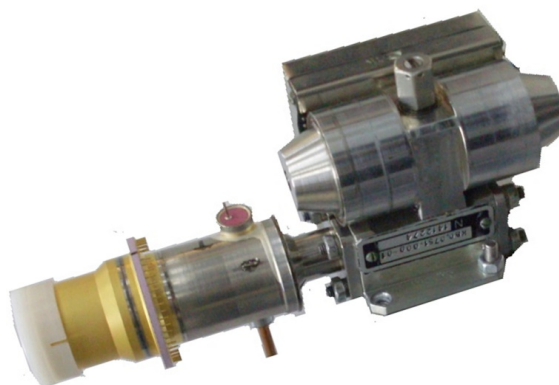


**Рисунок 1.**  
**Распределение значений эквивалентной шуму разности температур по матричному массиву ГФС формата 640x512 элементов**

Изображение внешнего вида составных частей МФПУ представлено на рисунке 2. Изображение внешнего вида МФПУ в сборе представлено на рисунке 3. Изображения внешнего вида ТВП-384 и ТВП-640 представлены на рисунке 4.



*Рисунок 2.  
Изображение внешнего вида составных частей МФПУ-640*



*Рисунок 3.  
Изображение внешнего вида МФПУ-640 в сборе*



*Рисунок 4.  
Изображения внешнего вида ТВП-384 и ТВП-640*

## **ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ОРБИТЕ АППАРАТУРЫ ИКФС-2 В СОСТАВЕ КА «МЕТЕОР М» №2**

**ГОЛОВИН Ю.М., ЗАВЕЛЕВИЧ Ф.С., КОЗЛОВ Д.А., НИКУЛИН А.Г., МОНАХОВ Д.О.,  
КОЗЛОВ И.А., <sup>1</sup>АРХИПОВ С.А., <sup>1</sup>ТЫШКУНОВ Н.В., <sup>2</sup>РОМАНОВСКИЙ А.С.**

**ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»**

**<sup>1</sup>ПАО «Красногорский завод им С.А. Зверева», г. Красногорск, Московская обл.**

**<sup>2</sup>НИИ ИСУ МГТУ им. Н.Э. Баумана**

**E-mail: zavelevich@mail.ru**

Бортовой инфракрасный фурье-спектрометр температурного и влажностного зондирования ИКФС-2 предназначен для измерения спектров исходящего излучения атмосферы Земли и решения на их основе оперативных задач гидрометеорологического обеспечения. Аппаратура ИКФС-2 совместно разработана ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Красногорским заводом им. С.А. Зверева и НИИ ИСУ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Запуск космического аппарата «Метеор-М» № 2 с фурье-спектрометром ИКФС-2 состоялся 8 июля 2014 г. К настоящему времени прибор успешно функционирует на орбите в штатном режиме уже в течение трех лет, обеспечивая формирование спектров атмосферы Земли и подстилающей поверхности в диапазоне спектра от 5 до 15 мкм (от 660 до 2000 см<sup>-1</sup>) со спектральным разрешением 0.4 см<sup>-1</sup> в полосе обзора до 2500 км с пространственным разрешением в надире 30 км. Все технические характеристики прибора подтверждены по результатам летных испытаний.

За время эксплуатации отмечается стабильная работа механизма перемещения уголкового отражателя и механизма сканирования по полосе обзора, а также стабильное тепловое состояние прибора, обеспечиваемое собственной системой терморегулирования. Снижение скорости образования криоосадка на холодном окне фотоприемника позволило перейти на режим дегазации радиационного холодильника с периодичностью 1 раз в месяц.

Результаты сопоставления измерений ИКФС-2 с данными независимых спутниковых измерений (радиометр SEVIRI, установленный на спутнике Meteosat-10 на геостационарной орбите и фурье-спектрометр IASI на спутниках MetOp на солнечно-синхронной орбите) свидетельствуют о надлежащем качестве калибровки аппаратуры. Так, погрешность спектральной привязки измерений к шкале волновых чисел не превышает  $2 \cdot 10^{-6}$ , а погрешность привязки измерений к абсолютной энергетической шкале составляет не более 0.3 К, что соответствует требованиям к аппаратуре данного класса.

# РАЗВИТИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ БОРТОВЫХ ИК ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРОВ

ВЕЛЬТИЩЕВА В.В., ТЫШКУНОВ Н.В.,  
\*КОЗЛОВ Д.А., \*КОЗЛОВ И.А.

ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», г. Красногорск  
\*Государственный научный центр Российской Федерации – федеральное государственное унитарное предприятие «Исследовательский центр им. М.В. Келдыша», г. Москва

E-mail: n.tyshkunov@zenit-kmz.ru

В последнее десятилетие инфракрасные фурье-спектрометры космического базирования находят широкое применение в системах дистанционного зондирования Земли для решения ряда задач оперативной метеорологии, климатологии и атмосферной химии. Тематическая обработка измеряемых фурье-спектрометром калиброванных спектров излучения системы «поверхность-атмосфера» позволяет получать детальную информацию о параметрах и составе атмосферы, включая вертикальные профили температуры и влажности, общее содержание озона и малых газовых составляющих, температуру подстилающей поверхности и др.

В настоящий момент на солнечно-синхронных орбитах успешно функционируют европейский фурье-спектрометр IASI (спутники Meteor-A/B, 2006 и 2013 гг. запуска), американский прибор CrIS (спутник Suomi-NPP, 2011 г. запуска) и российский фурье-спектрометр ИКФС-2 (КА «Метеор-М» № 2, 2014 г.). Прибор ИКФС-2 является первой отечественной разработкой аппаратуры данного класса, созданной совместно ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» и НИИ ИСУ МГТУ им. Н.Э. Баумана. В сравнении с зарубежными приборами IASI и CrIS фурье-спектрометр ИКФС2 несколько уступает в пространственном разрешении, не содержит коротковолновый поддиапазон (3.5-5.0) мкм, имеет аналогичные высокие характеристики спектрального разрешения, пороговой спектральной яркости и полосы обзора при существенно меньших габаритах, массе и энергопотреблении.

К настоящему времени прибор успешно функционирует на орбите в течение трех лет. Все технические характеристики были подтверждены на этапе летных испытаний. За время эксплуатации отмечается стабильное тепловое состояние прибора и работа механизмов интерферометра и сканера. Надлежащее качество калибровки формируемых прибором спектров атмосферы, подтверждаемое сопоставлением с независимыми спутниковыми измерениями, обеспечивает целевое применение измерений ИКФС-2.

Также в настоящее время ведется подготовка к запуску фурье-спектрометра ИКФС-2 для КА «Метеор-М» № 21. Аналогичный прибор для КА «МетеорМ» № 2-2 изготовлен и проходит наземную калибровку. Ведутся работы по изготовлению аппаратуры ИКФС2 для КА «Метеор-М» № 2-3 и 2-4.

Развитием отечественных ИК-зондировщиков серии ИКФС-2 является инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-3, разрабатываемый для платформы «МетеорМП». Аппаратура ИКФС-3 обладает расширенным спектральным диапазоном (3.5-15.5 мкм), существенно более высоким пространственным разрешением и плотностью покрытия земной поверхности.

Ввиду отсутствия фотоприемника, обеспечивающего требуемые величины удельной обнаружительной способности во всем спектральном диапазоне, рабочий диапазон (3.5-15.5) мкм разбивается на три поддиапазона, каждому из которых соответствует свой тип фото-



приемника. В качестве фотоприемников коротковолнового и средневолнового диапазонов используются фотодиоды на основе КРТ, а для диапазона 8.3-15.5 мкм – КРТ-фоторезисторы.

Важным усовершенствованием аппаратуры ИКФС-3 по сравнению с прибором ИКФС-2 является уменьшение мгновенного поля зрения с 35 км до 1015 км. Применение многоплощадочных (пятиэлементных) фотоприемных устройств и уменьшение времени съема интерферограммы (0.2 с) обусловлено обеспечением требований по покрытию, определяющими ширину полосы обзора (2200 км) и шаг пространственной сетки (не более 30 км). Полоса обзора ИКФС3 состоит из 28 сканов и составляет  $\pm 48.6^\circ$  с шагом  $3.6^\circ$ , а время сканирования полосы обзора не превышает 9 с, обеспечивая практически равномерную сетку как в поперечном направлении, так и в направлении полета спутника.

Уменьшение мгновенного поля зрения и времени съема интерферограммы значительно усложняет выполнение требований по радиометрическому шуму в спектрах, для выполнения которых потребовалось увеличить апертуру прибора с 50 мм до 80 мм.

Увеличение диапазона оптической разности хода с  $\pm 1.7$  см до  $\pm 2$  см позволило повысить спектральное разрешение ИКФС-3 по сравнению с ИКФС2.

В настоящий момент создан электротехнический макет ИКФС-3, проведены отработочные испытания основных узлов и механизмов.

Качественно новой отечественной разработкой (эскизный проект) является гиперспектральный ИК-зондировщик ИКФС-ГС для КА «Электро-М». Геостационарный инфракрасный фурье-спектрометр ИКФСГС предназначен не только для измерения профилей температуры и влажности, оценки содержания малых газовых составляющих в атмосфере, но и для получения данных о ветре на различных высотных уровнях (с погрешностью до 3 м/с). Его отличает работа на геостационарной орбите, реализация различных режимов съемки (глобальный и региональный), наличие камеры видимого и БИК диапазона (0,7-0,9 мкм), высокое пространственное разрешение. С помощью камеры видимого и БИК диапазона получают информацию об облачном покрытии, а также осуществляют навигационную поддержку. При глобальном покрытии наблюдение ведется за всей видимой проекцией земного шара, а при региональном режиме наблюдения за заданным с Земли участком.

Увеличение орбитальной группировки метеорологических спутников с инфракрасными фурье-спектрометрами позволит решать задачи оперативного мониторинга атмосферы и дополнить информацию от наземной сети аэрологических станций данными спутникового зондирования.

# ВЫСОКО ИЛИ НИЗКООРБИТАЛЬНЫЕ? СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ГРУППИРОВОК ДЗЗ

КЛЮШНИКОВ М.В.

Филиал АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС»  
г. Москва, Зеленоград

E-mail: optecs@samspace.ru

Мировая орбитальная группировка ДЗЗ высокого и среднего разрешения включает более 103 космических аппаратов. Ряд государств, в том числе и Россия, перешли от запусков одиночных КА к развёртыванию многоспутниковых группировок, нацеленных на высокоэффективное решение задач, стоящих перед дистанционным зондированием. Такая тенденция повышает актуальность задачи выбора параметров орбит и орбитального построения группировок. В данной работе делается попытка обосновать целесообразность того или иного подхода к орбитальному построению в зависимости от поставленных перед группировкой задач.

Анализ задач, поставленных перед системами ДЗЗ, позволяет предложить следующий ряд наборов требований к группировкам ДЗЗ:

- работа с индивидуальными заказчиками. Требуется максимально оперативная съёмка максимального количества участков. Площадь снимаемых участков решающего значения не имеет. Разрешающая способность умеренно высокая – порядка 1 м;

- работа с заказчиками в интересах картографии и аналогичных потребителей. Требуется плановая съёмка участков большой площади – до сотен тысяч км<sup>2</sup> - за минимальное время. Требования к оперативности и разрешающей способности имеют второстепенное значение. Высоки требования к точности координатной привязки;

- работа с корпоративными заказчиками. Требуется съёмка с максимально высоким разрешением типовых участков. Характерный размер типового участка от 15x15 до 60x60 км. Требования оперативности – высокие, но меньшие, чем для индивидуальных заказчиков;

- работа с заказчиками в интересах сельского хозяйства и аналогичных потребителей. Требуется регулярная съёмка участков большой площади с периодом не более 1 недели. Требования к разрешающей способности низкие – порядка 5 м. Высоки требования к радиометрической точности.

Кроме того, существуют концепции, не обязательно направленные на решение определённых задач, но служащих, своего рода, «маяками», как, например:

- концепция «1 Земля, 1 день, 1 метр», предполагающая ежесуточную съёмку всей сухопутной поверхности Земли с разрешением 1 метр;

- концепция космической системы непрерывного наблюдения «Рой», предполагающая возможность непрерывной съёмки любой точки на поверхности Земли с разрешением 1м, при которой спутники непрерывно сменяют друг друга над наблюдаемым объектом;

- концепция еженедельной съёмки Земли с разрешением порядка 5 м (реализовано в КС RapidEye).

Наличие чётко обозначенных критериев оптимизации позволяет более или менее успешно искать наивыгоднейшую конфигурацию космической системы. К сожалению, чаще всего при формировании ТТЗ существует необходимость учитывать требования различных потребителей и критерии оптимизации сильно размываются. В таких случаях головной исполнитель или оператор ДЗЗ вынужден ориентироваться на некие усреднённые критерии. Результатом такого

подхода являются большинство КС ДЗЗ «общего назначения», начиная с КА Ikonos, серия КА WorldView, Pleiades и многие другие. Некоторым исключением являются КА QuickBird-2, оптимизированный под получение наивысшего разрешения. Более чётко следы оптимизации просматриваются в группировках КА RapidEye, SPOT (и серия подобных КА с ОЭК NAOMI) и «Ресурс-П». Хорошим примером специализированной КС является пока не созданная КС «Обзор-О».

*Таблица 1.*

	Что улучшается	Что ухудшается
Если высота орбиты увеличивается – количество космических аппаратов в системе уменьшается	Увеличивается срок существования КА	Увеличивается диаметр объектива
	Увеличивается полоса обзора КА	Увеличивается масса космического аппарата
	Увеличивается зона радиовидимости КА	Надёжность системы
	Уменьшается количество орбитальных плоскостей	Увеличивается дальность связи с КА, что потребует более мощной радиолинии
	Стоимость одного КА	
Если высота орбиты уменьшается – количество космических аппаратов в системе увеличивается	Уменьшается диаметр объектива	Уменьшается срок существования КА
	Уменьшается масса одного КА	Уменьшается полоса обзора КА
	Надёжность системы	Уменьшается зона радиовидимости КА
	Снижаются требования к радиолинии	Увеличивается количество орбитальных плоскостей

В данной статье мы позволим создать самим себе «тепличные условия», и постараемся найти оптимальную конфигурацию группировки для каждой из четырёх наборов требований, перечисленных в начале статьи.

Ситуация максимально оперативной съёмки требует, очевидно, либо использования высоких орбит (для максимизации полосы обзора), либо увеличения количества КА. Влияние изменения высоты орбиты на характеристики системы в целом приведено в таблице 1. Для анализа было принято, что основные целевые характеристики получаемой видеоинформации остаются без изменений.

Таким образом, выбор оптимальной высоты орбиты не очевиден. Можно принять, что разрешающая способность пропорциональна диаметру объектива (точнее обратно пропорциональна, так как разрешающая способность тем выше, чем меньше разрешаемый элемент), то есть:

$$\Delta \sim H/D, \quad (1)$$

где  $\Delta$  - разрешающая способность,  $D$  – диаметр объектива,  $H$  – высота орбиты.

Иными словами, с ростом высоты орбиты, для сохранения разрешающей способности, необходимо пропорционально увеличивать диаметр объектива.

Далее предположим, что масса и стоимость ОЭК и КА в целом пропорциональны третьей степени диаметра объектива. Данный вывод может показаться спорным, но, предполагая, что мы варьируем только один параметр аппаратуры – диаметр объектива, не изменяя технические

решения и общий конструктивно-технологический уровень, такое допущение представляется оправданным. Таким образом:

$$\$ \sim D^3 \sim (H/\Delta)^3, \quad (2)$$

где \$ - стоимость одиночного КА.

С другой стороны, оперативность съёмки (время между заявкой на съёмку и собственно съёмкой) при умеренном количестве КА в группировке пропорциональна их количеству и пропорциональна высоте орбиты. Это имеет простое физическое истолкование. Каждый КА может осуществлять съёмку площадки, пропорциональной высоте орбиты. Количество таких участков равно количеству КА в группировке.

Таким образом:

$$T \sim 1/(N * H^2), \quad (3)$$

где T – оперативность, N – количество КА в группировке.

Отсюда

$$\$ \Sigma = N * \$ \sim 1/(H^2 * T) * (H/\Delta)^3 \sim H/(T * \Delta^3), \quad (4)$$

где \$ \Sigma – суммарная стоимость группировки КА.

Эффективность группировки примем пропорциональной разрешающей способности (точнее, обратной пропорциональной ей) и квадрату оперативности (тоже обратно пропорционально ей). Поскольку для данного класса задач оперативность более важна, то оперативность возведём в квадрат.

$$E = 1/(\Delta * T^2) \quad (5)$$

Разделив эффективность на суммарную стоимость группировки, получаем:

$$E/\$ \Sigma \sim 1/(\Delta * T^2) * (T * \Delta^3)/H = \Delta^2/(T * H) \quad (6)$$

Таким образом, мы приходим к выводу, что для фиксированной разрешающей способности и оперативности удельная эффективность группировки тем меньше, чем меньше используемая высота орбиты.

Ситуация наблюдения в интересах картографии и аналогичных потребителей в целом аналогична. Но вместо оперативности (которая растёт с ростом высоты орбиты) в данном случае нас интересует полоса захвата, которая также растёт с ростом высоты орбиты. Требование высокой точности координатной привязки также предполагает желательность уменьшения высоты орбиты, так как при одной и той же погрешности определения ориентации съёмочной аппаратуры погрешность определения координат будет тем меньше, чем меньше длина линии визирования.

Случай работы с корпоративными заказчиками также схож с предыдущим случаем, но в качестве критерия эффективности выберем следующий критерий, поскольку в данном случае разрешающая способность важнее оперативности.

$$E = 1/(\Delta^2 * T) \quad (7)$$

Удельная эффективность группировки таким образом оказывается

$$E/\$ \Sigma \sim 1/(\Delta^2 * T) * (T * \Delta^3)/H^2 = \Delta/H^2. \quad (8)$$

Как видим, и в этом случае удельная эффективность группировки тем меньше, чем меньше используемая высота орбиты.

Случай наблюдения в интересах сельского хозяйства и аналогичных потребителей отличается тем, что в этом случае можно считать, что стоимость КА не зависит от диаметра объектива. Для обеспечения разрешения порядка 5 м диаметр объектива не превышает 100-200 мм, и стоимость аппаратуры определяется, скорее радиометрическими характеристиками аппаратуры. При этом можно считать, что стоимость аппаратуры существенно зависит от количества оптико-электронных камер на борту КА. Здесь можно отметить, что для уровня разрешения около 5 м (т.е. с фокусными расстояниями более 200 мм) существует некая дискретность в полях зрения объективов – линзовые объективы обеспечивают поле зрения не более  $8^\circ$ , а зеркальные еще меньше. Таким образом, при проектировании такой системы следует ориентироваться на максимальный размер снимаемого участка и высоту орбиты выбирать такой, чтобы полоса захвата одной камеры была либо равна размеру участка, либо была равна половине снимаемого участка (в этом случае необходима наличие двух камер), либо одной трети участка (в этом случае необходимо наличие трех камер). Такой подход применен на КА серии SPOT. В целом, в данном случае оптимальная высота орбиты определяется разрешающей способностью и целевой полосой захвата.

Подводя итоги, можно сделать вывод, что в большинстве случаев использование высоких орбит для задач ДЗЗ не оправдано. Требуемое при повышении высоты орбиты увеличение апертуры оптической системы увеличивает (пропорционально кубу высоты орбиты) массу КА, что не компенсируется ростом оперативности и производительности наблюдения. При этом в случае максимально оперативной съемки данный эффект также присутствует, но в меньшей степени. Мировые тенденции, приведенные в первой части статьи, на взгляд автора, подтверждают данный вывод.

# НОВЫЕ АРХИТЕКТУРНО-СХЕМНЫЕ И ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ СУБМИКРОННОЙ И МОЭМС ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОБИЛЬНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ БОЛЬШИХ ФОРМАТОВ В ШИРОКОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

ВОЛОДИН Е.Б.

АО «Ангстрем», г. Москва, Зеленоград

E-mail: Volodin@angstrem.ru

В настоящее время происходит быстрое становление интеллектуального машинного зрения. Его особенностью является соединение в одном устройстве матричного фотоприёмника (ретины) со схемами управления и обработки поступающей информации (электронным мозгом) с целью выделения из неё существенной части для передачи, запоминания или принятия решения.

В данном сообщении приведены результаты компьютерного проектирования новых компонентов на основе кремниевых субмикронной и МОЭМС технологий, которые могут способствовать совершенствованию устройств машинного зрения.

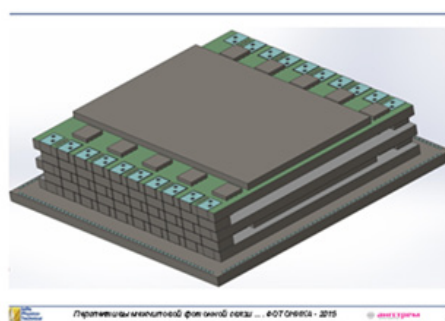
Матричные фотоприёмники развиваются во всё большие форматы, со всё большими скоростями приема изображений, с мультиспектральностью и даже с разрешением наблюдаемых объектов не только по широте и долготе, но и по дальности в каждом пикселе. Современные КМОП технологии позволяют создавать для камер ВЗН-матрицы в видимом диапазоне с рекордными форматами (например, VT-23K3.5X-N100 23380x256 пикселей размером 3,5x3,5 мкм) и смотрящие матрицы свыше 25 Мпикселей.

АО «Ангстрем» освоил в производстве многомодульные (от 1 до 6 модулей) беззачерные ВЗН-матрицы серии 5532 с размером ФЧЯ 6,25 мкм, имеющие по 2 аналоговых выхода с модуля с частотой пикселей на каждом до 40 МГц. На рис. 1а показана 4-х модульная микросхема формата 6144x128 или 12288x64. Получены предельные (см. рис. 1б) длиной на всю пластину (115,4 мм) 6-ти модульные образцы 18432x64. Освоена в производстве также скоростная матрица 1386НК01Н4 с кадровой частотой 10 кГц и форматом 256x256. Она имеет 16 аналоговых выходов от 16 субматриц с частотой пикселей на каждом канале до 40 МГц. Таким образом, электронная «ретина» уже опережает человеческую, приближаясь к гигапиксельному уровню изображений со сканированием при сверхвысокой скорости (свыше 10 Гбод) потока данных, и потенциал её совершенствования ещё не исчерпан.

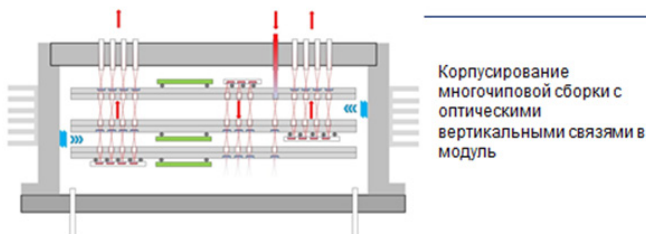
Барьерами на пути увеличения размеров матриц и их быстродействия является уменьшение сигнала с уменьшающегося чувствительного элемента и увеличение ёмкости удлиняющихся шин. На рис. 2а показаны характеристики, полученные моделированием, субмикронной ячейки нового типа с размерами 2-3 мкм, вырабатывающей цифровые сигналы с ШИМ модуляцией, и плотностью тока, достаточной для быстрой перезарядки длинных шин (более 10 000 А/см<sup>2</sup>). Рис. 2б показывает быстродействие этой ячейки в 5 Гбод при приёме цифровых оптических сигналов.



Барьером для процессорных плат обработки информации, поступающей от больших и скоростных матриц по большому количеству каналов (до сотен каналов) в реальном времени, является потеря быстродействия процессорных чипов и фотоматриц на интерфейсах при их взаимодействии на печатных платах. На рис. 4а, 4б и 4в показаны принципы создания 3Д модулей с оптическими лучевыми межчиповыми связями по вертикали, скоростные параметры которых могут превосходить параметры чиповых ядер. Эти же принципы можно распространить и на межплатные разъёмные оптические лучевые связи.



а)



Корпусирование  
многочиповой сборки с  
оптическими  
вертикальными связями в  
модуль

Состав сборки:

- основание с выводами для электропитания (стандартный корпус без крышки),
- стопка сборок БОЭКК в совмещающих Si держателях (не показаны), изготовленных с использованием фотолитографии и травления на Si пластинах,
- крышка с радиатором, волоконнооптическими выводами или оптическим окном

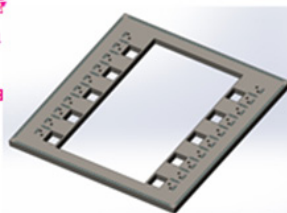
Преимущества: снижение габаритов устройств (плотность монтажа до 0,5 см<sup>2</sup>/БИС) и потребляемой мощности, бесконтактные вертикальные световые «шины», увеличение быстродействия соединений (до 10 Гб/с в вертикальных каналах), гальваническая развязка БИС, возможность прокачки хладагента между чипами



Перспективы межчиповой фотонной связи ... ФОТОНИКА - 2015

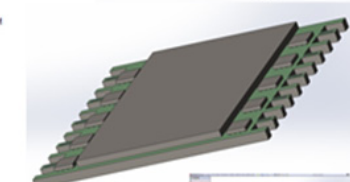
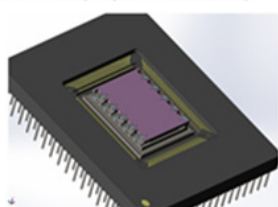
б)

Отдел РОЭТ. Интеллектуальный  
фотоприёмник - 3Д микросборка  
с вертикальными оптическими  
межчиповыми соединениями для  
многочиповых блоков  
управления и обработки  
сигналов ФПМ



3Д модуль с фотонными связями между ИС со схемами  
обработки сигналов скоростного фотоприёмника

- 3-х этажная сборка с фотонными связями (модель)



в)

Рисунок 4.

а) - трехэтажный модуль с оптическими межчиповыми связями, смонтированный на основании с контактными площадками по периферии для соединения с выводами корпуса

б) - реализация межчиповой оптической связи произвольных БИС

в) - сверху вниз кремниевые компоненты модуля: основание-оптическая скамья с контактными площадками для разварки на площадки корпуса, этажная сборка на базовом оптоэлектронном коммутационном кристалле БОЭКК (спейсере), совмещающие держатели этажных сборок, ОЭ 3Д модуль в стандартном корпусе



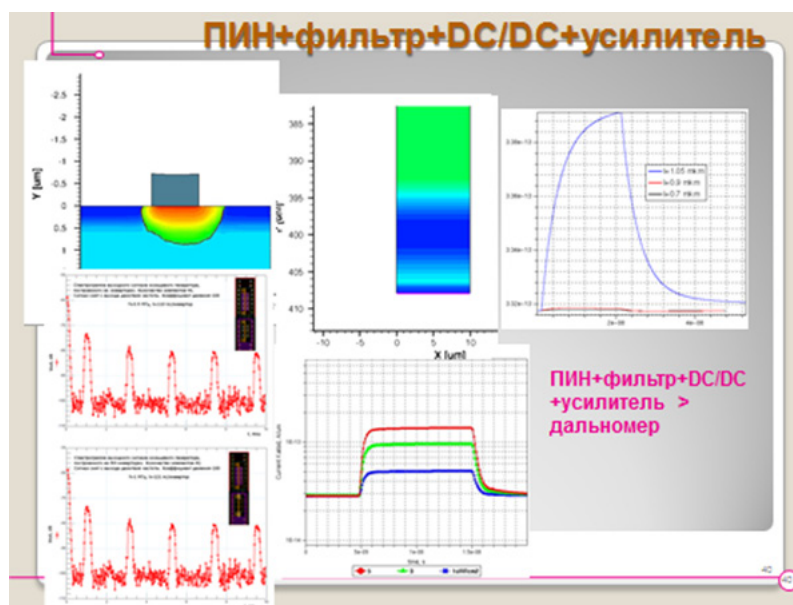
Расширению спектрального диапазона устройств машинного зрения может способствовать новый тип мультиспектрального фотоприёмника, который может быть выполнен по субмикронной и МОЭМС технологиям на кремниевой фабрике путём совмещения в одной ячейке активного болометрического ИК пикселя на кремниевой мембране и пикселя видимого диапазона в толще кремния. Параметрами такого приёмника будут: формат более 1Мпикс, шаг ячеек 12,5-25 мкм с возможностью бинирования, потребляемая мощность в ячейке менее 10 нВт, ширина шумовой частотной полосы – кадровая, не нуждается в вакуумном корпусе и охлаждении. Рис.5

**Исключительные параметры**

**Термочувствительность тестовых кремниевых элементов нового типа**

Температурная чувствительность % на °С	Температура измерений °С	L мкм	U источник В	Ток стока мА	chip
4,7	Н.ти30	0,5	2	500	02
5,2	Н.ти30	0,5	2	150	02
3	Н.ти30	0,5	0,5	116,9	01
13,6	Н.ти30	0,5	0,5	11,3	01
4,2	30 и 50	0,5	0,5	107,7	02
4,8	30 и 50	0,5	0,5	49,0	02
4,9	30 и 50	0,5	0,2	103,5	02
4,8	50 и 70	0,5	0,2	205,5	02
5,9	30 и 50	0,5	0,2	22,5	02
5,5	50 и 70	0,5	0,2	49,0	02
9,6	30 и 50	0,8	0,2	100,0	02
6,7	50 и 70	0,8	0,2	292,7	02
13	30 и 50	0,8	0,2	10,5	02
7,6	50 и 70	0,8	0,2	37,9	02
9,5	30 и 50	0,8	0,5	106,6	02
7,2	50 и 70	0,8	0,5	306,6	02
13	30 и 50	0,8	0,5	11,5	02
8,5	50 и 70	0,8	0,5	40,4	02

**Рисунок 5.**  
**Параметры мультиспектрального фотоприёмника**



**Рисунок 6.**  
**Возможность введения в пиксел функции дальномера**

# ПЬЕЗОАКТЮАТОРЫ ДЛЯ ВЫСОКОНАДЕЖНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

КАРЕВ П. В.

ООО «Промышленная метрология», г. Санкт-Петербург

E-mail: karev\_p@metrology-spb.ru

## ВСТУПЛЕНИЕ

Разработчики систем адаптивной оптики для космической и лазерной техники являются главными потребителями пьезокерамики. В системах фокусировки, системах слежения и наведения, системах микросканирования и в угловых дефлекторах для перемещения и наклона линз и зеркал используются электромеханические преобразователи на основе пьезокристаллов. Для опто-электронных систем ДЗЗ требуется, чтобы приводы были компактными, динамичными, точными и обладали хорошей повторяемостью. Пьезоэлектрические актюаторы с интегрированным рычажным механизмом АРА® (сокращение от «Amplified Piezoelectric Actuator») обладают привлекательными свойствами для применения в космосе.

Используя ноу-хау в области интеграции тензорезисторов и новое оборудование, компании CEDRAT TECHNOLOGIES удалось продемонстрировать долгосрочную способность пьезомеханизма с интегрированными тензодатчиками достигать нанометровую стабильность положения. Достижимая точность позиционирования может измеряться нанометрами и быть ограниченной только шумами электроники. Эта технология открывает новые возможности для промышленной, авиационной и космической техники.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ (ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ)

Пьезомеханизмы для высоконадежных применений должны обладать малыми габаритами, быть высокоточными и обеспечивать работу в динамике. Под динамикой понимается не только возможность работы с высокой частотой переключения, но и возможность выдерживать вибрации при выводе на орбиту без дополнительных креплений полезной нагрузки.

Проблема стабильности параметров пьезоматериалов занимает особое место при разработке и эксплуатации пьезодвигателей. Изменение температуры, влажности и давления оказывает влияние на стабильность параметров. В производственных условиях воспроизводимость свойств керамики в большей степени зависит от химического состава и качества исходного материала. [1] На данный момент в мире отсутствует единая система классификации пьезокерамики и актуален вопрос классификации пьезоактюаторов для применения в космосе.

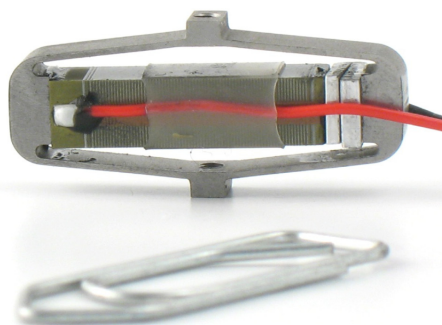
## ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ВАРИАНТОВ РЕШЕНИЯ

Электромагнитные двигатели зачастую обладают значительной инерцией и для систем микросканирования и угловых дефлекторов не могут обеспечить требуемую частоту переключения. Даже если на электромагнитных двигателях обеспечивается требуемая частота работы углового дефлектора, то такая конструкция, вероятно, будет достаточно крупногабаритной. Решения на базе пьезо механизмов обычно в 3-5 раз легче, чем решение на базе электромагнитных катушек.

## ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Для решения задачи микро-перемещений в компактных габаритах с частотой работы системы до кГц и с точностью до нанометров по заказу Французского Космического Агентства были разработаны пьезоэлектрические актюаторы с интегрированным рычажным усилителем

перемещения АРА® (сокращение от «Amplified Piezoelectric Actuator»). Пьезоактюатор АРА® состоит из многослойной пьезокерамики и внешнего металлического корпуса, выполненного в форме эллипса. АРА® являются сжимающими пьезоактюаторами. Рабочей осью является малая ось корпуса пьезоактюатора, которая сжимается при подаче напряжения на пьезокерамику.



**Рисунок 1.**  
**Вид АРА120S**

Эллиптический корпус пьезоактюатора АРА® решает несколько задач, некоторые из них:

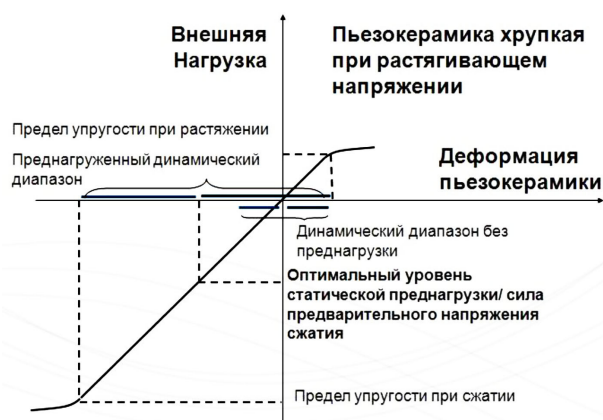
- обеспечение оптимальной механической преднагрузки многослойной пьезокерамики для наиболее эффективной работы в динамическом режиме;
- обеспечение увеличения хода пьезоактюатора за счет действия рычага;
- обеспечение возможности выдерживать большие перпендикулярные нагрузки и крутящие моменты;

- обеспечение механического интерфейса для крепления пьезокерамики и полезной нагрузки.

Недостатки эллиптического корпуса по сравнению с пьезоактюаторами прямого действия:

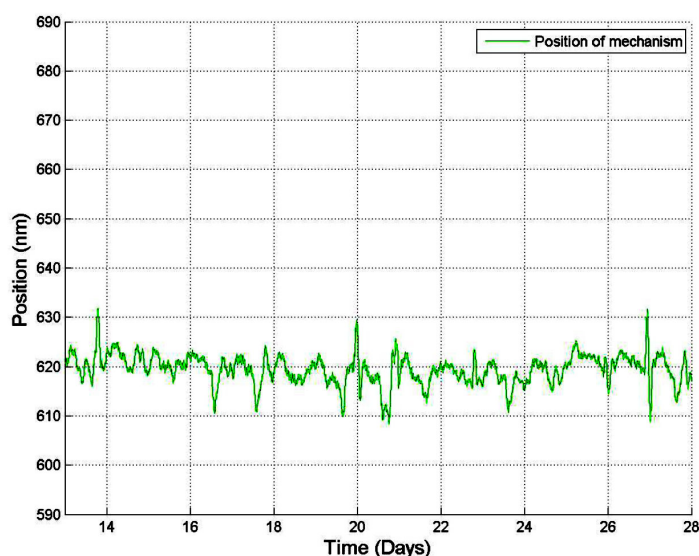
- уменьшение резонансной частоты;
- уменьшение блокирующей силы.

Пьезокерамика способна выдерживать значительные внешние сдвливающие нагрузки. Но в то же время по своим свойствам она является хрупкой при растягивающих нагрузках. Эта особенность пьезокерамики ограничивает рабочий ход в динамическом режиме. Для обеспечения более эффективной деформации пьезокерамики на высоких частотах пьезокерамику механически нагружают внешней пружиной. При оптимальном уровне механической предварительной нагрузки (преднагрузки) будет обеспечен расширенный динамический диапазон деформации пьезокерамики. Роль внешней пружины в пьезоактюаторах АРА® играет металлический корпус многослойного пьезоэлектрического актюатора.



**Рисунок 2.**  
**Предварительное механическое напряжение пьезокерамики**

Основным недостатком пьезо приводов является нелинейность, появляющаяся из-за имеющегося гистерезиса и эффекта дрейфа (крип), что требует наличия управления с обратной связью с датчиком положения. Компания CEDRAT TECHNOLOGIES обладает опытом интеграции тензометрических датчиков положения (далее – SG, сокр. от «Strain Gage»), что позволяет получать линейные пьезо механизмы, обеспечивающие высокую точность и стабильность. Тензометрические датчики применялись в космосе, в миссии ROSETTA и были выбраны для других космических программ. Бесконтактные датчики, такие как емкостные или индукционные датчики положения хорошо известны как точные датчики, но их габариты и стоимость являются основными недостатками, особенно для многоосевых систем. При содействии Французского Космического Агентства для оценки точности позиционирования тензометрическими датчиками были проведены испытания. Был построен испытательный стенд на основе двухтактной конфигурации актюаторов PPA40M. Разработка была выполнена в соответствии с требованиями Европейского Агентства по Стандартизации в области Космической Техники. Механизм является двухконтурным. При активации обоих контуров общий ход механизма составляет около 80 мкм. Модель механизма была испытана на способность выдерживать воздействие вибраций и ударов. SG элементы были установлены на всех 4-х пакетах керамики, чтобы контролировать перемещение всех активных элементов механизма. Таким образом, SG мост состоял из 8 элементов SG, вместо обычных 4-х. Тензодатчики соединены в полную конфигурацию моста Уинстона для повышения чувствительности при одновременном ограничении теплового воздействия и ошибок, связанных с нелинейностью. Испытательный стенд был сделан на основе высокоточного лазерного интерферометра, который использовался в качестве опорного датчика положения. Стенд испытывался в термовакуумной камере. Изменения температуры, наблюдаемые на стенде или пьезо-механизме не превышали  $\pm 0,15$  °C.



**Рисунок 3.**  
**Стабильность положения в течение 2-х недель**

Результаты показали, что механизм имеет возможность удерживать собственное стабильное положение в нанометровом диапазоне. Среднее изменение положения остается в пределах менее  $\pm 5$  нм от исходного положения.

На данный момент в мире не существует единой системы классификации пьезокерамики. Поэтому для применения в космосе производитель CEDRAT TECHNOLOGIES использует методику испытания 28 пьезоактюаторов из одной партии для квалификации 1 пьезоактюатора.

Пьезоактуаторы АРА с интегрированным рычажным усилителем перемещения были использованы в летном применении в трехосевом сканирующем механизме для ROSETA/MIDAS. ROSETTA – первая миссия, программа которой предусматривает не только дистанционное изучение, но и посадку в 2014 году на изучаемую комету Чурюмова-Герасименко. MIDAS (сокращение от «MICRO-IMAGING DUST ANALIS SYSTEM») - атомный силовой микроскоп высокого разрешения для изучения частиц пыли.

Пьезоактуаторы применяются и в других областях: микросканирование с повышенной частотой для улучшения изображения матрицы; высокоскоростная работа пьезоэлектрических шторок в синхротронах; угловые дефлекторы (сканирующие зеркала).

### ВЫВОДЫ

Пьезомеханизмы широко применяются в качестве электромеханических преобразователей для высоконадежных применений. Для обеспечения надежной работы пьезокерамики в динамическом режиме требуется обеспечить оптимальную преднагрузку пьезокерамики с помощью внешней механической пружины. Разработанные пьезомеханизмы не требуют никаких дополнительных фиксирующих устройств при выводе на орбиту: механизм микросканирования и сканирующее зеркало. Развивается применение пьезо механизмов в системах фокусировки лазерных источников лидаров. Новый тренд – применение пьезо механизмов в криогенной среде. Тензометрические датчики являются очень простыми и легкими в использовании для выполнения грубых измерений. Но для того, чтобы получить преимущества от высокой точности и высокой стабильности требуются знания в технологии их применения.

#### *Список литературы:*

1. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений: учебное пособие / А.А. Бобцов, В.И. Бойков, С.В.Быстров, В.В. Григорьев, П.В.Карев. – СПб.: Университет ИТМО, 2017 – 134 с.
2. Миниатюрные пьезоэлектрические механизмы для электрооптических и космических применений / R. Le Letty, F. Barillot, H. Fabbro, F. Claeysen, Ph. Guay, L. Cadiergues, Карев П.В. // г. Красногорск: Контенант - 2016. - Т. 15. - № 1. - С. 67-72
3. Nanometric Linear Piezo-Actuator with Integrated Strain Gages for High Stability Positioning / T. Porchez, F. Barillot, C. Belly / ACTUATOR 2016, 15th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, 13–15 June 2016

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОХРАННОСТИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

ЗАВАРЗИН В.И.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: zavarzin@bmstu.ru

Одной из важных проблем требующих решения при создании космических оптико – электронной аппаратуры (ОЭА) является обеспечение высококачественной не только видовой, но и измерительной информации в течение всего срока эксплуатации [1]. Это условие включает в себя комплекс качественных и количественных мероприятий по сохранности характеристик аппаратуры в течение длительного (несколько лет) срока активного существования на орбите.

Наличие фотограмметрической модели ОЭА позволяет на этапе проектирования аппаратуры, задаваясь фотограмметрическими погрешностями, определять требования к аппаратуре, обеспечивающие заданные фотограмметрические параметры (ФГП), их контроль и сохранность в процессе эксплуатации [2].

Наиболее ответственным и сложным этапом создания ОЭА является обеспечение размерной стабильности элементов конструкции ОЭА, приемника изображения, корпусной части и оптического тракта [3, 4]. Особые условия работы ОЭА выдвигают жесткие требования к материалам конструкции по их поведению в условиях высокого вакуума, длительного воздействия проникающего излучения, повышенного уровня вибрации широкого спектра частот, низкого значения коэффициентов температурного расширения и удельного веса, высокого значения удельных жесткости, прочности и временной размерной стабильности. Следует отметить, что по многим материалам мало сведений или они зачастую противоречивы по испаряемости, скорости химических реакций в вакууме, о разупрочнении в условиях длительного воздействия проникающей радиации и т.д. Поэтому выбирать материалы следует, прежде всего, проверенные, а новые – после тщательного изучения их свойств и возможностей. Рассмотрена возможность применения бериллия, композиционных материалов, алюминиевых сплавов, стали, титана, инвара и др.

Использование хорошо известных и освоенных материалов типа алюминиевых сплавов или стали в конструкции ОЭА приводит, из-за жестких допусков к взаимному расположению оптических элементов и их формы, к необходимости контролировать в реальном масштабе времени качества изображения оптической системы, что приводит к созданию бортового комплекса контрольно-измерительной и испытательной аппаратуры, а, следовательно, к увеличению веса, габаритов и стоимости.

Необходимость сопряжения элементов конструкции со стеклообразными материалами требует применение металлических материалов с малым значением коэффициента температурного расширения типа никелевых и титановых сплавов. В последнее время все более целесообразным является применение в конструкции ОЭА графитно-эпоксидных композиционных материалов. Конструкции, выполненные из этих материалов, имеют меньший вес, обладают большей жесткостью и удельной прочностью, чем металлические, а низкий коэффициент температурного расширения способствует стабильности размеров.

Таким образом, все возрастающие требования к космическим снимкам вызывает необходимость повышения фотограмметрической точности оптико - электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли. Проведенный анализ погрешностей ФГП ОЭА позволил сформулировать требования к конструкции и процессам сборки и контроля ОЭА, выполнение которых обеспечит повышение и сохранность ФГП ОЭА в процессе эксплуатации.

*Список литературы:*

1. *А.И. Гоев, В.И. Заварзин, Н.В. Чичварин / Организация проектирования и производства оптико-электронных систем в среде с ограниченными ресурсами // Информационные технологии. 2001. № 3. Т. 2. С. 36 - 43.*
2. *Фотограмметрические параметры оптико-электронной аппаратуры / С.А. Архипов, Г.В. Гасич, В.И. Заварзин, С.А. Морозов // Вестник МГТУ. Сер. «Приборостроение». 2008. №4. - С. 103 – 114.*
3. *С.А. Архипов, В.И. Заварзин, Б.Н. Сенник. Разработка и изготовление оптических систем для перспективной космической аппаратуры дистанционного зондирования Земли / Оптический журнал. Т. 80. №. 2013. – С. 34-38.*
4. *В.И. Заварзин, А.И. Гоев, С.А. Архипов / Методы коррекции волнового фронта крупногабаритных оптических систем на основе управления температурными полями оптических элементов // Вестник МГТУ. Сер. «Приборостроение». №1. –С 46 - 41.*

# КОМПАКТНЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЙ АППАРАТ С АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫМ ДИСПЕРГИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

ЗАВАРЗИН В.И.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: zavarzin@bmstu.ru

Гиперспектральная технология съемки обладает большими перспективами для неинвазивной диагностики болезней и научных исследований [1. 2]. Медицинский гиперспектральный аппарат (МГСА) отличается тем, что на нем установлен проекционный объектив, снимающий с конечного расстояния, а также применением калиброванных источников излучения для подсветки исследуемых образцов (рис. 1) [3]. Для обеспечения сканирования обычно применяется перемещение исследуемых образцов или аппарата на конвейерной ленте.

МГСА состоит из изображающего объектива (ИО) и спектрометра изображения, в котором входная щель спектрометра расположена в фокальной плоскости ИО. Щель ориентирована поперек направления движения платформы аппаратуры с ограничением углового поля полосой захвата. Применение автоколлимационного диспергирующего устройства позволяет уменьшить габариты и вес за счет двойного хода лучей через объектив. С помощью спектрометра, срез изображения со спектральным разрешением выходной щели выводится на приемник.

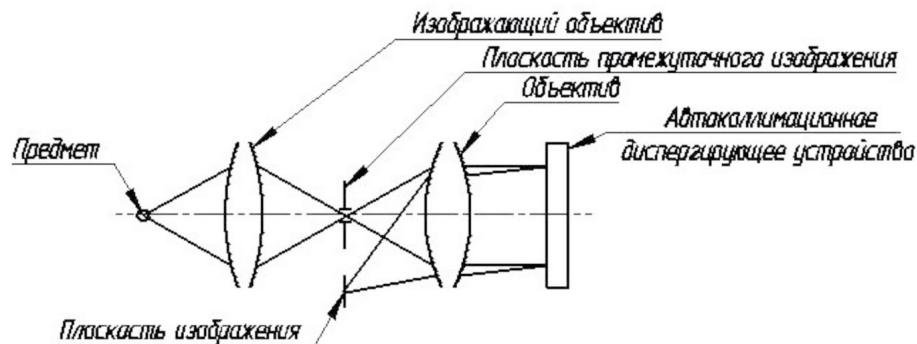


Рисунок 1.

## Схема работы гиперспектрального аппарата

Система построена по следующему принципу: ИО формирует движущееся перпендикулярно оптической оси изображение объекта съемки на щели, установленной в фокальной плоскости ИО. Ширина щели равна размеру элемента приемника изображения, соответственно, а по направлению строки определяется требованием к захвату МГСА.

Объектив коллимирует пучки лучей от изображения на щели и направляет параллельный пучок лучей на диспергирующее устройство. На диспергирующем устройстве движущееся по щели изображение исследуемого объекта раскладывает в спектр, который фокусируется в обратном ходе лучей объективом на приемнике изображения. При этом в направлении строки приемника изображается пространство, а в направлении столбца – движущийся спектр изображения щели. Отличительной особенностью автоколлимационного диспергирующего устройства является компактность, малый вес и возможность работы в широком спектральном составе. В качестве диспергирующего устройства может использоваться плоская отражательная дифракционная решетка или призматические системы с зеркальным покрытием.



Приемником служит двухмерная матрица. В первом измерении, параллельном щели, вдоль строки приемника отображается вырезаемое щелью изображение, формируемое ИО, тогда как во втором измерении, перпендикулярном щели, осуществляется спектральная развертка изображения. Пространственная информация в поперечном направлении накапливается за счет сканирования, которое осуществляется движением вдоль исследуемого объекта. Таким образом, формируется трёхмерный гиперкуб данных, включающий спектральную информацию каждого пикселя исследуемого пациента. Получение гиперкуба данных за короткий промежуток времени позволяет с помощью медицинских гиперспектральных аппаратов производить более легкий и быстрый спектральный анализ, анализировать смешанные структуры, локализовать спектральную характеристику каждой точки исследуемого образца, оперативно отслеживать протекание различных процессов, производить спектральный анализ непосредственно тела человека – открытых ран, опухолей и т.д. Кроме того облегчается настройка аппаратуры за счет визуального контроля получаемых изображений.

Применение гиперспектрального анализа может обеспечить раннее обнаружение различных видов рака, заболевания сетчатки, диагностики опухолей, кожных заболеваний, диабетической язвы стопы и т.д. Также гиперспектральные аппараты могут быть использованы для проверки на инфекции или отклонения от нормы анализов (крови, мочи и т.д.) и для определения уровня крови и кислорода в тканях, особенно во время хирургических операций. Способность света проникать в ткани зависит от того, насколько сильно ткани поглощают свет (таблица 1). В свою очередь поглощение (отражение) является функцией молекулярного состава.

**Таблица 1. Коэффициент поглощения для различных тканей и компонентов**

Ткань	Описание	Длина волны (нм)	$\mu$ (1/см)
Кожа	Дерма	700	0.38
	Рука	660	0.128
	Нога	660	0.053
	Лоб	700	0.024
Головной мозг	Кора мозга	950	0.15
	Зрительный нерв	850	0.8
	Череп	670	0.6
	Мозжечок	950	0.9
Аорта	Атерома	1060	0.15
Кровь	Насыщенная кислородом	660	1.3
	Лишенная кислорода	660	4.9
Разное	Легкие	630	8.1
	Мышцы	1060	2
	Мениск	1060	0.34
	Мочевой пузырь	1064	0.8
	Сердце	1060	0.3
	Печень	1064	0.7
	Толстая кишка	1064	2.7

*Список литературы:*

1. В.И. Заварзин, А.В. Лу / Методика расчета аппаратной функции гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования Земли // Вестник МГТУ. Сер. «Приборостроение» Спецвыпуск. 2012. - С. 82-89.
2. В.И. Заварзин, А.В. Лу / Расчет характеристик гиперспектрального аппарата с призмным диспергирующим устройством // Вестник МГТУ. Сер. «Приборостроение». 2015. №1. - С. 111 -120.
3. В.И. Заварзин, А.В. Лу / Медицинский гиперспектральный аппарат // Научно-техническая конференция «Медико-технические технологии на страже здоровья». Сборник докладов 21-28 сентября 2014 г., Греция, о. Кефалония, - М.: Изд-во НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. – С. 66-69.

# ЗЕРКАЛЬНЫЕ И ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫЕ ОБЪЕКТИВЫ С ЭКСЦЕНТРИЧНО РАСПОЛОЖЕННЫМ ПОЛЕМ ИЗОБРАЖЕНИЯ

ЗАВАРЗИН В.И.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: zavarzin@bmstu.ru

В космическом оптическом приборостроении все чаще применяют центрированные зеркальные и зеркально - линзовые объективы без центрального экранирования с эксцентрично расположенным полем изображения, построенные на базе схемы зеркального триплета Кука [1]. Это обусловлено рядом важных достоинств, таких как: широкий спектральный диапазон, отсутствие центрального экранирования, большие угловые поля, высокое качество изображения, разнообразие оптических схем различной светосилы и возможность получения задних отрезков порядка (0,5...0,7) от фокусного расстояния объектива.

Отсутствие центрального экранирования позволяет, в сравнении с классическими осесимметричными схемами обеспечить более равномерное по полю качество изображения. Угловое поле изображения в таких оптических системах расположено на некотором расстоянии относительно оптической оси и имеет кольцевую форму. Изображение формируется только наклонными пучками лучей. Из-за отсутствия симметрии поля относительно оптической оси, дополнительно возможно использовать в качестве коррекционного параметра, улучшающего качество изображения, подвижку зеркал, нарушая при этом центровку объектива.

Одной из распространённых и простых схем зеркального объектива с эксцентрично расположенным полем изображения является центрированная трехзеркальная схема (рис.1), которая имеет как самостоятельное применение, так и используется в качестве базовой при создании зеркально-линзовых объективов. Первое и третье зеркала объектива – вогнутые внеосевые фрагменты поверхностей с осями симметрии, совпадающими с оптической осью объектива. Второе зеркало осесимметричное относительно оптической оси объектива. Предлагается методика габаритного и абберационного расчета, а также приводятся рекомендации по выбору поверхности объектива для последующей асферизации [2].

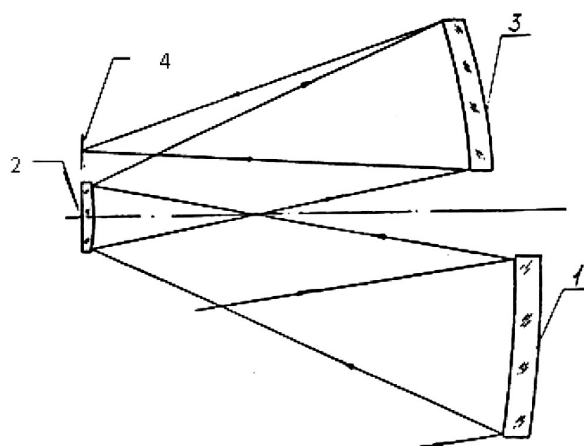


Рисунок 1.

*Трехзеркальный объектив с эксцентрично расположенным полем изображения (триплет Кука): 1, 2, 3 – зеркала по ходу лучей, 4 – плоскость изображения*

Приводятся методики габаритного и абберационного расчета новых схемных решений зеркально-линзовых объективов на базе трехзеркального объектива с эксцентрично расположенным полем изображения [3]. Рассчитанные объективы, имеют высокую степень исправления aberrаций, в том числе дисторсии и хроматических aberrаций в видимой и ближней ИК области спектра [4, 5, 6].

Созданные схемные решения зеркально-линзовых объективов могут быть использованы в перспективных разработках аппаратуры дистанционного зондирования Земли и открывают новые возможности, выгодно отличающиеся от действующих более высокой эффективностью (меньшим отношением стоимости единицы информации к затратам на проект) [7].

*Список литературы:*

1. С.А. Архипов, В.И. Заварзин, Б.Н. Сенник. Разработка и изготовление оптических систем для перспективной космической аппаратуры дистанционного зондирования Земли. Оптический журнал, т. 80. № 1. 2013. - С. 34-38.
2. В.И. Заварзин, А.В. Ли. Расчет центрированного зеркального объектива с эксцентрично расположенным полем изображения. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2016. - № 2. – С. 100 – 118.
3. В.И. Заварзин, С.А. Морозов, С.О. Кравченко. Методика расчета объективов с зеркалами Манжена на основе трехзеркальной схемы с эксцентрично расположенным полем изображения. Вестник МГТУ. Сер. «Приборостроение»: электронное издание. 2013. №1. С. 1-13.
4. С.А. Архипов, В.И. Заварзин, В.В. Заварзина, С.О. Кравченко, С.А. Морозов, Б.Н. Сенник. Зеркально-линзовый объектив (варианты). / Патент РФ на изобретение № 2461030. Бюллетень изобр. - 10.09. 2012. - № 25.
5. С.А. Архипов, В.И. Заварзин, С.О. Краченко, В.М. Линько, С.А. Морозов, А.П. Тарасов. Двухканальный зеркально-линзовый объектив. / Патент РФ на изобретение № 2461030. Бюллетень изобр. - 10.07. 2015. - №19 .
6. С.А. Архипов, В.И. Заварзин, С.А. Морозов, А.В. Ли, В.М. Линько, С.О. Кравченко. Зеркально-линзовый объектив. / Патент РФ на изобретение № 2547170. Бюллетень изобр. - 10.09. 2015. - № 25.
7. С.А. Архипов, В.И. Заварзин, В.А. Малыхин, С.А. Морозов. Юстировка и аттестация длиннофокусного трехзеркального объектива с эксцентрично расположенным полем изображения. Вестник МГТУ. Сер. «Приборостроение». 2009. №4. С. 24-36.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕТЧАТОГО КОМПОЗИТНОГО КОРПУСА ТЕЛЕСКОПА РАЗМЕРОСТАБИЛЬНОГО К ДЕЙСТВИЮ ТЕМПЕРАТУР

ШАЙДА А.Н., СТРАТИЛАТОВ Н.Р., НОНИН А.С., ТКАЧЕНКО А.С.

АО РКЦ «Прогресс», г. Самара

E-mail: csdb@samspace.ru

Композитные материалы, армированные углеродными волокнами, находят широкое применение в ракетно-космической технике и авиастроении.

Основным преимуществом сетчатых композитных конструкций по сравнению с традиционными металлическими, трехслойными конструкциями с сотовым наполнителем и композитными несущими слоями, является возможность снижения веса конструкции с обеспечением ее высокой удельной прочности и жесткости.

Применяемый в сетчатых конструкциях однонаправленный углепластик, имея плотность в 1,75 раза меньшую плотности алюминиевых сплавов, превосходит последние по прочности более чем в 5 раз и по жесткости в 2-3 раза.

В космических аппаратах (КА) дистанционного зондирования Земли серьезной проблемой кроме веса является и обеспечение размерной стабильности корпусов телескопов в условиях воздействия температур космического пространства. Для уменьшения температурных деформаций корпуса телескопа используют углепластик с низким температурным коэффициентом линейного расширения.

Уменьшить деформации от действия температур можно за счет применения активных и пассивных средств обеспечения теплового режима, однако это приводит к усложнению конструкции КА, снижению ее надежности и увеличению веса.

Сетчатые конструкции, в которых нагрузка воспринимается ребрами и которые не требуют обшивки, были предложены в конце XIX века В.Г. Шуховым и реализованы в конструкции телевизионной башни г. Москва.

В 1980-х гг. в Центральном научно-исследовательском институте специального машиностроения была разработана технология промышленного производства крупногабаритных сетчатых конструкций, основные несущие элементы которых изготовлены из однонаправленного углепластика имеющего исключительно высокую удельную прочность, жесткость.

Объемное содержание волокон однонаправленного углепластика составляет порядка 35%, что позволяет осуществлять пересечение ребер в сетчатой конструкции без изгиба волокон.

Известные сетчатые композитные оболочки не обеспечивают достаточную стабильность размера по высоте от действия температур, так как кольцевые и спиральные ребра выполнены из однонаправленного углепластика, имеющего малый, но конечный температурный коэффициент линейного расширения ( $\alpha$ ), что приводит к температурным деформациям размеров корпуса и расфокусировки телескопа.

Задачей является устранение указанных недостатков, то есть при минимальной массе и максимальной прочности и жесткости обеспечить стабильность размера по высоте сетчатого композитного корпуса космического телескопа (КТ) при действии температур с целью сохранения его фокусировки.

Для достижения этой цели сетчатый композитный корпус состоит из кольцевых и спиральных ребер, соединенных между собой в узлах пересечения, при этом кольцевые ребра равномерно распределены по высоте сетчатого корпуса КТ и расположены симметрично относительно точек пересечения спиральных ребер. Соединение кольцевых и спиральных ребер обеспечивается технологией намотки сетчатого корпуса.

Геометрическая характеристика корпуса и физические характеристики применяемых материалов связаны соотношениями.

# РАЗРАБОТКА ИНКРЕМЕНТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ВСТРАИВАЕМОГО ТИПА

КОВАЛЕВ М.С., КРАСИН Г.К., ОДИНОКОВ С.Б., СЦЕПУРО Н.Г.

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва

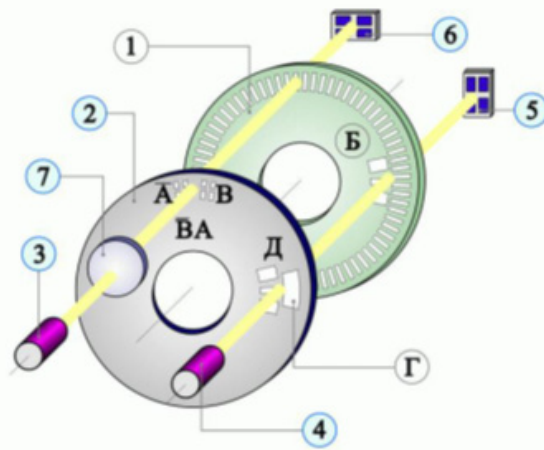
E-mail: m.s.kovalev@gmail.com

Современные углоизмерительные приборы, такие как электронные тахеометры, оснащены лазерными дальномерами, что позволяет проводить не только измерения углов между объектами с погрешностями не более одной угловой секунды, но и расстояния до этих объектов (по диффузному объекту до 10 км, по призмённому отражателю до 20 км). Поэтому такие тахеометры рассматриваются как сочетание теодолитной и дальномерной подсистем. В рамках этих подсистем выделяются наблюдательный, излучающий и фотоприемный канал. В теодолитную подсистему входит только наблюдательный канал, в дальномерную – все три. Важной частью теодолитной подсистемы является отсчетная система (лимбы, датчики). Часть настроек теодолитной подсистемы базируется на показаниях отсчетной системы. В связи с этим актуальной темой является создание инкрементального преобразователя угловых перемещений встраиваемого типа на основе высокоточных угломерных структур.

Среди основных структурных схем построения преобразователей угловых перемещений выделяют две основные группы: абсолютные и инкрементные.

Инкрементные датчики углового положения используются для определения перемещений вращающегося вала, выдавая импульсный цифровой код, когда нет нужды сохранять абсолютное угловое положение при выключении питания датчика. То есть, при обратном включении датчика отсчет поворота угла начнется с нуля, а не с угла, на который вал был выставлен. Для привязки системы отсчета к началу отсчёта инкрементные датчики имеют нулевые (референтные) метки, через которые нужно пройти после включения оборудования. Недостатком такого типа датчиков угла положения относится то, что невозможно определить пропуск импульсов по каким-либо причинам. Это приводит к накоплению ошибки определения угла поворота вала до тех пор, пока не будет пройдена нуль-метка.

Основным преимуществом инкрементных энкодеров является их простота, надежность и относительно низкая стоимость по сравнению с абсолютным датчиком. Принцип работы инкрементных преобразователей угловых перемещений основан на регистрации относительной величины прошедшего через растровое сопряжение потока оптического излучения как координатной-периодической функции взаимного углового положения регулярного растра шкалы и растров окон анализатора (рисунок 1). Преобразователь имеет два кинематически связанных функциональных звена: радиальную растровую шкалу 1, жестко связанную с валом преобразователя, и растровый анализатор 2 неподвижного считывающего узла. Радиальная растровая шкала (далее везде лимб) содержит две концентрические информационные дорожки: регулярного растра и референтной метки Б.

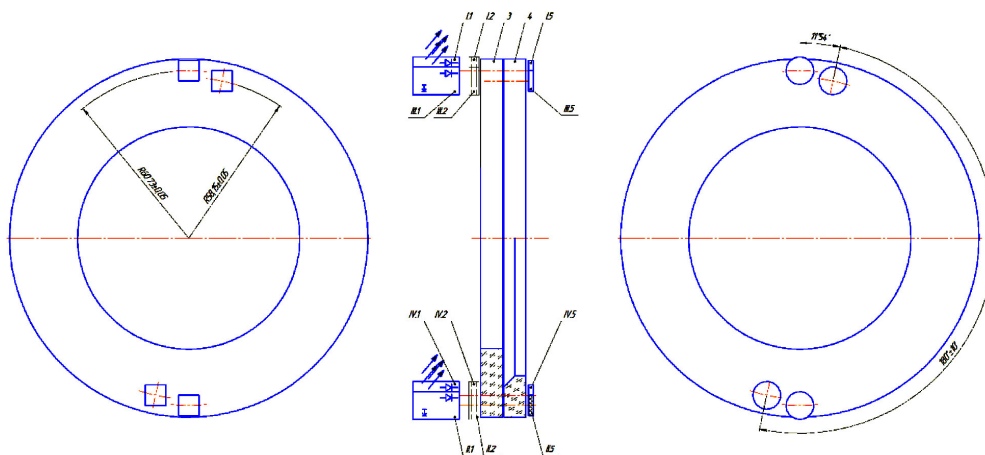


**Рисунок 1.**

**Структурная схема инкрементального преобразователя:**

**1 – растровая шкала; 2 – растровый анализатор; 3,4 – излучающий диод; 5,6 – квадрантный фотодиод; 7 – конденсор**

На основании требований, предъявляемых к разрабатываемому инкрементному преобразователю, была синтезирована его оптическая схема. В нее входят 4 оптические подсистемы, основные функциональные элементы которых отображены на рисунке 2.



**Рисунок 2.**

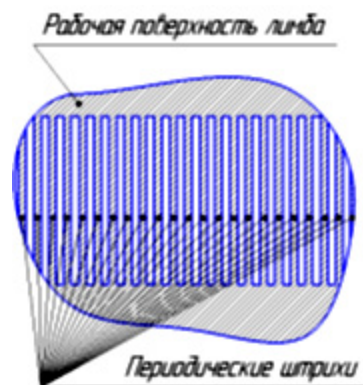
**Оптическая схема инкрементного преобразователя:**

**I-IV.1 – источник излучения; I-IV.2 – коллимирующий объектив; 3 – оптический лимб; 4 – оптический шаблон; I, II.5 – пара ФПУ; III, IV.5 – ФПУ**

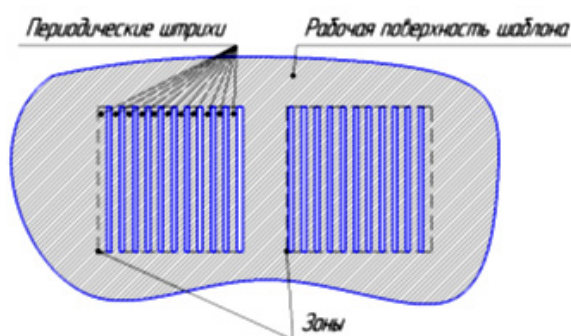
Оптические подсистемы I и II работают по следующему принципу. Излучение, исходящее от источника (I, II.1), коллимируется объективом (I, II.2), и данный световой поток модулируется с помощью штриховых структур, нанесенных на оптический лимб (3) и шаблон (4).

Отличительной особенностью в расположении штрихов у лимба и шаблона является тот факт, что штрихи у лимба расположены радиально по всей рабочей поверхности (рисунок 3). В тоже время оптический шаблон имеет на своей рабочей поверхности четыре зоны с периодическими структурами (рисунок 4). Причем данные зоны расположены попарно таким образом, что каждый источник излучения (I, II.1) засвечивает свою пару зон.

Вся остальная часть рабочих поверхностей лимба и шаблона покрыта отражающим покрытием.



**Рисунок 3.**  
*Периодические штрихи на рабочей поверхности лимба*



**Рисунок 4.**  
*Периодические штрихи на рабочей поверхности шаблона*

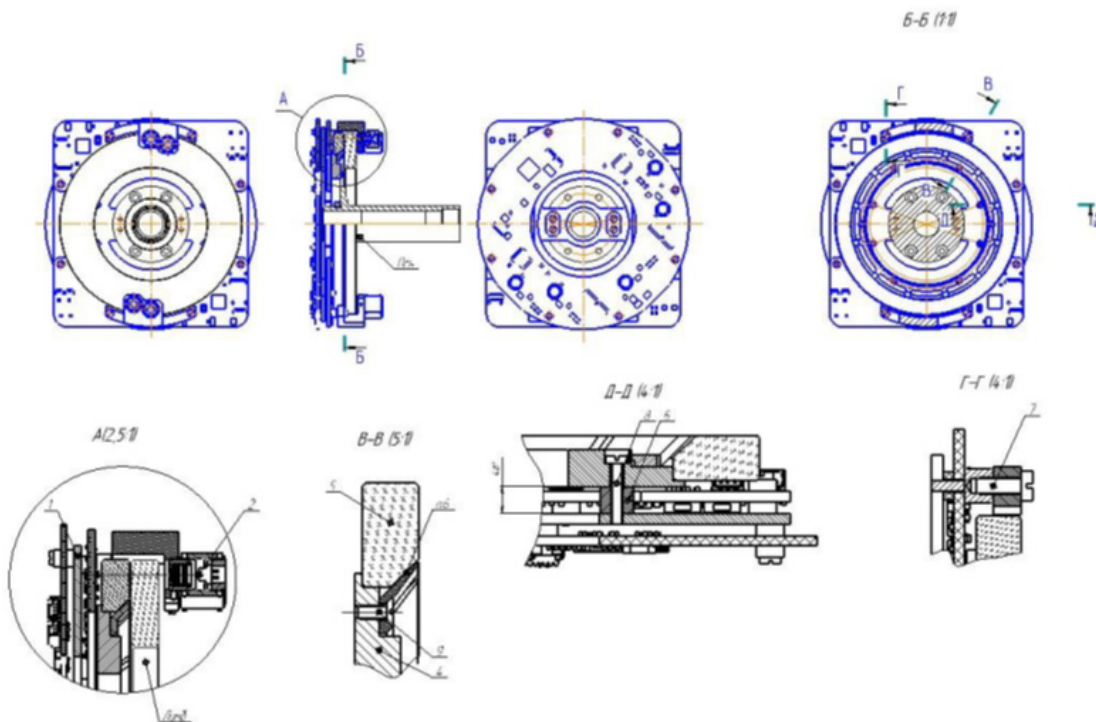
В результате часть светового потока модулируется лимбом и штрихами первой зоны шаблона, а другая часть - лимбом и штрихами второй зоны шаблона. Затем каждая часть промодулированного светового потока регистрируются двумя ФПУ (I, II.5) соответственно.

Благодаря модулированию потока по частям, подсистема I и II позволяют определить не только угол поворота лимба, но и определить направление вращения. А использование двух подсистем обеспечивает повышение точности результата.

В подсистемах III и IV излучение, исходящее от источника (III, IV.1), так же коллимируется объективом (III, IV.2), световой поток модулируется с помощью оптического лимба (3) и шаблона (4), а конкретно с помощью нанесенных на них реперных точек. Промодулированное излучение регистрируется одним ФПУ (III, IV.5). Реперные точки выполняют функцию грубой шкалы отсчета. Поэтому можно сказать, что подсистемы III и IV позволяют определить грубое значение угла поворота лимба. Использование двух подсистем обеспечивает повышение точности результата.

Штрихи оптического лимба и шаблона, не пропускающие излучения области будут выполнены на рабочих поверхностях оптических деталей методом нанесения хрома и с последующим его окислением лазером или плазмохимическим травлением [1].

На основании оптической схемы (рисунок 2) была разработана и исследована конструкция инкрементального преобразователя угловых перемещений встраиваемого типа (рисунок 5).



**Рисунок 5.**

**Общий вид инкрементного преобразователя:**

**1 – блок оптико-электронный; 2 – осветитель; 3 – прижим шаблона;  
 4 – оправа узла горизонтального; 5 – шаблон; 6 – проставка прямоугольная;  
 7 – винт А.М3-6gx8.32.Л63.11 ГОСТ 1491-80; 8 – винт А.М2-6gx12.32.Л63.11  
 ГОСТ 1491-80; 9 – винт А.М2-6gx5.32.Л63.11 ГОСТ 1491-80**

*Список литературы:*

1. Расчёт, конструирование и изготовление дифракционных и голограммных оптических элементов: учебное пособие / С.Б. Одинокоев, Г.Р. Сагателян, М.С. Ковалёв. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – С. 42 – 59.



# ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СУБМИКРОННОЙ ТОЧНОСТИ НА ОСНОВЕ ШТРИХОВОЙ МЕРЫ

КОРОТАЕВ В.В., ВАСИЛЬЕВ А.С.

Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru

*В работе рассмотрены вопросы разработки опτικο-электронного преобразователя линейных перемещений субмикронной точности на основе штриховой меры, предназначенного для применения в жестких условиях эксплуатации.*

## ВВЕДЕНИЕ

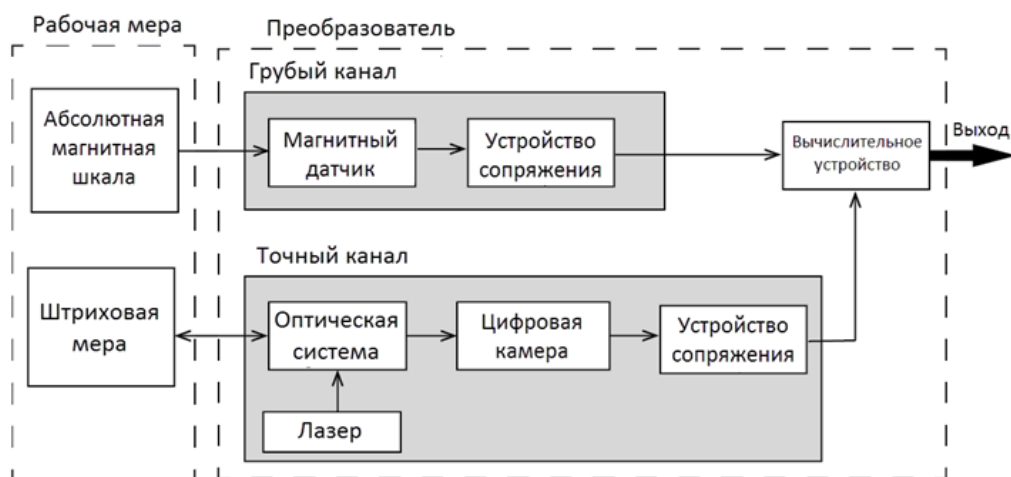
Быстрое развитие новых технологий определяет постоянное увеличение сложности и точности операций механической обработки для промышленного оборудования. Повышение точности позиционирования рабочего элемента и заготовки неразрывно связано с контролем их относительного положения [1,2]. Линейные преобразователи являются эффективным средством решения этой проблемы, обеспечивая высокую точность, скорость, надежность и возможности математической и логической обработки информации. Обеспечение высокой точности таких преобразователей при сохранении уровня надежности систем, их работоспособности при высоких скоростях обработки деталей позволяет увеличить в целом экономическую эффективность производства. Поэтому разработка более совершенных преобразователей линейных перемещений исполнительных механизмов промышленных станков является крайне важной задачей.

На сегодняшний день самыми высокими точностными характеристиками обладают лазерные интерферометрические преобразователи, однако при наличии возмущений в воздушном тракте их погрешность возрастает до нескольких десятков и сотен микрометров. Кроме того, интерферометрические системы работают только в инкрементном режиме. Инкрементные преобразователи осуществляют счет пройденных меток на шкале, либо пиков интенсивности в оптическом сигнале. При этом счет осуществляется с момента включения или принудительного сброса. Работа преобразователя в таком режиме влечет за собой необходимость его калибровки после каждого включения [3]. Для повышения эффективности производства преобразователь должен работать в абсолютном режиме. Указанные обстоятельства определяют актуальность и важность разработки субмикронного опτικο-электронного преобразователя линейных перемещений для диапазонов перемещений рабочих органов станков порядка нескольких метров, способного работать при скоростях перемещений порядка 5 м/с и обеспечивающего погрешность не более 5 мкм [4, 5].

## СТРУКТУРНАЯ СХЕМА

Наличие выпускаемых промышленностью штриховых мер, выполненных по ГОСТ 12069-90 и основанных на материале из инварстабиля [6], высокоэффективных источников оптического излучения и матричных приемников оптического излучения, современных алгоритмов обработки цифровой информации определили структуру разрабатываемого абсолютного преобразователя линейных перемещений (рисунок 1). Преобразователь включает в себя два независимых канала измерения: канал точного и канал грубого отсчетов сопряженные в единой конструкции.

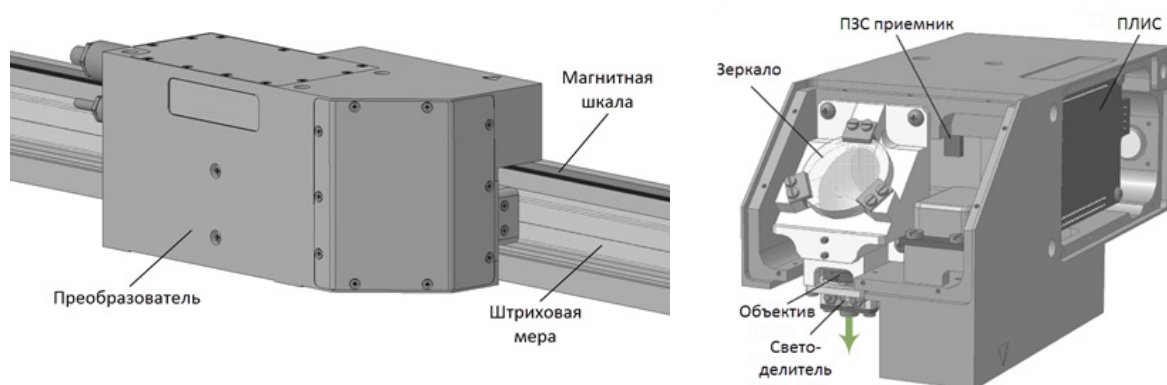
В предлагаемой схеме канала точного отсчета лазер освещает штриховую меру пучком излучения (в общем случае не параллельным). Частично рассеянное, частично отраженное излучение от штриховой меры попадает на вход оптической системы, которая формирует распределение освещенности на поверхности матричного приемника излучения цифровой камеры. Распределение освещенности, на приемнике преобразуется в цифровое изображение, обработка которого в вычислительном устройстве позволяет определить положение преобразователя относительно штриховой меры с требуемой погрешностью. Особенность процесса состоит в том, что это изображение не стационарно и изменяется во времени (например, при движении рабочей меры относительно преобразователя). Канал грубого отсчета состоит из магнитного датчика, считывающего абсолютное значение текущего положения преобразователя с магнитной шкалы закрепленной на штриховой мере. Полученные значения с двух каналов определяют абсолютное значение положения преобразователя относительно рабочей меры с высокой точностью.



**Рисунок 1.**

**Структурная схема преобразователя линейных перемещений субмикронной точности на основе штриховой меры**

На основе предложенной структурной схемы был разработан и реализован опытный образец преобразователя (рисунок 2). Преобразователь основан на рабочей мере, содержащей магнитную шкалу и штриховую меру и установленную на движущейся части управляемого объекта.



**Рисунок 2.**

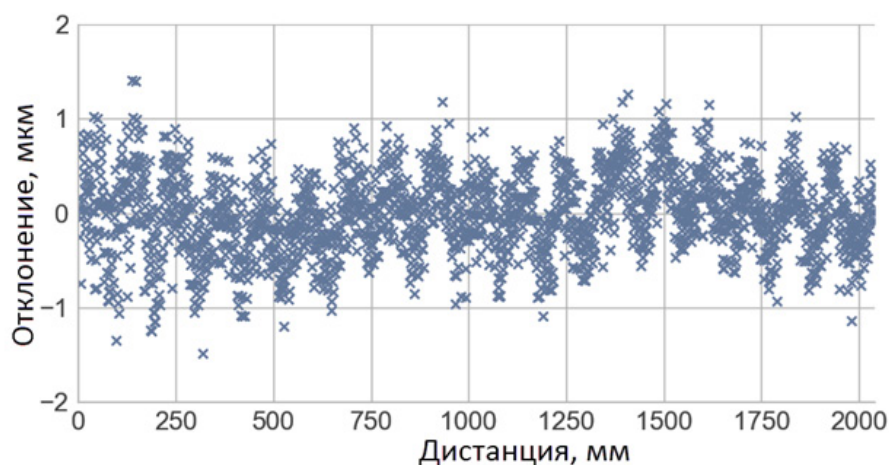
**Конструкция преобразователя линейных перемещений субмикронной точности на основе штриховой меры**

Для канала грубого отсчета используется магнитный датчик GIVIMISURE AGM с погрешностью до 50 мкм, который встроен в конструкцию преобразователя и обеспечивает абсолютную нумерацию штрихов. Магнитная шкала фиксируется на поверхности штриховой меры.

Канал точного отсчета состоит из лазерного диода с длиной волны излучения 655 нм и мощностью 10 мВт. Лазерное излучение, проходя через светоделительный кубик, проецируется на поверхности штриховой меры. Отраженное излучение проходит обратно через светоделительный кубик и объектив с фокусным расстоянием 20 мм строит изображение на поверхности матричного приемника излучения. Зеркало, введенное в оптическую схему системы, ломает оптическую ось с целью уменьшения габаритных размеров преобразователя. Матричный приемник излучения выполнен на базе цифровой камеры IMPERX ICL-B1921 с ПЗС приемником 1952x1112 пикс, 5,5x5,5 мкм размера пикселя. Обработка информации осуществляется на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) Cyclone IV EP4CE22, что позволяет добиться высокой скорости обработки (меньше 9,6 мс на измерение) [7].

### ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА

С целью проверки соответствия основных технических характеристик разработанного опытного образца и определения его точностных характеристик на метрологически аттестованном термостабилизированном испытательном стенде были проведены испытания преобразователя. Контроль перемещения осуществлялся интерферометром Renishaw LX» 80. Результаты испытаний приведены на графике рисунка 3.



*Рисунок 3.*

*График погрешности определения положения преобразователя относительно рабочей меры*

Результаты, полученные на основе статистической обработки экспериментальных данных, показали, что погрешность разработанного преобразователя не превышает 1,5 мкм. Дополнительная погрешность возникает вследствие неточного монтажа преобразователя относительно рабочей меры. Для оптимальной работы с заданной погрешностью необходимо обеспечить зазор между преобразователем и рабочей мерой с точностью 0,1 мм по всей длине. Изменение зазора приводит к дефокусировке получаемого изображения, что добавляет ошибку в результат измерения.

Основные технические характеристики разработанного опытного образца преобразователя линейных перемещений субмикронной точности представлены в таблице 1.

**Таблица 1. Основные технические характеристики опытного образца преобразователя**

Параметр	Значение
Дистанция перемещения	свыше 2 м
Минимальное разрешение	0,05 мкм
Погрешность (3 $\sigma$ )	1,5 мкм
Макс. скорость перемещения	свыше 3 м/с
Время измерения	9.6 мс

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.**

Проведенные исследования параметров и характеристик опытного образца преобразователя, показали, что преобразователь обладает малой зависимостью показаний измерений от изменения температуры окружающей среды и питающего напряжения. Также в ходе исследований было установлено, что после включения преобразователя и его работы в течение 40 минут показания перестают изменяться с течением времени, что связано со стабилизацией внутренней температуры. Чтобы уменьшить и устранить погрешность обусловленную дефокусировкой изображения, планируется увеличить мощность лазерного модуля и уменьшить апертуру объектива. Это увеличит глубину резко изображенного пространства и позволит увеличить допуски на зазоры между преобразователем и рабочей мерой.

#### *Список литературы:*

1. Минаев М. М., Бугрова С. М. Проблемы и основные направления развития машиностроения в России //Иновационная наука. – 2016. – №. 4-3
2. Сальников В. А., Галимов Д. И. Конкурентоспособность отраслей российской промышленности текущее состояние и перспективы //Проблемы прогнозирования. – 2006. – №. 2
3. Городецкий А.Е., Тарасова И.Л., Артеменко Ю.Н. Интерференционно-кодовые преобразования. — СПб.: Наука, 2005. - 472 с.
4. Обзорный каталог фирмы Heidenhain, Сентябрь 2015
5. Обзорный каталог “Non-contact position encoders” фирмы Renishaw. Июль, 2016
6. ГОСТ 12069-90 «Меры длины штриховые брусковые. ТУ» / М.: Госкомитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам
7. Lashmanov O.U., Anisimov A., Pantyushin A., Vasilev A., Timofeev A., и др. Absolute scale-based imaging position encoder with submicron accuracy//Proceedings of SPIE, IET - 2013, Vol. 8788, pp. 87882Г

# ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В АВИАЦИОННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ

МАЛЫГИН М.С., ШЛЫЧКОВ В.И.

АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод»  
имени Э.С. Яламова», г. Екатеринбург

E-mail: mihail.malygin@gmail.com

Увеличение дальностей распознавания и обнаружения в авиационных оптико-электронных системах требует уменьшения размеров полей зрения телевизионных и тепловизионных каналов до долей градуса и применения ПЗС-матриц с большим количеством пикселей.

Однако, применение длиннофокусных объективов с узкими полями зрения, ограничивают дефокусировка изображения, вызванная изменением окружающей температуры от минус 60°С до + 60° С, широкополосной и синусоидальной случайными вибрациями. Устранение дефокусировки изображений требует ввода в состав приемного объектива подфокусирующих элементов. Следует отметить, что в отличие от широко используемой в фото и видеоаппаратуре опции автофокусировки, когда объект съемки находится на расстоянии от единиц до десятков метров, в данном случае ставится задача обеспечить максимальное разрешение при работе с объектами, находящимися на расстоянии от сотен метров до нескольких километров. Рассмотрим некоторые экспериментально проверенные способы автофокусировки изображений.

Автоматическая фокусировка с использованием термокомпенсаторов

Наиболее простым способом автофокусировки, в частности, при отсутствии необходимости перефокусировки от объектов, расположенных на расстоянии в несколько километров к объектам расположенным на расстоянии сотни метров и для упрощения устройства можно использовать возможности линейного расширения материалов. Материал и пластина из него должна быть выбрана таким образом, чтобы обеспечить расчетное перемещение объектива относительно ПЗС-матрицы с учетом глубины резкости изображения. Зависимость изменения длины материала от температуры выражается соотношением

$$\Delta = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

где:  $\Delta$  - расчетное перемещение объектива, мм;  $\Delta T$  - диапазон изменения температуры, °С;  $L$  - длина пластины, мм;  $\alpha$  - коэффициент линейного расширения материала, 1/°С.

При разработке конструкции были рассмотрены несколько материалов: титан (ВТ1-0), алюминий (АМГ6), резина (ИРП1226), полиамид (ПА6). Проведенные расчеты [1] показали наиболее целесообразным выбор полиамида. Были изготовлены пластины из полиамида и разработана конструкция с их использованием в телевизионном блоке.

Схематично конструкция устройства с автофокусировкой на термокомпенсаторе содержит пластину, один конец которой жестко закреплен на корпусе ТВ камеры, а на другом закреплен объектив ТВ камеры.

Для подтверждения работоспособности конструкция ТВ блока с механическим компенсатором проверялся в диапазоне температур от минус 60° до +60°.

При каждом значении температуры ТВ блок выдерживался не менее 3-х часов, после чего проводились проверки разрешения изображения (в телевизионных линиях, ТВЛ) по телевизионной тест-таблице 0249 (ТИТ) и измерение коэффициента модуляции видеосигнала (это отношение амплитуды видеосигнала на отметке в ТИТ с разрешением 500 твл, 600 твл к амплитуде черно-белого перепада в видеосигнале).

По результатам испытаний коэффициент модуляции на отметках 500-600 тел.лин. составил 30-40%, а разрешение 500-550 тел. лин. во всем диапазоне температур от минус 60° до +60°.

#### АВТОМАТИЧЕСКАЯ ФОКУСИРОВКА НА «БЕСКОНЕЧНОСТЬ»

Этот способ автофокусировки обеспечивает предварительная калибровка ТВ камеры по температуре [2]. Технологическая операции фокусировки на «бесконечность» включает предварительную ручную установку (калибровку) подфокусирующего элемента объектива. Это положение  $X[n]$  при котором обеспечивается максимальное разрешение для окружающей температуры  $T$  в диапазоне от минус 60° до +60° с шагом  $\Delta T=5^\circ$ ,  $T= T[n]$  по телевизионной испытательной таблице (ТИТ) на технологическом коллиматоре.

В результате калибровки формируется и запоминается массив значений в запоминающем устройстве  $T[n]$  - калибровочных точек по температуре и соответствующих  $U[n]$  напряжений от потенциометрического датчика, при которых обеспечивается максимальное разрешение.

При включении ТВ блока алгоритм автоматической фокусировки на бесконечность позволяет установить привод фокусирующего элемента в объективе ТВ блока в положение соответствующее наибольшему разрешению, практически мгновенно.

Экспериментальные исследования показали необходимость использования алгоритма фокусировки на бесконечность при полях зрения не превышающих 3°.

Автоматическая фокусировка с использованием «коэффициента резкости»

Для количественной оценки расфокусировки принятого оптического изображения введен [3] коэффициент резкости  $K_R$  изображения, который рассчитывается в соответствие с соотношением:

$$K_R = \frac{\sum_{HF} F_{p,q}}{\sum_{LF} F_{p,q}} \quad (2)$$

$$\sum_{LF} F_{p,q} = \sum_{p=\frac{N}{2}-1+\frac{M}{2}}^{\frac{N}{2}-1+\frac{M}{2}} \sum_{q=\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} |F_{p,q}| \quad (3)$$

$$\sum_{HF} F_{p,q} = \sum_{p=0}^{N-1} \sum_{q=0}^{N-1} |F_{p,q}| - \sum_{p=\frac{N}{2}-1+\frac{M}{2}}^{\frac{N}{2}-1+\frac{M}{2}} \sum_{q=\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} |F_{p,q}| \quad (4)$$

где: формула (3)- сумма коэффициентов Фурье для области низких частот (LF),

формула (3)- сумма коэффициентов Фурье для области высоких частот (HF),

$p$  – номер строки в анализируемом спектре изображения, в плоскости пространственных частот, соответствует координате  $x$ ,

$q$  – номер столбца в анализируемом спектре изображения, в плоскости пространственных частот, соответствует координате  $y$ ,

$N$  – число отсчетов в анализируемом спектре изображения в плоскости пространственных частот по координатам  $p, q$ ,

$M$  – число отсчетов в спектре изображения в плоскости пространственных частот по координатам  $(p, q)$  для выбранной области LF,

$F(p, q)$  – значение коэффициента Фурье при  $0 < p, q < N$ .

Расчет  $K_R$  в соответствие (1) проводился для  $N=128$  и  $M=2$ . Динамика изменения коэффициента резкости  $K_R$  анализировалась для трёх классов фонов, часто встречающихся на практике: линия горизонта, однородные поверхности с постоянным коэффициентом отражения (поля), искусственные объекты (строения).

В качестве примера на рис. 1 представлена функциональная схема устройства автофокусировки, где схематически показаны: ПФ – подвижный оптический элемент для подфокусировки кинематически связанный с исполнительным двигателем,  $2\delta$  – глубина резкости,  $R_{oc-пф}$  – сопротивление обратной связи, УМ – усилитель мощности.

При работе [4] по команде «автофокусировка» изменяется положение оптического элемента в приводе ПФ с шагом  $\Delta\delta$  в диапазоне соответствующем глубине резкости изображения –  $2\delta$  и для каждого шага рассчитывается коэффициент резкости изображения  $K_R$ . После сканирования всего диапазона  $2\delta$  привод устанавливается в положение с наибольшим  $K_R$ .

Дальнейшие экспериментальные исследования показали неустойчивую работу устройств автофокусировки ТВ и ТПВ каналов авиационных ОЭС при работе по объектам, расположенным на однородных фонах. Для повышения высокочастотных составляющих в пространственно-частотного спектрах однородных фонов оцифрованное входное оптическое изображение контрастируется и дифференцируется.

Экспериментальные исследования показали усредненное время автофокусировки (2-3) сек.

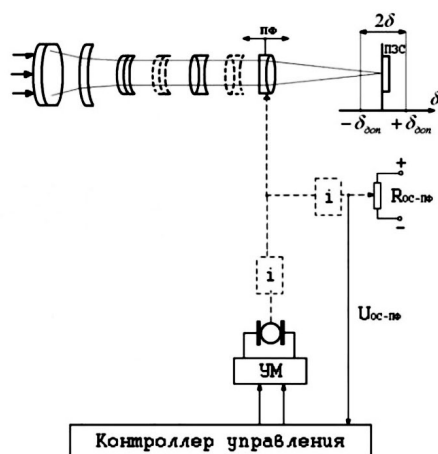


Рисунок 1.

### Устройство автоматической фокусировки

#### АВТОМАТИЧЕСКАЯ ФОКУСИРОВКА НА «БЕСКОНЕЧНОСТЬ» С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ВЫЧИСЛЕНИЕМ «КОЭФФИЦИЕНТА РЕЗКОСТИ»

Следует отметить, что предварительная калибровка позволяет установить привод фокусирующего элемента в объективе ТВ блока в положение соответствующее наибольшему разрешению при включении ТВ блока, практически мгновенно. При дальнейшей работе уточнение положения привода фокусировки проводится относительно выбранной контроллером точки калибровки [3]. Величина смещений  $\Delta$  существенно меньше глубины резкости изображения  $\pm \delta$  объектива ТВ блока и не может ухудшить разрешение и, следовательно, не затрудняет работу оператора. При оптимизации положения фокусирующего элемента измеряется коэффициент

резкости  $K_p$  текущего изображения и выбирается изображение с наибольшим коэффициентом  $K_{pi}$  у которого количество высокочастотных составляющих максимально, что повышает вероятность обнаружения и распознавания небольших по размеру объектов и способствует увеличению дальностей обнаружения и распознавания.

*Список литературы:*

1. Долматов С.В., Шлычков В.И. Исследование эффективности способов коррекции дефокусировки изображений. Итоги диссертационных исследований. Том 4, с.133-138, М. 2013 г.
2. Устройство автоматической коррекции резкости изображений: Патент РФ № 167844 РФ / Кошелев А.В., Шлычков В.И., Маркушин Г.Н., Артюхин Д.Е. Оpubл. БИ №1 от 10.01.2017 г.
3. Шлычков В.И. Анализ резкости изображения //ТСС сер. Техника телевидения .- 2011- Вып.1.- с.91-97
4. Устройство автоматической фокусировки. Патент РФ № 73577 / Шлычков В.И., Макаров К.В. Оpubл. БИ №14 от 20.05.2008 г.



# ЛАЗЕРНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ ПОДСВЕТКИ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

БОГАТОВА Г.А., \*ГРЕЧУХИН И.А., \*ГРИШИН Е.А., \*ИВЛЕВ А.О., КОВАЛЬ Ю.И.,  
МИТИН К.В., \*НОВИКОВА О.Ю., ПРИЛЕПСКИЙ Б.В., ПИТИК С.Д.,  
\*ПОЛУНАДЕЖДИН В.В., ПОЛЬСКИХ С.Д.

**\*АО «Научно-производственная корпорация  
«Системы прецизионного приборостроения» г. Москва,  
АО «Швабе – Исследования», г. Москва**

**E-mail: kmitin67@ mail.ru**

Разрабатывается оптико-лазерный комплекс (ОЛК) для подсвечивания мощным лазерным излучением космических объектов (КО) и регистрации их детальных изображений, в том числе изображений космического мусора.

ОЛК состоит из телескопа регистрации изображений и телескопа наведения лазерного излучения.

Одним из элементов ОЛК является лазерный излучатель (ЛИ). Он предназначен для формирования лазерной диаграммы для подсвета КО. Излучение, отраженное от подсвеченных объектов, собирается телескопом формирования изображений и регистрируется адаптивной оптической системой и спекл-интерферометром ИК-диапазона. ЛИ располагается на среднике телескопа системы наведения.

В ЛИ применены промышленные иттербиевые волоконные лазеры, работающие в непрерывном или импульсно-периодическом режиме.

Источник лазерного излучения состоит из трех излучающих каналов, это позволяет ослабить тепловое воздействие лазерного излучения на оптический тракт каждого канала. Кроме того, трехканальная схема позволяет уменьшить флуктуации освещенности на наблюдаемом КО за счет усреднения флуктуаций интенсивности отдельных лазерных пучков при прохождении турбулентной атмосферы.

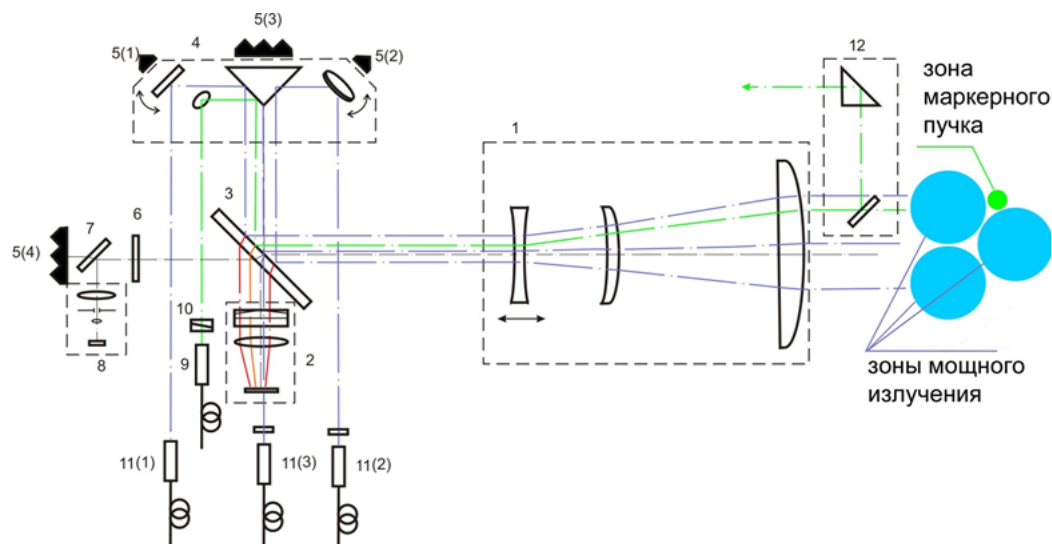
ЛИ обладает следующими характеристиками:

- длина волны 1,07 мкм;
- мощность излучения не менее 12 кВт;
- расходимость диаграммы излучения не более 30 угл. сек.;
- диаметр выходной апертуры не более 320 мм;
- масса оптико-механического блока не более 130 кг.

Лазерный излучатель включает в себя следующие составные части:

- волоконные иттербиевые лазеры с чиллерами и коллимирующими устройствами;
- оптико-механический блок (ОМБ);
- маркерный лазер (МЛ);
- систему переноса направления излучения (СПНИ);
- систему управления (СУ);
- устройство питания (УП);
- систему охлаждения (СО);
- систему подачи воздуха (СПВ).

Основная функция оптико-механического блока – формирование заданной диаграммы лазерного излучения. На рис. 1 показана схема ОМБ и СПНИ.



**Рисунок 1.**

**Схема оптико-механического блока и системы переноса направления излучения:**  
**1 - устройство телескопическое, 2 - устройство контрольно - юстировочное, 3 - спектроделитель, 4 - устройство формирования диаграммы с управляемыми зеркалами, 5 - поглотители лазерного излучения, 6 - оптическое окно, 7-8 - канал контроля, 9 - маркерный лазер с коллиматором, 10 - клиновидный компенсатор, 11 - коллиматор, 12 - СПНИ**

Излучение маркерного лазера задает направление распространения мощного рабочего излучения для системы наведения. Маркерный лазер формирует три соосных пучка с тремя различными длинами волн. В оптико-механический блок излучения вводятся через одномодовый волоконный кабель.

Маркерный пучок с длиной волны 660 нм направляется в контрольно-юстировочное устройство. В этом устройстве вместе с маркерным излучением распространяются пилотные пучки (660 нм), соосные пучкам мощного рабочего лазерного излучения (1,07 мкм). Лазерные пучки регистрируются телевизионной камерой из состава контрольно-юстировочного устройства. Координатная информация с камеры поступает на рабочую станцию, которая вычисляет ошибки смещения пучков мощного лазерного излучения и выдает управляющие сигналы на пьезопривода зеркал устройства формирования диаграммы. Таким образом, обеспечивается параллельность осей пучков мощного лазерного и маркерного излучения. Решения, использованные в конструкции ЛИ, позволяют поддерживать параллельность пучков с СКО не более 1,5 угл. сек. Смещение пучков мощного лазерного излучения вызывается неоднородным нагревом и изгибом элементов конструкции ОМБ в процессе сеанса работы ЛИ. Суммарная ошибка, которую компенсирует система, составляет  $\pm 10$  угл. мин.

Маркерный пучок с длиной волны 975 нм выходит из объектива телескопического устройства ОМБ ЛИ и при помощи системы переноса направления излучения направляется в телескоп системы наведения. Телевизионная камера телескопа регистрирует отметку от КО и маркерного пучка. Рабочая станция системы наведения определяет ошибку точного наведения (рассогласование между направлением на КО и направлением излучения маркерного лазера) и при необходимости выдает команду в систему управления ЛИ, которая, в свою очередь, выдает сигналы управления на пьезопривода. Таким образом реализуется возможность точного наведения на КО.

Излучение маркерного лазера с длиной волны 1,06 мкм используется для настройки ОМБ ЛИ с помощью внешних устройств.

Для решения задачи союстировки передающего канала ЛИ и приемного канала телескопа системы наведения комплекса используются дополнительные камеры. Камеры могут устанавливаться либо на корпусе ОМБ, либо за оптическим окном на оси телескопического устройства ОМБ. Союстировка осуществляется по звезде (полярной звезде).

Для поддержания заданного температурного режима работы коллиматоров мощных волоконных лазеров используется система охлаждения. Гидравлический контур системы охлаждения используется для отвода тепла, выделяющегося в результате поглощения рассеянного лазерного излучения на поглотителях внутри ОМБ.

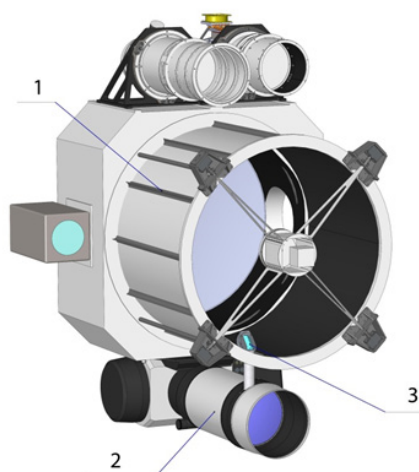
Система подачи сухого обеспыленного воздуха обеспечивает защиту поверхности оптических элементов ОМБ от атмосферной влаги и пыли.

В ходе разработки ЛИ было проведено исследование термооптических искажений в оптических элементах, возникающих под действием мощного лазерного излучения. Оценки и результаты экспериментов показали, что при плотности мощности до 1,5 кВт/см<sup>2</sup> влиянием термооптических искажений можно пренебречь, если использовать для проходных оптических элементов кварцевое стекло с коэффициентом поглощения не более 10<sup>-6</sup> см<sup>-1</sup>, для зеркал - не более 10<sup>-4</sup> см<sup>-1</sup>.

В настоящее время разработана конструкция ЛИ, ведется изготовление опытного образца. На рис. 2 и 3 представлена модель ОМБ с навесным оборудованием и взаимное расположение ОМБ и телескопа системы наведения комплекса.



**Рисунок 2.**  
**Оптико-механический блок с навесным оборудованием**



**Рисунок 3.**  
**Расположение оптико-механического блока на телескопе системы наведения:**  
**1 – телескоп, 2 – ОМБ, 3 - СПНИ**

В конструкции заложен потенциал для дальнейшей модернизации. В частности при дальнейшем изготовлении образцов ЛИ могут быть использованы мощные волоконные лазеры с длиной волны 1,055 мкм, которая не попадает в полосу поглощения паров воды. Имеется возможность использовать лазеры с большей мощностью излучения, в том числе одномодовые.

# КОМПАКТНЫЕ ВАРИООБЪЕКТИВЫ БОЛЬШОЙ КРАТНОСТИ ДЛЯ ОБЗОРНО-ПОИСКОВЫХ И ПРИЦЕЛЬНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

ПИСКУНОВ Д.Е., ПАВЛОВ В.Ю., ХОРОХОРОВ А.М., ШИРАНКОВ А.Ф.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: ashirankov@mail.ru

Вариообъективы обзорно-поисковых авиационных систем предназначены для наблюдения пространства в разных спектральных диапазонах и должны предъявить оператору интересующий участок пространства с требуемой детализацией для поиска и опознавания целей. Такие вариообъективы должны быть компактными, максимально лёгкими и иметь большую кратность изменения фокусного расстояния (оптическое увеличение). Они могут использоваться для поиска и сопровождения обнаруженных объектов в автоматическом режиме (в т.ч. путём комплексирования изображения разных спектральных каналов). Для выполнения своих задач в составе обзорно-поисковых авиационных систем вариообъективы должны иметь рациональную схмотехнику, которая обеспечивает компактность, малые габариты и небольшие перемещения компонентов вариообъектива. Важнейшим элементом вариообъектива является фотоприёмное устройство (параметры: размер и число пикселей, чувствительность, рабочий спектральный диапазон). Параметры фотоприёмного устройства в значительной мере определяют продольные и поперечные габариты, а также необходимую светосилу вариообъектива.

В качестве иллюстрации к требованиям вариообъективов в таблице 1 указаны типовые значения основных характеристик каналов вертолётных оптико-электронных обзорно-поисковых систем.

**Таблица 1. Типовые значения основных характеристик каналов вертолётных оптико-электронных обзорно-поисковых систем**

№	Характеристика	Канал		
		ТВ	ТПВ-К	ТПВ-С (ТПВ-Д)
1	Рабочий спектральный диапазон, мкм	0,40...0,90/0,40...1,1	0,9...1,7 (1,9)	3...5 (8...12)
2	ФПУ: число пикселей размер пикселя, мкм	более 1920×1080 менее 5,0	~ 1280×1024 менее 7,5	~ 1280×1024 менее 15
3	Дальность обнаружения/ распознавания «танк», км:	12/10	10/8	–
4	Поля зрения: узкое ... широкое	2,5° ... 30° ±10%	2,0°(1,0°) ... 20°	2,0°(1,0°) ... 20°
5	Оптическое/Электронное увелич., крат	~ 16 / до 4	~ 12...18 / до 4	~ 8...15 / до 4
6	Габариты: длина / диаметр, мм	менее 120 / 65	менее 130 / 60	менее 120 / 55
7	Макс. ошибка ухода опт. оси, угл. сек.	не более 5 ... 7	не более 6 ... 8	не более 7 ... 9
8	Масса, кг	Менее 25 кг	Менее 30 кг	Менее 30 кг
9	Диапазон углов ЛВ: - по азимуту - по углу места	± (n × 360)° – 120 ... + 20°	± (n × 360)° – 120 ... + 20°	± (n × 360)° – 120 ... + 20°
10	Угловая скорость ЛВ: - максимальная/минимальная	не менее 60°/с не более 0,05°/с	не менее 60°/с не более 0,05°/с	не менее 60°/с не более 0,05°/с
11	Состояние разработки	Вариообъектив подготовлен к изготовлению	Вариообъектив подготовлен к изготовлению	Проведен расчёт оптической схемы вариообъектива

ТВ – канал телевизионный видимого диапазона;  
 ТПВ-К – канал тепловизионный коротковолнового ИК - диапазона;  
 ТПВ-С – канал тепловизионный среднего ИК – диапазона;  
 ТПВ-Д – канал тепловизионный дальнего ИК – диапазона.

Из таблицы 1 ясно, что к вариообъективам обзорно-поисковых систем предъявляются жёсткие требования по габаритам, весу и качеству изображения.

Разработки вариообъективов для авиационных обзорно-поисковых систем, выполненных коллективом научной школы «Разработка вариосистем» МГТУ им. Н.Э. Баумана полностью удовлетворяют указанным требованиям. Эта школа создана в 1955 году заслуженным деятелем науки и техники РФ, профессором Иван Ивановичем Пахомовым и успешно работает много лет. В 1976 году Пахомовым И.И. написана первая в нашей стране монография «Панкратические системы» [1]. Крайне важным для практического использования вариосистем явилось то, что уже в [1] детально изложены методы расчета влияния отклонений параметров панкратических систем и расчёта допусков на оптическую схему вариосистем.

В последующие годы теоретическая база научной разработки вариосистем была значительно развита [2-14].

Главные отличительные черты школы:

- строго научный и системный подход при разработке схмотехники вариообъектива;
- использование, разработка и постоянное обновление современных математических моделей и численных методов для синтеза вариообъективов;
- быстрота и полнота разработки вариосистем, включая РКД, разработку ПО вариообъектива;
- изготовление и испытания макетов и опытных образцов (кроме лётных испытаний).

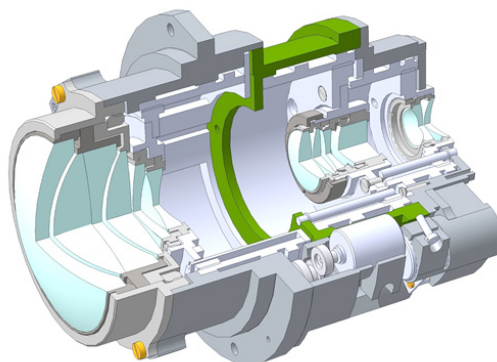
К важнейшим преимуществам школы можно отнести:

- выигрыш по длине системы от 20 % до 40 %;
- обеспечение требуемого качества изображения для большого числа вариопозиций;
- наличие термокомпенсации;
- выигрыш по разрешению от 15 % до 30 %;
- перебалансировка допусков при производстве оптики на конкретном предприятии;
- согласованные протоколы, интерфейсы и управление режимами работы вариообъектива, интегрированное в программное обеспечение всей обзорно-поисковой системы.

Это позволило получить значительные дополнительные преимущества по сравнению с другими разработчиками вариообъективов.

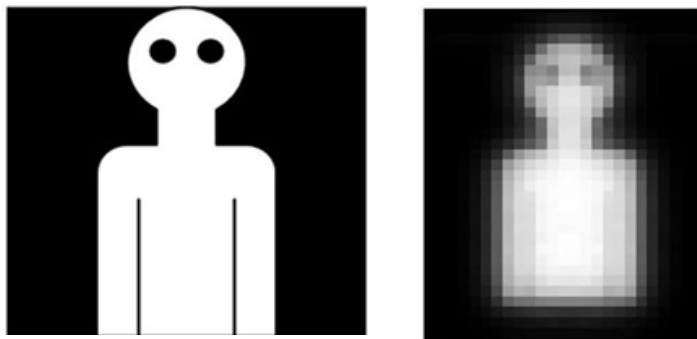
Ниже приведены несколько примеров разработки вариосистем различного назначения.

На рис. 1 приведена 3D модель конструкции (оптики и механики) и структура оптической схемы компактного вариообъектива, работающего в сверхшироком диапазоне ИК области спектра (0,9...1,7 мкм) и обеспечивающего высокое угловое разрешение и большую кратность изменения фокусного расстояния объектива. Подвижными являются 2, 3 и 4 группы оптической системы. Компенсация термооптических aberrаций в широком диапазоне температур ( $\Delta t=100^\circ\text{C}$ ) в разработанном вариообъективе осуществляется перемещением 4 компонента.



**Рисунок 1.**  
**3D модель конструкции (оптики и механики) и структура**  
**оптической схемы компактного вариообъектива**

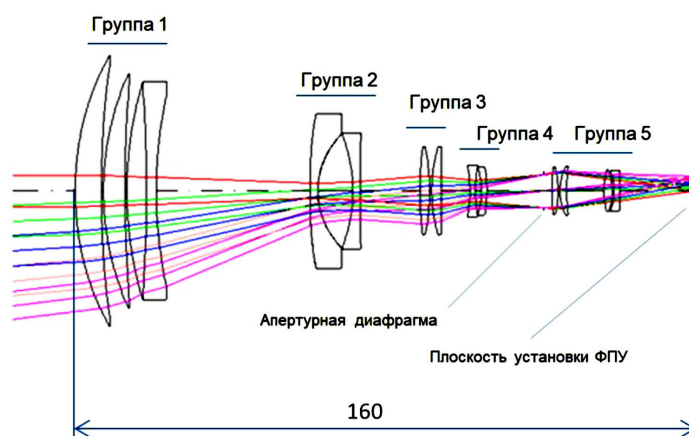
Для дополнительной проверки качества разработанного вариообъектива проведено численное моделирование с расчётом изображения протяженного тестового объекта с деталями, угловой размер которых соответствует требуемой величине углового разрешения. На рисунке 2 представлены результаты моделирования качества разработанного вариообъектива по изображению протяженного объекта: на рисунке 2а представлен тестовый объект, а на рисунке 2б – его изображение вариообъективом при размере пикселя 12 мкм. Результаты такой проверки подтверждают высокое угловое разрешение и качество ИК вариообъектива.



**Рисунок 2.**

**Результаты моделирования качества вариообъектива по изображению протяженного объекта: а – тестовый объект; б – изображение тестового объекта на детекторе для телепозиции (пиксель 12 мкм)**

На рис. 3 представлена оптическая схема компактного вариообъектива видимого диапазона спектра с тридцатикратным перепадом фокусных расстояний. Подвижными являются 2, 3, 4 и 5 группы оптической системы. Длина вариообъектива от первой поверхности по приёмника – 160 мм, вес – не более 250 г. При этом падение освещённости по полю не превышает 20% в широкоугольной позиции, а на большей части диапазона фокусных расстояний – менее 5%; а дисторсии не превышает 3,5%. Объектив при 30× перепаде фокусных расстояний обеспечивает высокое качество изображение в 6-ти вариопозициях.



**Рисунок 3.**

**Оптическая схема компактного вариообъектива видимого диапазона спектра с тридцатикратным перепадом фокусных расстояний**

Работа научной школы «Разработка вариосистем МГТУ им. Н.Э. Баумана» базируется на разработке и применении различных математических моделей работы вариосистем и методик их проектирования, начиная с габаритного синтеза (с определением наилучшей структурной схе-

мы вариосистемы), абберационного синтеза и заканчивая автоматизированным расчётом допусков на оптическую систему, включая их перебалансировку при учёте технологических возможностей конкретного изготовителя.

Процесс разработок отличается комплексностью: создается не только рабочая конструкторская документация на оптику, механику и электронный контроллер с интерфейсом управления вариосистемой и изготавливается образец, но и программа и методика его контроля и испытаний. Разработанные вариосистемы имеют практически предельные или близкие к ним параметры и характеристики

#### *Список литературы:*

1. *Пахомов И.И.* Панкратические системы. М.: Машиностроение, 1976. 160 с.
2. *Пахомов И.И., Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф.* Автоматизированный габаритный расчет вариообъективов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2010. № 3(80). С. 26-41.
3. *Пахомов И.И., Пискунов Д.Е., Фролов М.Е., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф.* Автоматизированный габаритный расчёт вариообъективов // Прикладная оптика-2010: Сборник трудов IX Международной конференции. СПб., 2010. Т. 2, часть II. С. 316-320.
4. *Ширанков А.Ф., Вереникина Н.М., Рожков О.В.* Трёхкратный вариообъектив для сверхкомпактной пятимегапиксельной фотокамеры. Труды VII Международной конференции “Прикладная оптика”, С.Петербург, 2006, т. 1, с.293-296.
5. *Пахомов И.И., Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М.* Применение методики автоматизированного габаритного и абберационного синтеза к расчёту четырёхкратного вариообъектива // Прикладная оптика: Сборник трудов X международной конференции. СПб., 2012. Т. 1. С. 62-66.
6. *Пискунов Д.Е., Попов М.В., Хорохоров А.М.* Абберационный синтез широкоугольного светосильного проекционного объектива видеопроектора // Прикладная оптика: Сборник трудов X международной конференции. СПб., 2012. Т. 3. С. 35-39.
7. Проекционная оптическая система: Патент № 2510067 РФ заявл. 07.06.2012 / Д.Е. Пискунов // Изобретения. Полезные модели. – 2014. – № 8.
8. *Пахомов И.И., Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М.* Численный метод расчёта систем переменного увеличения с произвольным числом подвижных компонентов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2012. Спец. вып. № 8 – Современные проблемы оптотехники. С. 25-35.
9. *Пахомов И.И., Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М.* Расчёт систем переменного увеличения с произвольным количеством подвижных групп // Прикладная оптика: Сборник трудов X международной конференции. СПб., 2012. Т. 1. С. 57-61.
10. *Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф.* Современные методы расчёта вариообъективов. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/927.html>.
11. *Пискунов Д.Е.* «Методика синтеза высококачественных вариообъективов с произвольным числом подвижных компонентов». Диссертация на соискание звания к.т.н.– М., 2013.
12. *Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф.* Методика автоматизированного синтеза вариообъективов в области аббераций третьего и пятого порядков // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2012. Спец. вып. №8 – Современные проблемы оптотехники. С. 36–52.
13. *Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М.* Аналитико-оптимизационный метод абберационного синтеза оптических систем // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 7. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/442505.html> (дата обращения 27.01.2013).
14. *Пискунов Д.Е., Хорохоров А.М.* Метод расчёта оптических систем, состоящих из произвольного количества компонентов // Естественные и технические науки. 2012. №4. С. 236-240.

# ЛАЗЕРНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ПРОВЕТРИВАНИЯ ШАХТ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

АЛЕХНОВИЧ В.И., ШИРАНКОВ А.Ф.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: vial@bmstu.ru

При разработке полезных ископаемых открытым способом происходит разрушение целостности поверхностного слоя грунта, что приводит к выделению подземных газов, загрязняющих атмосферу. Причем, если разработка осуществляется на большой глубине, то прогрев глубоких слоев газа осуществляется слабо, что приводит к созданию инверсного распределения температуры вдоль столба газа и нарушению естественной вентиляции газа.

Возникают две задачи:

- контроль допустимого уровня концентрации вредных газов;
- проветривание объема шахт открытой разработки.

Для контроля концентрации газов известно много методов лазерного мониторинга газовых смесей. Мы предлагаем один из них – абсорбционный метод, измеряющий поглощение в газах на пути длиной  $l$ .

Этот метод реализуется с помощью следующего устройства.

Излучение зондирующего лазера с перестраиваемой длиной волны проходит горизонтально через газовый слой и происходит поглощение излучения на разных длинах волн в соответствии со спектром поглощения газовой смеси по формуле  $\Delta J_\lambda = \alpha_\lambda J_o l$ , где

$\Delta J_\lambda$  - поглощенная мощность;

$J_o$  - исходная мощность лазера;

$\alpha_\lambda$  - коэффициент поглощения газа на длине волны  $\lambda$ ;

$l$  - длина пути поглощения;

Чувствительность метода увеличивается с длиной пути поглощения  $l$ . Например, при алмазных разработках в Якутии на прииске Удачный  $l=2000$  м. Проблема проветривания шахты решается с помощью движения лазерного пучка по кругу. При этом необходимо создать шесть или восемь лазерных пучков (рис. 1), вращающихся в разных направлениях.

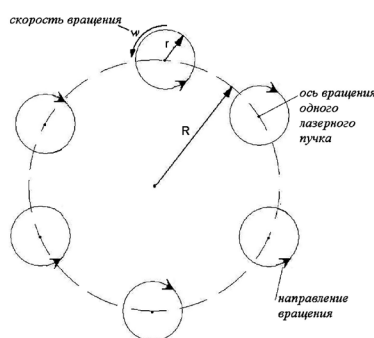


Рисунок 1.

## Траектория движения шести лазерных пучков

Каждый лазерный пучок вдоль пути своего распространения создает так называемый тепловой шнур. Движение такого теплового шнура локально возмущает газовую среду. Взаимодействие возмущенных областей создает вихрь по большому кругу, охватывающему шесть областей. Благодаря инверсному градиенту температуры возникающий вихрь проветривает шахту. Например, прииск Удачный можно проветрить за несколько часов.



# **МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ДЛЯ КОНТРОЛЯ АТМОСФЕРЫ И ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УФ ОБЛАСТИ СПЕКТРА НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 0,355 мкм**

**ГОРОДНИЧЕВ В.А., ИВАНОВ С.Е., ФЕДОТОВ Ю.В., БЕЛОВ М.Л.,  
ФИЛИМОНОВ П.А., КУВШИНОВ А.В., КРАВЦОВ Д.А., ЧЕРПАКОВА А.А.**

**Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва**

**E-mail:** ivanov\_sergey2@mail.ru; ekomonit@bmstu.ru

На сегодняшний день актуальной задачей является оперативный контроль атмосферы, водных акваторий и природных образований.

Среди методов контроля природной среды одними из наиболее перспективных являются методы лазерного дистанционного зондирования. Они обеспечивают оперативность, высокую угловую разрешающую способность и работу в любое время суток в широком диапазоне атмосферных условий.

На сегодняшний день большинство лазерных комплексов дистанционного зондирования работает в видимом или ближнем инфракрасном спектральных диапазонах. Однако, для мониторинга состояния атмосферы с точки зрения безопасности для глаз интерес представляет и ультрафиолетовый (УФ) спектральный диапазон.

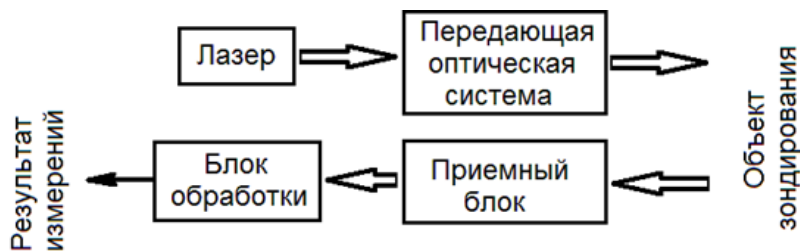
Функционирование лазерных систем зондирования всегда связано с опасностью для зрения. Наиболее вредное воздействие излучение лазера оказывает на сетчатку глаза человека. Спектральный диапазон длин волн лазерного излучения, оказывающего вредное воздействие на сетчатку глаза, составляет от 0,38 до 1,4 мкм. Излучение лазеров с длинами волн свыше 1,4 мкм или менее 0,38 мкм поглощается на передние среды глаза человека и является менее опасным, чем излучение лазеров с длинами волн 0,38 – 1,4 мкм.

Однако, для ряда задач (например, лазерного флуоресцентного контроля нефтяных загрязнений или состояния растительности) спектральный диапазон свыше 1,4 мкм не может быть использован.

Поэтому перспективным вариантом для многофункционального лазерного комплекса для оперативного контроля природной среды (при использовании безопасного для зрения лазерного излучения) является спектральный диапазон менее 0,38 мкм. В пределах этого спектрального диапазона наибольший интерес для разработки бортовой аппаратуры для дистанционного зондирования представляет третья гармоника лазера на иттрий алюминиевом гранате, активированном ионами неодима, с длиной волны излучения 0,355 мкм.

Многофункциональный лазерный измеритель для контроля природной среды в УФ области спектра на длине волны 0,355 мкм может использоваться для следующих задач: контроль видимости в атмосфере, контроль характеристик аэрозольных атмосферных неоднородностей, контроль скорости переноса аэрозольных атмосферных неоднородностей, мониторинг нефтяных загрязнений на водной и земной поверхности; контроль состояния растительности.

Функциональная схема измерителя (рисунок 1) содержит четыре основных блока: блок излучателя (импульсный лазер); блок передающей оптической системы; приемный блок; блок обработки данных измерений.



**Рисунок 1.**  
**Функциональная схема измерителя**

Импульсный лазер с длиной волны 0,355 мкм облучает исследуемый объект. Передающая оптическая система предназначена для формирования необходимой расходимости излучения (определяемой требуемым пространственным разрешением).

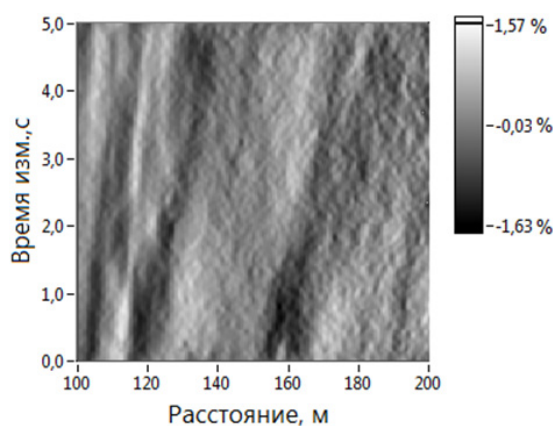
Приемный блок предназначен для регистрации излучения в  $n$  спектральных каналах и включает: приемную оптическую систему; спектральные интерференционные фильтры и дихроические зеркала, обеспечивающие выбор спектральных каналов регистрации излучения; фотоприемники - фотоэлектронные умножители.

Блок обработки (на основе ПЭВМ со специальным программным обеспечением) предназначен для обработки, отображения, выдачи и хранения данных измерений.

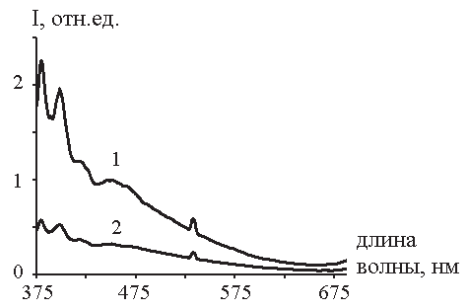
На рисунке 2 приведен пример полученного на макете лазерного измерителя пространственно-временного распределения коэффициента вариации аэрозольных атмосферных неоднородностей для одного из спектральных каналов. Данные измерений представлены в виде полутонового изображения двумерного поля коэффициента вариации флуктуаций (в процентах) объемного коэффициента обратного рассеяния на плоскости «время измерения - расстояние» (расстояние от лидара определяется по задержке принимаемого эхо-импульса).

Обработка изображения двумерного поля коэффициента вариации флуктуаций объемного коэффициента обратного рассеяния позволяет получить информацию о скорости и направлении переноса аэрозольных неоднородностей в атмосфере.

На рисунке 3 приведены примеры полученных спектров лазерно-индуцированной флуоресценции нефтяных загрязнений. На рисунке 3 кривые 1,2 – спектры дизельного топлива, разлитого на песке, 1 - сразу после разлития, 2 – через 12 суток после разлития.



**Рисунок 2.**  
**Пространственно-временные распределения**  
**коэффициента вариации аэрозольных неоднородностей**



**Рисунок 3.**

***Спектры лазерно-индуцированной флуоресценции нефтяных загрязнений***

Анализ формы спектров флуоресценции (используя выбранные спектральные каналы регистрации) позволяет обнаруживать нефтяные загрязнения на земной поверхности.

Разработанный многофункциональный лазерный измеритель в УФ области спектра позволяет эффективно решать многие задачи дистанционного оперативного контроля состояния природной среды.

# СИСТЕМА КАЛИБРОВКИ ЦЕЛЕВОЙ АППАРАТУРЫ КА ДЗЗ

ЧЕКАЛИН В.Ф., КОРНЕЕВ С.Л.

«Научно-исследовательский институт точных приборов», г. Москва

E-mail: vchekalin@mail.ru, serg\_korn2000@mail.ru

При космической съемке недоступных территорий информация о топогеодезических данных местности отсутствует и точность получения первичной информации всецело зависит от точности и стабильности работы целевой аппаратуры КА ДЗЗ. В этой связи основными задачами калибровки целевой аппаратуры в части обеспечения требуемого качества метрики материалов наблюдения КА ДЗЗ являются обеспечение точности внутренней геометрии получаемых космических изображений на субпиксельном уровне:  $\leq 1 \text{ pxl}$  и их геодезической привязки по бортовым измерениям порядка 2-3м, что реализуется у лучших образцов зарубежных спутников. Актуальность рассматриваемой проблемы обусловлена высокими требованиями по точности, которые предъявляются в настоящее время к первичным данным ДЗЗ, а также существенным отставанием российских существующих и создаваемых КА ДЗЗ по этим показателям. Аналогичные показатели при обработке материалов съемки современных российских КА ДЗЗ составляют порядка 3-5 pxl и 10-15 м соответственно.

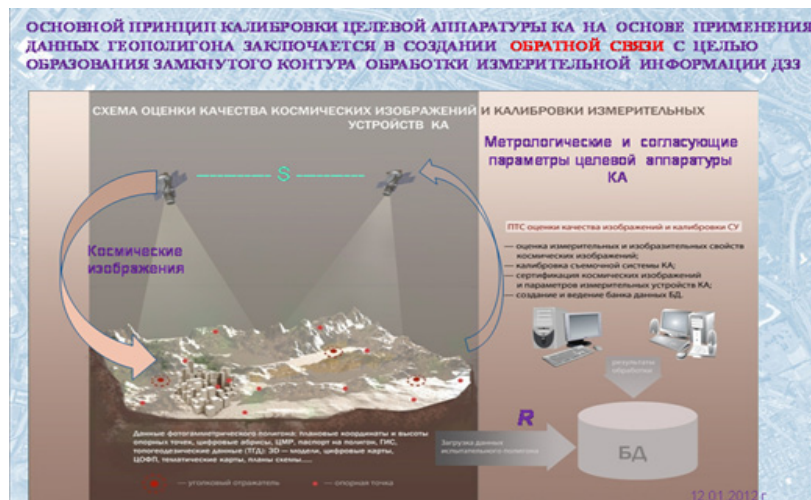
В свою очередь, согласованность совместной работы всех измерительных устройств целевой аппаратуры определяется близостью используемых при этом значений метрологических параметров каждого устройства к их действительным (истинным) величинам, другими словами, фактором отсутствия неучтенных систематических ошибок в метрологических параметрах. И, наконец, необходимое максимальное приближение их реальных значений к истинным достигается в результате применения предлагаемой 3-х этапной схемы калибровки целевой аппаратуры КА ДЗЗ. Как следствие, достигаемая высокая степень приближения реальных параметров к истинным значениям гарантирует обеспечение указанной необходимой точности позиционирования КА ДЗЗ по бортовым измерениям на недоступных территориях.

На первом этапе при изготовлении измерительной аппаратуры КА выполняется ее наземная калибровка на стенде Главного конструктора с использованием образцовых средств измерений, имеющих наивысший приоритет точности. При этом все измерения по определению калиброванных значений метрологических параметров выполняются напрямую, непосредственным образом. Результаты наземной калибровки фиксируются в соответствующих сертификатах качества.

На втором этапе в период проведения ЛКИ и штатной эксплуатации КА периодически осуществляется полетная калибровка метрологических параметров целевой аппаратуры и оценка качества космической информации по тестовым данным калибровочных полигонов. В результате их обработки значения параметров целевой аппаратуры, которые были получены при наземной калибровке, уточняются и при необходимости корректируются путем введения компенсирующих поправок.

Задача третьего этапа калибровки – постоянный контроль стабильности калиброванных значений метрологических параметров целевой аппаратуры.

Оценка допустимости возможных изменений этих параметров производится по снимкам тестовых участков.



**Рисунок 1.**  
**Принцип полетной калибровки**

В настоящее время используется только схема полевой калибровки целевой аппаратуры, в которой значения метрологических параметров измерительных устройств определяются на основе измерений опорных точек на снимках калибровочных полигонов или тестовых участков.

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ «ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА» ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

САЛЬНИКОВА М.А., АРХИПОВ С.А.

ПАО «Красногорский завод им С.А. Зверева», г. Красногорск, Московская обл.

E-mail: m.salnikova@zenit-kmz.ru

При создании и эксплуатации опико-электронной аппаратуры предлагается различать три типа математических моделей: экспресс-оценки (ЭО), имитационные модели, цифровой образец изделия. На примере проектирования астрономического зеркала демонстрируется использование ЭО. Применение ЭО позволяет сократить время на проектирование аппаратуры, проведение испытаний, дает возможность оперативно оценивать влияние отклонений параметров деталей на аппаратуру в целом при изготовлении, сборке и в процессе эксплуатации.

Создание современной опико-электронной аппаратуры (ОЭА) космического назначения немислимо без математического моделирования. Математическое моделирование позволяет сократить время на проектирование основных узлов, оценивать отклик системы на воздействие различных внешних факторов. Жизненный цикл ОЭА включает следующие этапы: техническое задание (ТЗ), эскизное проектирование (ЭП), разработка конструкторской документации (КД), наземные испытания (НИ), запуск в составе космического аппарата и эксплуатация (Э).

На каждом этапе жизненного цикла (ЖЦ) разрабатываются математические модели как аппаратуры в целом, так и ее основных узлов. Все возможные математические модели могут быть сведены к трем типам: экспресс-оценки, имитационные модели и цифровой образец. Требования к моделям изменяются в зависимости от этапа жизненного цикла (таблица 1).

*Таблица 1. Требования к математическим моделям*

Требования к математическим моделям	Математические модели		
	Экспресс-оценки	Имитационные модели	Цифровой образец
Этап ЖЦ, на котором используется модель	ТЗ, ЭП, КД, НИ, Э	КД, НИ	НИ, Э
Назначение	Функциональные связи. Выбор схемных решений.	Обоснование требований к конструкции	Расчет параметров управления и парирования НШС
Адекватность	Оценочная	Полная	Полная
Сложность	Простая	Сложная	Сложная
Вариантность	Высокая	Низкая	Единичная
Вход	Упрощенный	Адекватный	Конкретный
Выход	Упрощенный	Адекватный	Конкретный
Постановка задачи	Прямая/обратная	Прямая/обратная	Прямая/обратная

**Экспресс-оценка (ЭО)** – упрощенная аналитическая зависимость, полученная путем аналитического решения конкретной задачи, либо путем аппроксимации численных решений, отражающая частные существенные связи между параметрами конструкции, характеристиками ее состояния и условиями эксплуатации.

**Имитационная модель (ИМ)** – численный расчет, позволяющий определять выходные оптотехнические характеристики ОЭА для заданных параметров конструкции ОЭА, характеристик ее состояния и их изменений в условиях эксплуатации.

**Цифровой образец (ЦО)** – технология математического моделирования ОЭА, построенная на основе электронной модели изделия (ГОСТ 2.052-2006) в некоторой, имеющейся у разработчика, САД системе и всей совокупности примененных ЭО и ИМ, которая обеспечивает адекватное ОЭА «поведение» ЦО в условиях эксплуатации.

Рассмотрим использование модели типа «экспресс-оценка» при математическом моделировании ОЭА на протяжении ее жизненного цикла. На первых его этапах (ТЗ, ЭП), когда конструкция ОЭА еще не состоялась, экспресс-оценки представляют собой упрощенные функциональные связи между параметрами конструкции, граничными условиями и внешними воздействиями. Приведем пример построения и использования такой взаимосвязи для следующей задачи: необходимо оценить максимальное перемещение (деформацию) рабочей поверхности плоского зеркала при условии его закрепления в трех точках, расположенных равномерно на некотором радиусе. В качестве внешних воздействующих факторов рассматривается только действие силы тяжести. Данную оценку проводят для выбора оптимальных геометрических параметров зеркала, необходимого технологического и измерительного оборудования.

Для оценки максимальных перемещений рабочей поверхности зеркала под действием гравитации конструктор использует следующую формулу экспресс-оценки:

$$B^p = A_1 \cdot W_1 + A_2 \cdot W_2 \quad (1)$$

В данном случае максимальное перемещение рабочей поверхности зеркала представляется в виде суммы максимальных перемещений круглых тонких пластин  $W_1$  и  $W_2$  с некоторыми коэффициентами  $A_1$ , и  $A_2$ , определение значений которых является главной задачей при построении экспресс-оценки.

В формуле (1)  $W_1$  – это максимальное перемещение рабочей поверхности детали, габариты которой определяются радиусом, на котором располагаются точки крепления;  $W_2$  – это максимальное перемещение рабочей поверхности кольцевой детали, габариты которой определяются следующим образом: внутренний диаметр равен диаметру расположения опор, а внешний диаметр соответствует максимальному габариту детали. Расчет величин  $W_1$  и  $W_2$  выполняется по известным аналитическим формулам [1,2] теории круглых тонких пластин.

Рассчитав наиболее часто встречающиеся в проектировании соотношения размеров пластин и расположений опор можно составить карту решений (таблицу коэффициентов  $A_1$ ,  $A_2$ ), которая позволит конструктору, не прибегая к проектированию и расчету моделей в специализированных программах, оценить размеры максимального прогиба, получающегося на детали. Это также позволит производить оценки не только на стадии проектирования, но и при изготовлении деталей.

Коэффициенты  $A_1$  и  $A_2$  используемые, в уравнении (1) перед прогибами  $W_1$  и  $W_2$ , конструктор берет из составленных ранее таблиц. Данные коэффициенты постоянны для деталей с одинаковыми соотношениями между радиусами  $r_1/r_2$  и  $\frac{(r_2 - r_1)}{h} = \frac{l}{h}$ , т.е. их можно использовать для расчета максимальных деформаций детали с другими радиусами, но с теми же соотношениями  $r_1/r_2$  и  $h$ . Здесь  $r_1$  - радиус, на котором располагаются опоры;  $r_2$  - внешний радиус зеркала;  $h$  - толщина зеркала,  $l = (r_2 - r_1)$ .

Используя предложенную выше формулу экспресс-оценки (1) конструктор вычисляет максимальные перемещения рабочей поверхности  $B^p$  детали под воздействием гравитации. Оценку погрешности экспресс-оценки можно произвести сравнением полученного результата с точным значением максимального перемещения  $B$  рабочей поверхности зеркала, рассчитанного, например, в программе конечно-элементного моделирования ANSYS. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

**Таблица 2. Результаты расчетов**

$r_1$ , м	$r_2$ , м	$h$ , м	$r_1/r_2$	$\frac{(r_2 - r_1)}{h}$	Максимальный прогиб детали в ANSYS, $B$ , м	Экспресс-оценка прогиба детали, $B^p$ , м	Разность между $B - B^p$ %
0,145	0,345	0,02	0,42	10	$B = 4,2 \cdot 10^{-6}$	$B^p = 4,2 \cdot 10^{-6}$	0
0,29	0,69	0,04	0,42	10	$B = 1,619 \cdot 10^{-5}$	$B^p = 1,679 \cdot 10^{-5}$	3,7%
0,0725	0,1725	0,01	0,42	10	$B = 1,06 \cdot 10^{-6}$	$B^p = 1,05 \cdot 10^{-6}$	1,0%
0,435	1,035	0,06	0,42	10	$B = 3,82 \cdot 10^{-5}$	$B^p = 3,78 \cdot 10^{-5}$	1,0%

Из таблицы следует, что экспресс-оценка отличается от точного численного решения  $B$  задачи не более, чем на 5%. Наличие данной экспресс-оценки позволит разработчику оценивать деформации рабочей поверхности, не прибегая к численному решению в программных комплексах конечно-элементного моделирования.

*Список литературы:*

1. Г.С. Варданян, В.И. Андреев, Н.М. Атаров, А.А. Горшков Соппротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. Москва: Изд-во АСВ, 1995.
2. Д.В. Вайнберг, Е.Д. Вайнберг. Расчет пластин. Издание второе. Киев: Изд-во Будивельник, 1970.



# ОСОБЕННОСТИ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ «БИСЕР»

МОРОЗОВ С.А., АРХИПОВ С.А., БЕЛЯЕВ К.С., ГЕНЖАЕВ Ш.А.  
ЛУЗГАНОВА М.Ю., САЛЬНИКОВА М.А., СОЛОВЬЁВ Д.Е.

ПАО «Красногорский завод им С.А. Зверева», г. Красногорск, Московская обл.

E-mail: msa@zenit-kmz.ru

В докладе затронуты проблемные вопросы проектирования современной гиперспектральной оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли. Рассмотрены особенности её оптической схемы, компоновки и конструкции. Подчеркнута возможность создания современной гиперспектральной аппаратуры в сжатые сроки в соответствии с требованиями заказчика.

Гиперспектральная аппаратура «Бисер» разрабатывается ПАО КМЗ по заказу АО «РКЦ «Прогресс», предназначена для гиперспектральной и панхроматической съемки поверхности Земли с характеристиками (для базовой орбиты  $H=700$  км) не хуже:

Захват, км	30
Пространственное разрешение, м	
– в спектрометре	30
– в ПХ канале	10-15
Спектральный диапазон, мкм	
– в спектрометре	0,4-2,5
– в ПХ канале	0,6-0,75
Интервал спектральной выборки в спектрометре, нм	5,0-10,0
Число спектральных каналов в спектрометре	240
СКП определения СПЭЯ на входном зрачке, %	5,0-7,0
Разрядность квантования сигнала, бит	12-14
Погрешность определения взаимного положения элементов дискретизации не более, угл. с.	4,0

В состав ГСА «Бисер» входят блок оптико-электронный (ОЭБ-ГС), система управления (СУ-ГС); комплекс наземного программного обеспечения (НПО-ГС).

Основными элементами ОЭБ-ГС являются объектив изображающий и блок спектрометров [1].

Объектив изображающий ГСА построен на базе эксцентричной зеркальной оптической системы, формирующей изображение подстилающей поверхности на входных щелях трёхканального блока спектрометров и на светочувствительной поверхности панхроматического фотоприёмного устройства (БФПУ-ПХ).

Блок спектрометров обеспечивает формирование, регистрацию и обработку спектров изображений подстилающей поверхности, ограниченных входными щелями.

Представленные варианты схемного решения оптической системы ОЭБ-ГС предусматривают использование:

- эксцентричного 3-х или 4-х зеркального объектива изображающего (ОИ),
- трёхканального спектрометра на базе зеркальных проекционных объективов с дифракци-

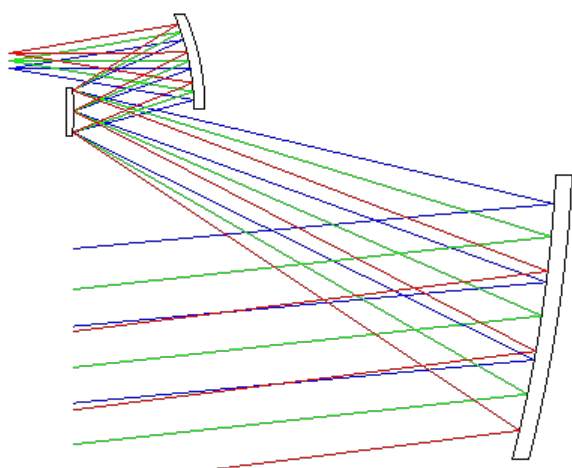
онной решёткой и фотоприёмных устройств ФПУ-ВД, ФПУ-КИК1 ФПУ-КИК2 на базе микросхем отечественного или импортного производства;

- фотоприёмного устройства для панхроматической съёмки ФПУ-ПХ.

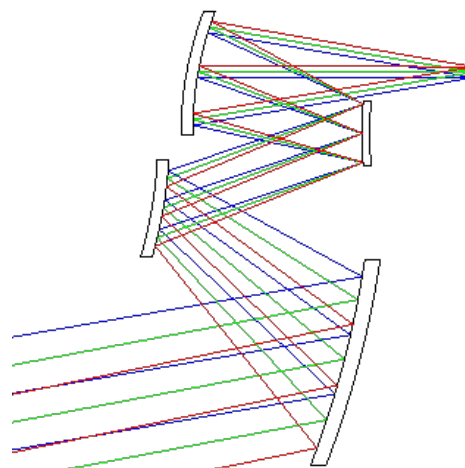
Варианты схем ОИ приведены на рисунках 1 и 2 соответственно.

В качестве базовой схемы выбраны спектрометры основанные на схеме Оффнера с выпуклой дифракционной решеткой. Они представляют собой проекционную систему с увеличением  $1,0\times$  в нулевом порядке дифракции. Спектрометры рассчитаны как двухзеркальные системы со сферическими компонентами (на первом вогнутом зеркале лучи отражаются дважды). Второе зеркало имеет выпуклую поверхность с нанесённой на нее дифракционной решёткой (ДР). Отличаются спектрометры каналов ВД, КИК1 и КИК2 параметрами ДР, положением входной щели, положением спектра изображения.

Первое зеркало выполняет функции коллимирующей системы и направляет излучение от щели на дифракционную решетку. Второе зеркало выполнено в виде выпуклой ДР с нанесенным на нее отражающим покрытием. Третье зеркало выполняет функции фокусирующей системы, собирая отраженное от ДР и разложенное в спектр излучение в плоскости наилучшего изображения (ПНИ). Первое и третье зеркала имеют равные радиусы кривизны и выполнены в виде единого оптического элемента.



*Рисунок 1. Схема трехзеркального ОИ*



*Рисунок 2. Схема четырехзеркального ОИ*

Важнейшей характеристикой спектрометров является дисторсия, которая приводит к нарушению подобия монохроматических изображений входной щели и описывается как:

- изменение координаты  $y'$  изображения на длине щели, вызывающее кривизну спектральных линий («смайл»-эффект);

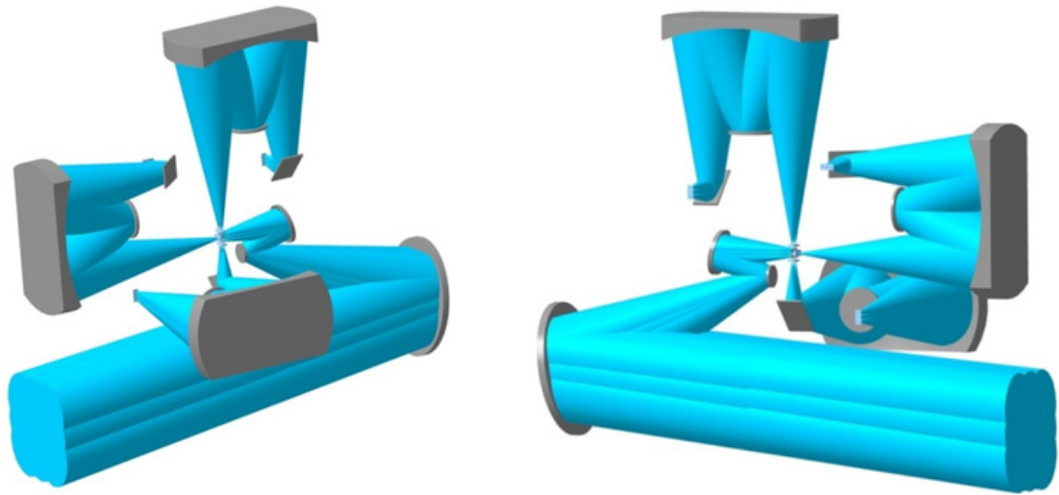
- изменение длины изображения входной щели вызывающее разномасштабность спектральных линий («трапеция»).

Поэтому при оптимизации параметров схемы разность между координатами  $y'$  главного луча в ПНИ для центра и края спектральной линии (геометрическая дисторсия) минимизирована во всех спектрометрах.

Установка в ОЭБ ГСА фотоприёмного устройства для панхроматической съёмки позволит значительно повысить детальность синтезированных снимков.

При компоновке оптической схемы ГСА соблюдено следующее ключевое условие – входные щели спектрометров должны устанавливаться в предметных плоскостях проекционных объективов и, одновременно, в плоскости наилучшего изображения объектива изображающего [2].

Варианты компоновки оптической системы ГСА приведены на рисунке 3



**Рисунок 3.**  
**Варианты компоновки оптической схемы варианта ГСА**

*Список литературы:*

1. С.А. Архипов, С.О. Кравченко, А.В. Ли, В.М. Линько, С.А. Морозов, М.А. Сальникова. Гиперспектральная аппаратура для космического аппарата «Ресурс-П»: направления модернизации и перспективы развития. Гиперспектральные приборы и технологии: Сборник тезисов докладов научно-технической конференции. – М.:ОАО КМЗ, 2013.

2. В.М. Линько, А.В. Ли, С.А. Морозов, М.А. Сальникова. Оптические схемы спектрометров для перспективной космической гиперспектральной съемочной аппаратуры. Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: Материалы научно-технической конференции. - М.:МНТОРЭС им. А.С. Попова, филиал ФГУП «ГНП РКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС» - «НПП «ОПТЭКС», 2014.

# ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДО КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

ДОЛГИХ А.Е., ЖИДКОВ П.М.

ОАО «Корпорация «Комета», г. Москва

E-mail: info@corpkometa.ru

Вместе с освоением космического пространства происходит его технологическое засорение. С каждым годом число вышедших из строя космических аппаратов, ступеней ракет и различных обломков на околоземных орбитах увеличивается [1]. При этом даже космический мусор (КМ) малых размеров может представлять большую опасность для совершения космических полетов, особенно пилотируемых. Зная орбиты, по которым движутся объекты на околоземных орбитах, можно предугадать столкновения действующих КА с КМ. На сегодняшний день системы контроля космического пространства выполняют каталогизацию космических объектов, в том числе КМ. Низкая точность определения координат и скорости космических объектов не позволяет прогнозировать положение КМ на длительные временные промежутки, поэтому необходимо регулярно обновлять каталоги [2].

Использование лазерного дальномера (ЛД) бортового размещения позволит увеличить точность, а также, ускорит сам процесс определения параметров орбит КМ. Измерения на основе задержки между излученным и принятым сигналом позволят определять расстояние от наблюдателя до объекта КМ за короткий промежуток времени и с высокой точностью [3].

В силу высокой стоимости компонентов лазерного дальномера, а также ограниченного количества энергоресурсов на борту КА необходимо заранее определить облик ЛД, основываясь на достижимой точности работы. Использование имитационного моделирования позволит без больших затрат оценить влияние различных характеристик ЛД на достигаемые точности определения дальности.

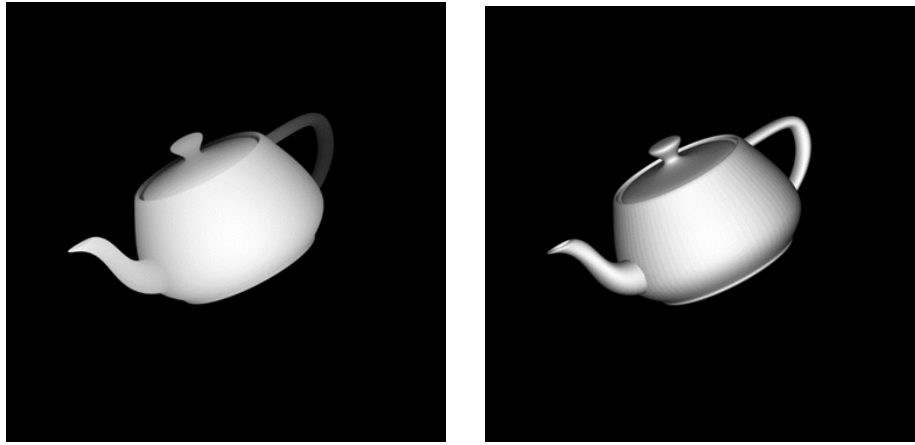
В данной работе представлена имитационная модель ЛД, учитывающая временную структуру импульса, отражение от комплексного объекта сложной формы и процессы детектирования протяженного во времени сигнала.

Входными данными модели являются: координаты и скорости движения КА- наблюдателя и КМ, характеристики лазерного импульса и излучателя, характеристики приемного устройства, блока анализа цифрового сигнала, а также трехмерная модель наблюдаемого объекта, представленная полигональной сетью.

Приемный канал ЛД наводится на объекты КМ с помощью сторонних источников, при этом считаем, что оптическая ось направлена в сторону центра масс наблюдаемого объекта, а направление строк изображения ориентировано на Землю.

Чтобы определить интенсивность отраженного излучения от объекта сложной формы с учетом перекрытия его отдельных частей, авторами предложен оригинальный метод, в основу которого положена идея Z-буфера [4]. Он заключается в генерировании карты дальности  $R_{ij}$  и, одновременно с ней, карты облученности  $I_{ij}$  наблюдаемого объекта. Нахождением визирных координат вершин полигонов трехмерной модели строится пиксельная проекция наблюдаемого КМ, в каждую ячейку которой записывается расстояние до соответствующей части наблюдаемого объекта, а в карте облученности - число отраженных фотонов. В случае наложения проекций полигонов друг на друга в пиксели записываются данные о том, который расположен ближе к наблюдателю [4].

Пример карты дальности и карты облученности представлен на рис. 1.



**Рисунок 1.**  
**Карта дальности  $R_{ij}$  (а) и карта облученности  $I_{ij}$  (б)**

Число принятых детектором фотонов, которые отразились от одного пикселя, вычисляется по формуле

$$N_{\text{пр}} = N_{\text{из}} \cdot \frac{k \cdot S_{\text{п}} \cdot S \cos \varphi}{S_{\text{ш.с.}} \cdot 2\pi R^2} \cdot \tau$$

где  $N_{\text{пр}}$  - число принятых фотонов;  $N_{\text{из}}$  - число излученных фотонов;  $S_{\text{п}}$  - площадь части примитива, соответствующей одному пикселю;  $2\pi R^2$  - площадь разлета фотонов при отражении от объекта;  $S$  - площадь входной апертуры приемного устройства;  $\varphi$  - угол между нормалью к отражающей поверхности и линией визирования,  $\tau$  - коэффициент пропускания телескопа приемного устройства,  $k$  - коэффициент диффузного отражения элемента КМ.

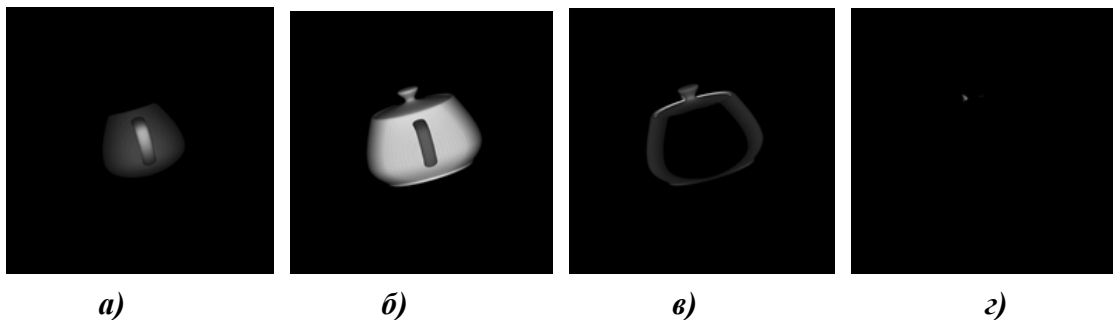
$S_{\text{ш.с.}} = 2\pi R^2 \cdot (1 - \cos \alpha)$  - площадь разлета фотонов при лазерном излучении;  $\alpha$  - угол разлета фотонов.

Приведенный радиус вычисляется по формуле

$$R' = R + \frac{d}{2\alpha}$$

где  $d$  - апертура лазерного излучателя;  $R$  - расстояние от КА-наблюдателя до КО.

Далее, на каждый такт фотоприемного устройства (ФПУ) рассчитывается число отраженных фотонов стробированием карты облученности по дальности. Пример разбиения отраженного импульса на такты ФПУ представлен на рис. 2.



**Рисунок 2.**  
**Облученность чайника в различные временные промежутки: а)  $t_1-t_2$ ; б)  $t_2-t_3$ ; в)  $t_3-t_4$ ; г)  $t_4-t_5$**

После подсчета числа фотонов, упавших на входной зрачок ФПУ, накладываются шумы считывания приемника, распределенные по нормальному закону, и радиационный шум самого сигнала, распределенный по Пуассону:

$$\begin{aligned} S_i &= U(N_{np}) \cdot \eta \cdot M + Y_i \\ U(N_{np}) &\sim PO(N_{np}); \\ Y_i &\sim N(\sigma, \mu), \end{aligned}$$

где  $S_i$  - величина сигнала на один дискрет,  $U(N_{np})$  - число электронов, вызванное откликом системы в течение одного дискрета,  $Y_i$  - шум приемника на один дискрет,  $\eta$  - квантовая эффективность,  $M$  - коэффициент умножения лавинного фотодиода,  $\sigma$  - с.к.о. шума,  $\mu$  - величина «подставки».

Сигнал с фотоприемного устройства проходит через аналого-цифровой преобразователь, выдающий на выходе квантованный по амплитуде цифровой сигнал:

$$D_i = \begin{cases} \left\lfloor \frac{|S_i|}{\varepsilon} \right\rfloor, & \text{если } \frac{S_i}{\varepsilon} < E \\ E, & \text{если } \frac{S_i}{\varepsilon} > E \end{cases}$$

где  $\varepsilon$  - количество электронов в одном кванте,  $E$  - максимальное число квантов.

Алгоритмы моделирования пуассоновских и нормальных случайных величин изложены в [5]. Далее цифровой сигнал поступает на блок анализатора, работа которого построена по классической схеме и включает предварительную, первичную и вторичную обработку [6]. По превышению порога определяются дискреты ФПУ на которых произошло обнаружение объекта(ов) КМ, в случае близкого расположения несколько дискрет объединяются нахождением взвешенного центра по следующей формуле:

$$t = \frac{\sum_i I_i t_i}{\sum_i I_i}$$

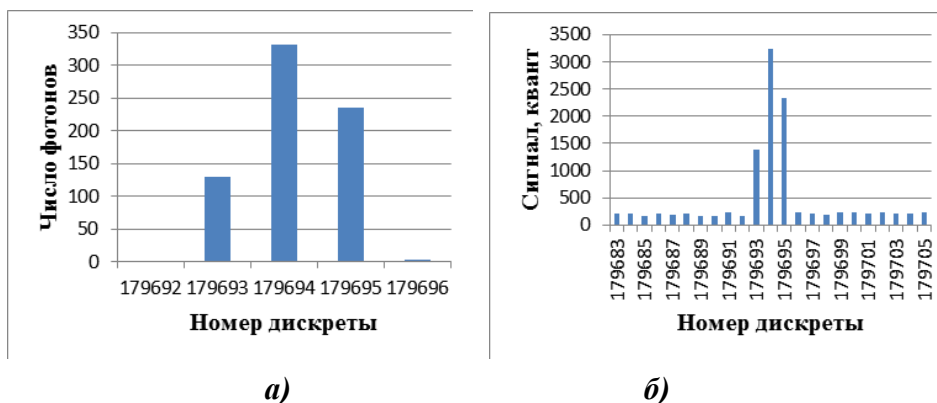
где  $t$  - среднее время импульса,  $t_i$  - время одной дискреты,  $I_i$  - уровень сигнала одной дискреты.

Данные, полученные от нескольких зондирований, проходят траекторную обработку, при которой в траекторию завязываются отметки, попадающие в строб сопровождения. Траекторией КМ считается та, у которой число отметок на пачку зондирований превысило определенный порог.

Для презентации возможностей разработанной имитационной модели проводился ряд экспериментов по определению расстояния до трехмерной модели чайника из стандартного каталога программы «3ds Max».

На рис. 3 представлены результаты моделирования сигналов, полученных отражением от КМ на дальности 130 км.

Для оценки точности определения дальности при помощи имитационной модели использовались статистические методы. Была построена гистограмма распределений отклонений  $\Delta = R - D$  (рис. 4), где  $R$  - реальное расстояния от КА-наблюдателя до объекта КМ, а  $D$  - расстояние, измененное с помощью ЛД.



**Рисунок 3.**  
**Форма отраженного сигнала от трехмерной модели чайника,**  
**а) - на входе зрачка, б) - на выходе приемника**

**Рисунок 4.**  
**Распределение отклонений определения дальности**

Значения отклонений  $\Delta$  смещены в положительную сторону, соответствующее тому, что результаты измерения при помощи ЛД меньше реальных. Данные результаты показывают, что сигнал, отраженный от КМ, формируется в основном её фронтальной (по отношению к наблюдателю) частью.

Разработанная модель позволит обосновать технические требования по мощности излучателя ЛД, размерам формирующей и приемной апертуры, длительности и частоте импульсов, частоте выборки и чувствительности приемника для обеспечения необходимой точности измерения дальностей до типовых объектов космического мусора.

*Список литературы:*

1. Космический мусор. В 2 кн. Кн. 1 Методы наблюдения и модели космического мусора. / Агапов В.М., Головки А.В., Емельянов В.А. и др. // М.: ФИЗМАТЛИТ. 2014, 248 с.
2. Вениаминов С.С., Червонов А.М. Космический мусор - угроза человечеству. М.: ИКИ РАН. 2012, 190с.
3. Лазерные приборы и методы измерения дальности: учеб, пособие. / Бокшанский В.Б., Бондаренко Д.А., Вязовых М.В. и др. // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 92,[4]с.
4. Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики. М.: Мир. 1989, 503с.
5. Лоу А.М., Кельтон В.Д. Имитационное моделирование. М.: Питер. 2004, 846 с.
6. Звелто О. Принципы лазеров. М.: Мир. 1990, 560с.

# АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЯРКОСТИ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

ЕГОШИН Д.А., АЛЕШКО Е.И., КУРТ В.И., ЛАВРУХИН В.П., ВАСИЛЬЕВ Д.Ю.

АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань

E-mail: gipo@telebit.ru

Приборы ночного видения (ПНВ) – это отдельный класс оптико-электронных приборов, предназначенный для получения данных о различных объектах в ночное время, или, когда визуальная видимость ограничена недостаточной освещенностью.

Для определения характеристик ПНВ, проведения сравнительного анализа различных типов применяются соответствующие средства измерения, в том числе светоизмерительные лампы, объективы коллиматоров, проекционные объективы, цифровые измерительные камеры, фотометры, яркометры, спектральные приборы, вольтметры, гальванометры, светофильтры, тест-объекты и др.

В последнее время расширяется номенклатура и увеличивается выпуск ПНВ, которые обладают более высокой чувствительностью, работают при более низких уровнях освещенности. Возникает необходимость модернизации существующей системы метрологического обеспечения ПНВ.

В плане решения этой задачи АО «НПО ГИПО» разработан фотометрический яркометр, предназначенный для измерения яркости объектов в диапазоне от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $1 \cdot 10^4$  кд/м<sup>2</sup> с допускаемой относительной погрешностью измерений не более 10%. Он применяется в составе аппаратуры для натурных испытаний ПНВ и используется для определения пропускания атмосферы и видимого контраста объекта и фона на испытательной трассе.

В основу конструктивных решений фотометрического яркометра легла оптическая схема фотометра СЮ17-29, хорошо зарекомендовавшая себя во время экспедиций по исследованию спектрального состава излучения звезд.

Разработанная оптическая схема фотоэлектрического яркометра позволяет проводить измерения как протяженных источников, так и отдельных элементов с угловым размером не менее 15°.

Общий вид яркометра представлен на рисунке 1.



*Рисунок 1.*

*Общий вид яркометра на треноге:*

*1 – яркометр; 2 – тренога; 3 – БУР; 4 – ПК; 5 – маховик вертикальной подвижки;  
6 – маховик наклона; 7 – маховик разворота; 8 – электронный блок ФЭУ*



Яркомер конструктивно выполнен в виде двух блоков, соединенных между собой кабелями: оптико-механического блока (ОМБ) – собственно яркомер – и блока управления и регистрации (БУР).

Измерение яркости проводится в реальном режиме времени с отображением результатов на экране персонального компьютера (ПК).

Были проведены исследования диапазона измерений яркости непрерывного излучения яркомера. Исследования проводились с помощью протяженного источника в виде диффузно-рассеивающего экрана (ДРЭ) с известным коэффициентом яркости, выполненного из молочного стекла МС-20 и освещенного светоизмерительной лампой, аттестованной в ранге не ниже рабочего эталона. Яркость ДРЭ для подтверждения диапазона измерений яркости непрерывного излучения яркомера рассчитывают по формуле:

$$L_{\text{дрэ}} = \frac{\beta_{\text{дрэ}} \cdot i}{\pi \cdot l^2} \quad (1)$$

$\beta_{\text{дрэ}}$  – коэффициент яркости ДРЭ для геометрии освещения/наблюдения  $0^\circ/45^\circ$ ;

$i$  – сила света источника света, кд;

$l$  – расстояние между плоскостью тела накала источника света и ДРЭ, м.

В результате исследований было установлено, что нижнее значение диапазона измерений яркости непрерывного излучения составляет не более  $1 \cdot 10^{-4}$  кд/м<sup>2</sup>, а верхнее – не менее  $1 \cdot 10^4$  кд/м<sup>2</sup> с основной относительной погрешностью не более 10%.

Технические характеристики яркомера приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Технические характеристики яркомера**

Наименование характеристики	Значение характеристики
1 Диапазон измерений яркости непрерывного излучения, кд/м <sup>2</sup>	от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^4$
2 Предел допускаемой относительной погрешности измерений яркости непрерывного излучения, %, не более	10
3 Фокусное расстояние входного объектива яркомера, мм	$250 \pm 10$
4 Диаметр входного зрачка, мм	$100 \pm 5$
5 Угол поля зрения измерительного канала, не более: - основной - дополнительные	$0,1^\circ \pm 30''$ ; $0,18^\circ \pm 1'$ ; $0,32^\circ \pm 2'$
6 Увеличение визирного канала, крат, не менее	12,5
7 Угол поля зрения визирного канала, не менее	$5^\circ$

# АЛГОРИТМЫ ШУМОПОДАВЛЕНИЯ, РЕАЛИЗУЕМЫЕ В БОРТОВОЙ АППАРАТУРЕ

КВИТКА В.Е., КЛЮШНИКОВ М.В., БЛИНОВ В.Д.

Филиал АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС»  
г. Москва, Зеленоград

E-mail: optecs@samspace.ru

Одной из главных проблем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является наличие шумов на снимках, сделанных космическим аппаратом (КА). Особенно остро проблема стоит для обработки видеоданных, получаемых космическими аппаратами высокого разрешения (КАВР). Это связано с большими скоростями движения изображений на фотоприёмниках и малыми значениями относительного отверстия объективов КАВР. Например, для телескопа КА «WorldView-3» относительное отверстие составляет  $1/14,5$ , обеспечивая съёмку с проекцией пикселя 0,31 м. Аналогично, объектив КА «QuickBird» имеет относительное отверстие  $1/14,6$  при проекции пикселя 0,61 м [1].

При создании КАВР необходимо разработать эффективные алгоритмы шумоподавления, чтобы линейное разрешение на местности (ЛРМ) приблизить к величине проекции пикселя панхроматического спектрального канала. При этом процедура шумоподавления должна проводиться непосредственно на борту КА перед их сжатием и передачей на Землю, так как при высоких степенях сжатия видеоданные получают сильные искажения. Это условие накладывает следующие требования к алгоритму шумоподавления:

- при работе алгоритма над текущей строкой изображения должно использоваться не более двух соседних строк, что связано с ограничениями по оперативной памяти;
- вследствие больших объёмов видеоинформации необходимо минимизировать количество операций, выполняемых алгоритмом.

Работы по моделированию панхроматических снимков будем выполнять для КА высокого разрешения.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАШУМЛЁННЫХ СНИМКОВ

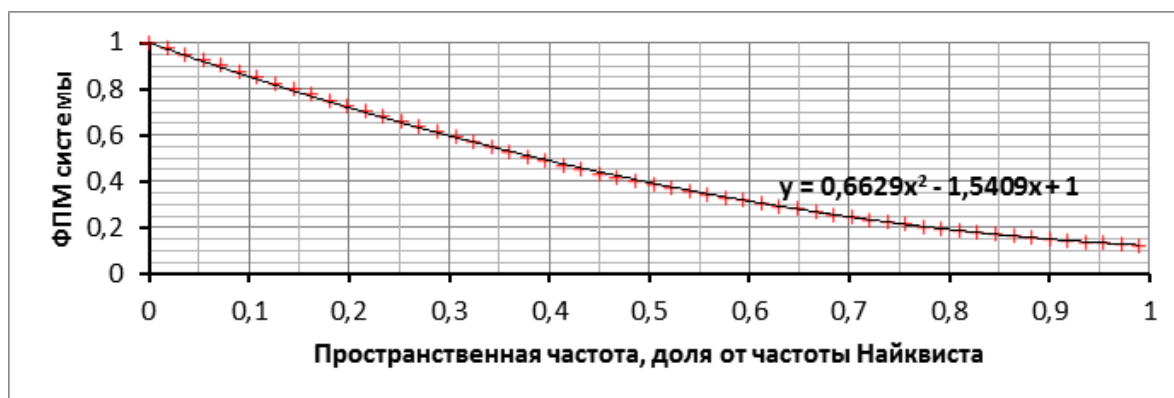
В первую очередь необходимо провести моделирование исходных снимков, которые будут получены КАВР. Для моделирования используются аэрофотоснимки с проекцией пикселя не более 0,2 м. Процедура синтеза исходного снимка следующая:

- выполняется перевод снимка из 8-разрядной в 12-разрядную систему градаций яркости (4096 уровней АЦП);
- рассчитывается проекция пикселя аэрофотоснимка  $L_{aer}$ , после чего он перемасштабируется на проекцию пикселя  $L_{КА}$  (коэффициент масштабирования  $k = L_{aer} / L_{КА}$ ). Результаты этой операции описывается матрицей  $A$ ;
- вычисляется функция передачи модуляции (ФПМ) оптико-электронного тракта КА  $MTF(v)$ , показанная на рисунке 1;
- для исследования улучшения процедуры шумоподавления предварительно впечатаем в угол снимка  $A$  две пары трёхшпальных миш (контрасты 0,3 и 0,8 ; периоды 2 и 4 пикселя);
- выполняется двумерное дискретное преобразование Фурье (ДДФ) снимка  $A$ . Обозначим полученный спектр как  $F(A)$ ;
- имитируем размытие мелких деталей изображения  $A$  путём домножения спектра  $F(A)$  на ФПМ оптико-электронного тракта  $MTF(v)$ . Полученный результат  $F(B) = F(A) * MTF(v)$  является Фурье-спектром изображения  $B$ , формируемого в фокальной плоскости телескопа. Соот-

ответственно, для получения снимка В необходимо выполнить обратное ДДПФ:  $V = F^{-1}( F(B) ) = F^{-1}( F(A) * MTF(v) )$ ;

- моделируем зашумление изображения В. Как известно, СКО шума  $\sigma_{\text{полн}} = \sqrt{\sigma_{\text{фотон}}^2 + \sigma_{\text{ФПУ}}^2}$ , причём СКО фотонного шума  $\sigma_{\text{фотон}} = \sqrt{U}$ , где  $U$  – накопленный сигнал (в электронах).

Таким образом, зашумлённое изображение  $C = B + N$ . Каждый элемент матрицы  $N(i,j)$  – случайное число, распределённое по Гауссу с матожиданием 0. Здесь мы воспользовались тем, что распределение Пуассона, описывающее фотонный шум, при  $U \gg 1$  переходит в распределение Гаусса. Для заданного возвышения Солнца над горизонтом примем, что максимальный сигнал (4095 ур. АЦП) достигается при альбедо 0,9. Конечно, это не соответствует действительности, так как при малом исходном сигнале (в электронах) оцифрованный сигнал (уровни АЦП) тоже будет небольшим, а 4095 уровней АЦП соответствуют исходному сигналу, равному зарядовой ёмкости фотоприёмника. То есть мы «растягиваем» яркостную шкалу для визуализации результата. После процедуры зашумления снимка В значения всех элементов матрицы С ограничиваются пределами [0...4095].



**Рисунок 1.**

**ФПМ системы и её аппроксимация многочленом. Отметим, что здесь применена безразмерная пространственная частота, нормированная на частоту Найквиста (55,56 пар линий на мм)**

На рисунках 2-4 показаны фрагменты передискретизованного аэрофотоснимка А, изображения на фокальной плоскости объектива В и зашумлённого изображения С соответственно. Все три фрагмента включают в себя четыре трёхшпальных мира (слева вверху).



**Рисунок 2. Снимок А**



**Рисунок 3. Снимок В**



**Рисунок 4. Снимок С**

Применим различные алгоритмы шумоподавления для исправления изображения  $S$ , при этом зашумлённость соответствует возвышению Солнца  $h_s=5$  градусов.

**Медианная фильтрация скользящим окном 3x3 пикселя**

Одним из наиболее известных фильтров является медианный [2]. Яркость каждого пикселя изображения заменяется на медиану яркостей 9 пикселей, расположенных в квадрате 3x3 с центром в рассматриваемом пикселе.

**Псевдомедианная фильтрация скользящим окном 3x3 пикселя**

Данный алгоритм описан в статье [3] и задаётся формулой:

$$C_{\text{фи}}(i,j) = \text{med}(y_1, y_2, y_3)$$

где  $y_1, y_2, y_3$  – медианы яркостей пикселей строк окна 3x3:

$$y_1 = \text{med}(C(i-1,j-1), C(i-1,j), C(i-1,j+1));$$

$$y_2 = \text{med}(C(i,j-1), C(i,j), C(i,j+1));$$

$$y_3 = \text{med}(C(i+1,j-1), C(i+1,j), C(i+1,j+1));$$

**Фильтрация методом среднего геометрического**

Здесь яркость каждого пикселя изображения заменяется на среднее геометрическое значение яркостей 9 пикселей из окрестности 3x3.

Результаты обработки этими фильтрами показаны на рисунках 6-8.

Из рисунков 5-8 видно, что среднегеометрическая и псевдомедианная фильтрация хорошо подавляют шум на однородных участках местности. Однако при этом происходит сильное размывание изображения трёхшпальных мостов. Медианная и среднегеометрическая фильтрации превращают мосты в размытое пятно почти круглой формы. Это сильно ухудшает ЛРМ, определяемое, как известно, по «критерию трёхшпальной мостовой» [1].



**Рисунок 5.**  
**Снимок  $S$**



**Рисунок 6.**  
**Медиана**



**Рисунок 7.**  
**Псевдомедианный**



**Рисунок 8.**  
**Среднегеометрический**

**Адаптивный фильтр**

Основным видом шума на снимках является фотонный шум [1]. Таким образом, величина СКО шума зависит от яркости пикселя. Желательно создать алгоритм шумоподавления, учитывающий свойства изображения, изменяющиеся от пикселя к пикселю. Идея такого фильтра описана в [2, с. 355]. Возникают три требования к его:

- СКО шума должно вычисляться по величине сигнала в пикселе;
- резкие перепады яркости не должны сильно изменяться, так как это приводит к описанному выше размыванию контуров;
- если значения яркостей в окне 3x3 отличаются незначительно, то необходимо применить

усредняющую фильтрацию, так как здесь имеет место зашумление однородного участка местности.

Таким образом, возможна реализация алгоритма из двух ветвей:

- ветвь 1: если (контуры есть), то  $C_{\text{fil}}(i,j) = f( C(i,j) ; \text{noise}(i,j) )$ , где  $f(a,b)$  – целночисленная функция;

- ветвь 2: если ( контуров нет ), то  $C_{\text{fil}}(i,j) = \text{med}( y1, y2, y3 )$ .

При этом шум  $\text{noise}(i,j) = \frac{4095}{P_{\text{зар}}} \cdot \sqrt{C(i,j) \cdot \frac{P_{\text{зар}}}{4095}}$  при зарядовой ёмкости  $P_{\text{зар}}$ .

### ***Адаптивный алгоритм на основе псевдомедианной фильтрации***

Предложим следующие варианты адаптивного алгоритма.

Вариант 1. В качестве признака наличия контуров в окне 3x3 пикселя E примем условие, что  $\max(E) / \min(E) > 2$ . Тогда:

- ветвь 1: если (  $\max(E) / \min(E) \geq 2$  ), то  $C_{\text{fil}}(i,j) = C(i,j) + \text{noise}(i,j) * (1 - C(i,j) / \text{med}( y1, y2, y3 ) )$ ;

- ветвь 2: если (  $\max(E) / \min(E) < 2$  ), то  $C_{\text{fil}}(i,j) = \text{med}( y1, y2, y3 )$ .

Вариант 2. В качестве признака наличия контуров в окне 3x3 пикселя E примем условие, что  $\text{СКО}(E) / \text{noise}(i,j) \geq 3$ . То есть фактическое СКО шума в окне 3x3 пикселя в 3 раза больше, чем шум в пикселе  $C(i,j)$ . Тогда:

- ветвь 1: если (  $\text{СКО}(E) / \text{noise}(i,j) \geq 3$  ), то  $C_{\text{fil}}(i,j) = C(i,j) + \text{noise}(i,j) * (1 - C(i,j) / \text{med}( y1, y2, y3 ) )$ ;

- ветвь 2: если (  $\text{СКО}(E) / \text{noise}(i,j) < 3$  ), то  $C_{\text{fil}}(i,j) = \text{med}( y1, y2, y3 )$ .

На рисунках 11-12 показаны два варианта алгоритма:



***Рисунок 9.  
Снимок С***



***Рисунок 10.  
Псевдомедианный***



***Рисунок 11.  
Вариант 1***



***Рисунок 12.  
Вариант 2***

### ***Фильтр, учитывающий направление контуров***

Исследуем возможность построения адаптивного фильтра, учитывающего наличие контуров в окне 3\*3 пикселя. Как известно, градиент функции двух переменных  $U(x,y)$  является вектором, задающим направление наибольшего изменения функции. Соответственно, при наличии в окне контура вектор-градиент будет перпендикулярен этому резкому краю. Тогда будем усреднять яркости пикселей именно вдоль направления контура, чтобы не допустить его размывания.

$$C_{\text{fil}}(i, j) = a \cdot C(i, j) + b \cdot \left( (\sin\theta)^2 \cdot \frac{C(i, j-1) + C(i, j+1)}{2} + (\cos\theta)^2 \cdot \frac{C(i-1, j) + C(i+1, j)}{2} \right)$$

При этом  $a+b=1$ , что необходимо для неизменности средней яркости изображения однородной поверхности. Угол  $\theta$ , являющийся углом между вектором-градиентом и осью X, определяется как:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\frac{\partial U}{\partial y}}{\frac{\partial U}{\partial x}} = \frac{C(i+1, j) - C(i, j)}{C(i, j+1) - C(i, j)}$$

Очевидно, что при  $\theta = 0$  (контур вертикальный) будет иметь место усреднение (с разными весами) по трём пикселям одного столбца:

$$C_{\text{fil}}(i, j) = a \cdot C(i, j) + b \cdot \left( \frac{C(i-1, j) + C(i+1, j)}{2} \right)$$

Отметим, что угловые пиксели окна  $3 \times 3$  не участвуют в вычислениях, поэтому для диагональных контуров будет иметь место размытие. При величине угла  $\theta = \pm 45^\circ$  усреднение примет вид:

$$C_{\text{fil}}(i, j) = a \cdot C(i, j) + \frac{1}{2} \cdot b \cdot \left( \frac{C(i, j-1) + C(i, j+1)}{2} + \frac{C(i-1, j) + C(i+1, j)}{2} \right)$$

Результаты применения алгоритма для различных значений параметров  $a$  и  $b$  показаны на рисунках 13-16.



**Рисунок 13.**  
 $a=0,2$

**Рисунок 14.**  $a=0,33$

**Рисунок 15.**  $a=0,5$

**Рисунок 16.**  
 $a=0,7$

Для улучшения передачи негоризонтальных и невертикальных контуров введём в алгоритм ветвь, учитывающую величины угловых пикселей окна  $3 \times 3$ .

Если  $30^\circ < |\theta| < 60^\circ$ , то:

1а) Если  $|C(i-1, j-1) - C(i+1, j+1)| < |C(i-1, j+1) - C(i+1, j-1)|$ , то

$$C_{\text{fil}}(i, j) = a \cdot C(i, j) + b \cdot \left( \frac{C(i-1, j-1) + C(i+1, j+1)}{2} \right)$$

1б) иначе

$$C_{\text{fil}}(i, j) = a \cdot C(i, j) + b \cdot \left( \frac{C(i-1, j+1) + C(i+1, j-1)}{2} \right)$$

Если  $|\theta| < 30^\circ$  или  $|\theta| > 60^\circ$

$C_{fil}(i, j) =$

$$= a \cdot C(i, j) + b \cdot \left( (\sin\theta)^2 \cdot \frac{C(i, j-1) + C(i, j+1)}{2} + (\cos\theta)^2 \cdot \frac{C(i-1, j) + C(i+1, j)}{2} \right)$$

Таким образом, ветвь 1а работает, когда контур можно считать диагональным и при этом в верхней части окна 3\*3 контур находится сверху, а в правой части окна контур находится внизу окна.

### **Шумоподавление на основе лапласиана**

Выявлять контуры и неоднородности в окне 3\*3 можно также с помощью различных видов оператора Лапласа (лапласиана) [2]. Определим его следующим образом:

$$Lap(i, j) = \left| \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right| = |(C(i, j-1) + C(i, j+1) - 2 \cdot C(i, j)) + (C(i-1, j) + C(i+1, j) - 2 \cdot C(i, j))|$$

Очевидно, что для белой точки на чёрном фоне получится, что  $Lap(i, j) = 2 \cdot |0+0-4095| = 8190$ . Для абсолютно резкой горизонтальной белой линии на чёрном фоне имеем, что  $Lap(i, j) = |0+0-4095| = 4095$ .

Тогда рассмотрим следующий алгоритм, основанный на трёх пороговых значениях лапласиана в рассматриваемой точке снимка (i,j).

- если  $Lap(i, j) < 200$ , то  $C_{fil}(i, j) = \langle S_{ij} \rangle$

- если  $Lap(i, j) < 600$ , то  $C_{fil}(i, j) = 0,3 \cdot C(i, j) + 0,7 \cdot \langle S'_{ij} \rangle$

- если  $Lap(i, j) < 1000$ , то  $C_{fil}(i, j) = 0,7 \cdot C(i, j) + 0,3 \cdot \langle S'_{ij} \rangle$ .

Иначе  $C_{fil}(i, j)$  не изменяется.

Здесь  $S_{ij}$  - окно 3\*3 пикселя, а  $S'_{ij}$  - проколотая окрестность точки (i,j), то есть окно 3\*3 без центрального пикселя. Соответственно,  $\langle S_{ij} \rangle$  обозначает среднее значение по 9 пикселям, а  $\langle S'_{ij} \rangle$  - среднее значение сигнала 8 пикселей.

Таким образом, в ветви 4 мы отказываемся от изменения сигнала в точках с очень сильными локальными неоднородностями, чтобы избежать размывания мелких деталей и резких контуров. Наоборот, для равнорядных участков работает ветвь 1, усредняющая с одинаковыми весами все 9 пикселей окрестности.

Применим описанный алгоритм для предварительного шумоподавления, проводимого перед инверсной фильтрацией. Псевдоизображение оператора Лапласа Lap и результат фильтрации  $C_{fil}$  для разных возвышений Солнца  $h_s$  показаны на рисунке 17.



**Рисунок 17.  $Lap$   $C_{fil}, h_s=2^\circ$   $C_{fil}, h_s=5^\circ$   $C_{fil}, h_s=10^\circ$**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведём количественное сравнение работы исследованных алгоритмов, анализируя соотношение «сигнал/шум». Данную величину определим как СКО яркостей окна 5\*5 пикселей в изображении однородной площадки (асфальта). Кроме того, опишем количественно ухудшение резкости изображений путём вычисления функции передачи контраста (ФПК) для мира с периодом 4 пикселя (0,5 частоты Найквиста).

*Таблица 1.*

Алгоритм	SNR	ФПК $0,5*v_N$	ФПК $1*v_N$
Исх.снимок С, $h_s=5^\circ$	58	-	-
Ср.геом	174	0,41	0,32
Пс-мед.	82	0,91	0,88
Вариант 1	82	1	0,84
Вариант 2	82	1	1
Градиентный	82	1	0,99
Лапласианный	89	0,99	0,68

Анализ рисунков 9-17 и таблица 1 показывают, что наилучший баланс между выравниванием яркостей однородных участков и сохранением резкости краёв обеспечивает градиентный алгоритм.

### *Список литературы:*

1. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга: учебное пособие – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 234 с.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
3. Акиншин Н. С., Есиков О.В. Псевдомедианная фильтрация для обработки оптических изображений.// Материалы XII научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». – Калуга: Манускрипт, 2015. – 436 с.



# ИЗГИБ СТРОК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

ВОРОНИН Е.Г.

**Филиал АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС»  
г. Москва, Зеленоград**

**E-mail:** optecs@samspace.ru

Современные оптико-электронные космические снимки, получаемые сканирующими съёмочными системами со светочувствительными элементами на основе ПЗС-матриц, представляют собой составные изображения со сложной геометрией. Её корректное и полное математическое описание является важным условием обеспечения высокой точности фотограмметрической обработки таких снимков при решении координатно-измерительных задач на земной поверхности.

Разработанные к настоящему времени математические (геометрические) модели оптико-электронной космической съёмки учитывают характерные особенности съёмочной аппаратуры и, как правило, достаточно адекватно описывают реальный физический процесс формирования изображений местности. По оценкам специалистов они обеспечивают геометрическую сшивку съёмочных маршрутов с рассогласованием геодезических координат общих точек в соседних сканах в пределах 0.3 пикселя [1].

Однако, при этом, как показал опыт картографирования с использованием данных оптико-электронной космической съёмки в производственных подразделениях Топографической службы Вооружённых Сил Российской Федерации, может возникать деформация съёмочного маршрута в виде параболического изгиба строк от середины к краям вдоль всего съёмочного маршрута, которую можно представить неким подобием жёлоба. В разной степени такая деформация наблюдается на трансформированных в картографическую проекцию снимках, полученных космическими аппаратами «Ресурс-ДК», «Ресурс-П» и другими, особенно при больших углах съёмки.

Этот факт наводит на предположение о недостаточной изученности физических законов формирования оптико-электронных космических снимков и заставляет вернуться к вопросу их математического моделирования.

Целью настоящей статьи является установление причин этого явления и разработка предложений по устранению его негативных последствий.

Известно [2], что одним из свойств центральной проекции является непрерывное изменение масштаба наклонного снимка по всему полю изображения. При оптико-электронной космической съёмке изменение масштаба изображения, проектируемого в фокальной плоскости на ПЗС-матрицы, влечет необходимость соответствующего изменения скорости движения изображения от пикселя к пикселю вдоль всего оптико-электронного преобразователя (ОЭП). Это требует обеспечения индивидуальной частоты переноса заряда по каждой колонке ПЗС-матриц.

Однако, для получения изображения с требуемым визуальным качеством в большинстве режимов съёмки такое усложнение работы оптико-электронного преобразователя оказывается излишним. Поэтому незначительное изменение масштаба изображения, проектируемого на ОЭП, вообще игнорируется, а если это невозможно, то проблема решается программным разделением оптико-электронного преобразователя на зоны электронной компенсации сдвига изображения, в каждой из которых задаётся своя частота переноса заряда. Задаваемая частота определяет электронную скорость движения изображения и рассчитывается для середины зоны компенсации в соответствии с оптической скоростью движения изображения в этой точке.

Но, если на всех колонках ПЗС-матриц в пределах зоны компенсации электронная скорость

движения изображения одинакова, то оптическая скорость движения изображения почти всегда разная вследствие изменения масштаба изображения центральной проекции вдоль оптико-электронного преобразователя (поперёк линии направления съёмки).

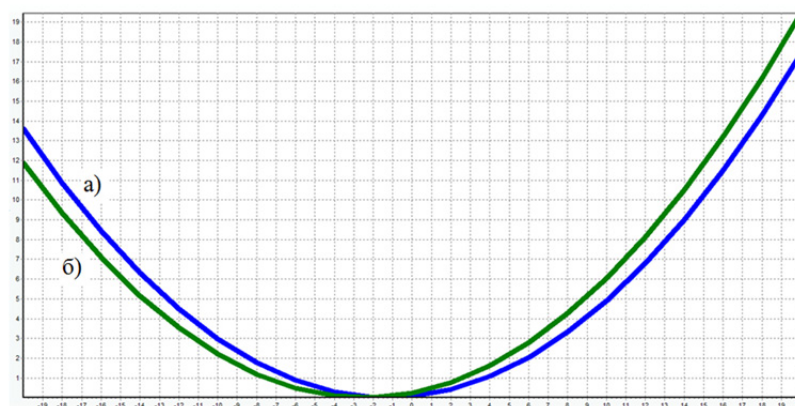
Очевидно, чем больше угол наклона съёмочной аппаратуры и чем дальше некоторая колонка какой-либо ПЗС-матрицы из зоны компенсации отстоит от середины этой зоны, тем больше фактическая электронная скорость движения изображения отличается от её теоретического значения, соответствующего оптической скорости движения изображения в этой точке. Это означает, что несоответствие электронной и оптической скоростей движения изображения на краю зоны компенсации всегда больше, чем в её центральной части. Если же весь ОЭП работает в режиме одной зоны компенсации сдвига изображения, то наибольшие рассогласования электронной и оптической скоростей движения изображения будут наблюдаться на концах ОЭП, то есть на краях съёмочного маршрута.

Рассогласование электронной и оптической скоростей движения изображения приводят к геометрическим смещениям точек съёмочного маршрута вдоль линии направления съёмки. Эти смещения являются дополнительными к тем, которые определяются, так называемой, «глубиной скобы» - знакопеременными технологическими смещениями ПЗС-матриц относительно продольной оси ОЭП.

Природа этих и других дополнительных смещений точек оптико-электронных космических снимков детально рассмотрена в работе [3]. Там же представлены формулы, связывающие дополнительное продольное смещение на общих (одноимённых, связующих) точках между смежными ПЗС-матрицами со скоростями движения изображения на этих матрицах. Опуская достаточно громоздкий вывод этих формул и не приводя их здесь, заметим только, что разность обратных значений скоростей движения изображения на смежных ПЗС-матрицах, умноженная на «глубину скобы», представляет собой дополнительное продольное смещение одноимённых точек.

Отсюда следует, что дополнительные продольные смещения точек оптико-электронных космических снимков на краях зон компенсации сдвига изображения, где разность электронной и оптической скоростей движения изображения заметнее, будут больше, чем внутри зоны компенсации.

Анализ измерений координат общих точек в перекрытиях смежных ПЗС-матриц на реальных оптико-электронных космических снимках, полученных аппаратурой «Сангур-1» и «Сангур-1У», показал справедливость этого теоретически полученного заключения. Наблюдается следующая закономерность.



**Рисунок 1.**

**Графики зависимости абсолютной величины продольного смещения на одноимённых точках (в пикселях) от угла тангажа (в градусах): а) - для смежных ПЗС-матриц, расположенных в середине ОЭП; б) - для ПЗС-матриц, расположенных на краю ОЭП**

При постоянной скорости движения изображения на всём оптико-электронном преобразователе и съёмке в надир дополнительные продольные смещения имеют минимальные значения в

середине ОЭП и увеличиваются к его концам. При изменении угла крена минимум значений дополнительных продольных смещений смещается в сторону одного из концов ОЭП, на котором масштаб проектируемого изображения крупнее. С увеличением абсолютного значения угла наклона съёмочной аппаратуры разброс (отношение наибольшего к наименьшему) дополнительных продольных смещений на маршруте возрастает. Это происходит за счёт увеличения значений дополнительных продольных смещений точек снимков на краях ОЭП. Такое изменение дополнительных продольных смещений в работе [3] иллюстрируется следующими графиками.

**Таблица 1. Модули средних значений и дисперсии (в скобках) продольных смещений на одноимённых точках между смежными ПЗС-матрицами, в пикселях**

Номера ПЗС-матриц	Номера маршрутов и углы наклона на начало съёмки				
	03415_03 тангаж = -2,4°, крен = 40,8°	03507_06 тангаж = -1,0°, крен = 18,1°	01758_06 тангаж = 0,8°, крен = -13,7°	00763_04 тангаж = 0,3°, крен = -5,7°	03505_07 тангаж = 0,01°, крен = 0,4°
1 и 2	12,8 (0,219)	3,8 (0,041)	5,7 (0,034)	3,5 (0,033)	–
2 и 3	11,8 (0,250)	3,4 (0,089)	5,6 (0,033)	3,5 (0,042)	–
3 и 4	11,5 (0,166)	3,4 (0,005)	5,5 (0,005)	3,0 (0,000)	–
4 и 5	10,4 (0,130)	2,7 (0,037)	5,5 (0,076)	3,3 (0,043)	–
5 и 6	9,5 (0,098)	2,7 (0,035)	4,7 (0,037)	3,0 (0,000)	–
6 и 7	8,6 (0,179)	1,8 (0,046)	4,9 (0,038)	3,2 (0,060)	-
7 и 8	7,4 (0,160)	1,6 (0,049)	4,9 (0,046)	3,3 (0,047)	2,0 (0,000)
8 и 9	6,5 (0,267)	1,4 (0,005)	4,7 (0,042)	3,1 (0,060)	2,0 (0,002)
9 и 10	4,7 (0,194)	0,2 (0,038)	5,7 (0,033)	4,3 (0,040)	3,0 (0,002)
10 и 11	2,9 (0,123)	1,2 (0,035)	6,2 (0,058)	5,0 (0,000)	4,0 (0,002)
11 и 12	4,0 (0,134)	0,4 (0,096)	3,8 (0,032)	3,0 (0,001)	2,0 (0,002)
12 и 13	3,1 (0,112)	0,2 (0,037)	3,8 (0,029)	2,7 (0,119)	2,0 (0,000)
13 и 14	2,6 (0,178)	0,1 (0,041)	3,4 (0,072)	2,4 (0,096)	1,8 (0,058)
14 и 15	1,3 (0,240)	1,0 (0,049)	3,6 (0,105)	2,7 (0,080)	2,1 (0,045)
15 и 16	0,4 (0,334)	1,2 (0,033)	3,5 (0,100)	2,7 (0,051)	2,0 (0,000)
16 и 17	0,1 (0,329)	1,2 (0,034)	2,8 (0,078)	2,5 (0,134)	2,0 (0,000)
17 и 18	0,3 (0,252)	1,0 (0,021)	2,0 (0,070)	1,7 (0,037)	1,3 (0,056)
18 и 19	2,4 (0,249)	2,5 (0,087)	3,4 (0,026)	2,9 (0,043)	3,0 (0,001)
19 и 20	3,8 (0,245)	3,4 (0,005)	3,7 (0,111)	3,6 (0,098)	3,3 (0,056)
20 и 21	5,0 (0,196)	4,2 (0,034)	3,7 (0,112)	3,7 (0,058)	4,0 (0,000)
21 и 22	3,5 (0,278)	2,2 (0,033)	1,4 (0,076)	1,6 (0,040)	1,5 (0,059)
22 и 23	4,8 (0,278)	3,2 (0,034)	1,6 (0,104)	1,8 (0,093)	2,0 (0,000)
23 и 24	4,8 (0,224)	2,3 (0,033)	0,4 (0,048)	0,8 (0,062)	1,0 (0,000)
24 и 25	6,3 (0,289)	3,3 (0,046)	0,8 (0,041)	1,4 (0,013)	1,7 (0,058)
25 и 26	6,0 (0,305)	2,4 (0,072)	0,2 (0,037)	0,3 (0,033)	0,7 (0,056)
26 и 27	8,2 (0,280)	4,2 (0,035)	0,5 (0,090)	1,3 (0,027)	2,0 (0,000)
27 и 28	9,7 (0,397)	5,2 (0,034)	0,9 (0,049)	2,1 (0,060)	2,8 (0,052)
28 и 29	9,5 (0,439)	4,2 (0,033)	0,2 (0,033)	0,6 (0,040)	1,1 (0,049)
29 и 30	11,1 (0,426)	5,3 (0,033)	0,1 (0,045)	1,4 (0,012)	2,0 (0,075)
30 и 31	12,2 (0,381)	6,4 (0,197)	0,2 (0,204)	1,7 (0,056)	-
31 и 32	13,3 (0,376)	6,2 (0,038)	0,2 (0,036)	1,2 (0,051)	-
32 и 33	13,7 (2,070)	6,0 (0,046)	1,0 (0,045)	0,5 (0,016)	–

В качестве реальных примеров дополнительных продольных смещений общих точек в перекрытиях ПЗС-матриц вдоль ОЭП в таблице 1 приведены модули средних значений этих смещений, взятые из протоколов обработки пяти съёмочных маршрутов с разными углами съёмки. Все маршруты получены панхроматической аппаратурой «Сангур1У» космического аппарата «Ресурс-П». Для удобства визуального восприятия представленных данных минимальные значения дополнительных продольных смещений выделены заливкой. В последней колонке таблицы 1 явного минимума не существует, поскольку угол съёмки на этом маршруте близок к нулю.

Сопоставление общего вида графиков рисунка 1 и характера изменения измеренных смещений в колонках таблицы 1 показывает их подобие.

Таким образом, на оптико-электронных космических снимках объективно возникают продольные геометрические смещения, обусловленные рассогласованием электронной и оптической скоростей движения изображения по колонкам ПЗС-матриц. Эти смещения вызывают деформацию съёмочного маршрута, замеченную при картографировании в ТС ВС РФ.

Анализ полученных данных показывает, что абсолютные значения дополнительных продольных смещений возрастают при:

- увеличении угла съёмки (наклона съёмочной аппаратуры относительно линии надира);
- увеличении длины оптико-электронного преобразователя;
- увеличении ширины зон электронной компенсации сдвига изображения;
- увеличении «глубины скобы».

Представляются четыре основных способа обеспечения противодействия этому явлению:

- технический;
- конструкторский;
- методический;
- математический.

Технический способ обеспечивает кардинальное решение проблемы и заключается в обеспечении аппаратного согласования электронной и оптической скорости движения изображения для всех пикселей оптико-электронного преобразователя во время съёмки. Однако, его практическая реализация может оказаться технически проблематичной.

Конструкторский способ предполагает разработку съёмочной аппаратуры с относительно короткими оптико-электронными преобразователями, с предельно узкими зонами компенсации сдвига изображения и с минимально возможной «глубиной скобы». Этот способ не позволит полностью избежать возникновения рассматриваемой геометрической деформации снимков, но может существенно её уменьшить.

Методический способ также позволяет уменьшить возникающие геометрические смещения и предусматривает планирование и организацию надирной съёмки без наклона съёмочной аппаратуры по крену и тангажу. Однако, он эффективен только для относительно коротких оптико-электронных преобразователей или при достаточной узких зонах электронной компенсации сдвига изображения.

Конструкторский и методический способ взаимно дополняют друг друга, но противоречат современным трендам на увеличение полосы захвата и полосы обзора дистанционного зондирования Земли из космоса.

Математический способ решения проблемы требует доработки математической модели оптико-электронной космической съёмки с целью вычисления и ввода соответствующих поправок в координаты точек трансформируемых в картографическую проекцию изображений.

Теоретически искомые поправки  $\Delta p$  к координатам точек съёмочных маршрутов (к номерам строк исходных снимков) могут быть вычислены по приближённой формуле, приведённой в работе [3]:

$$\Delta p \approx g \cdot \left( 1 - \cos \left( \gamma \pm \arctg \left( \sqrt{l^2 + Y_0^2 / f} \right) \right) \right)$$

где:

$g$  – «глубина скобы»;

$\gamma$  – угол наклона съёмочной аппаратуры;

$l$  – расстояние от проекции главной точки на продольную ось ОЭП до заданного пикселя;

$Y_0$  – расстояние от главной точки фокальной плоскости вдоль линии направления съёмки до продольной оси ОЭП;

$f$  – фокусное расстояние съёмочной аппаратуры.

Заметим, что графики, представленные на рисунке 1, построены именно для функции  $\Delta p$ .

Практическая реализация математического способа, основанного на введении поправок к координатам точек исходных снимков, требует существенной доработки математической (геометрической) модели оптико-электронной космической съёмки. Она обусловлена тем, что линейные смещения  $\Delta p$  точек снимков приводят к необходимости вычисления соответствующих поправок к времени формирования этих точек. Для этого нужны значения рассогласований электронной и оптической скоростей движения изображения. Поскольку оптическая скорость движения изображения неизвестна, то она должна быть вновь получена для середины каждой зоны компенсации сдвига изображения. После этого, приравняв полученные значения к измеренным на снимках значениям электронной скорости движения изображения в тех же точках, могут быть вычислены значения рассогласований оптической и электронной скоростей движения изображения в любых других точках снимков.

Таким образом, рассмотренное явление характерной деформации оптико-электронных космических снимков при их трансформировании в картографическую проекцию имеет физические причины и объясняется рассогласованием электронной и оптической скоростей движения изображения в ходе съёмки.

Пути преодоления, минимизации и устранения негативных последствий этого явления представляются ясными. Однако, их реализация требует дополнительной проработки.

#### *Список литературы:*

1. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / Под ред. Еремеева В. В. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. - 460 с. - ISBN 978-5-9221-1596-4.
2. Лобанов А.Н. Фотограмметрия: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. - М., «Недра», 1984, – 552 с.
3. Воронин Е.Г. Исследование проблемы надёжности фотограмметрической обработки оптико-электронных космических снимков / Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. - Москва, 2016. - 265 с.

# О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СТАНЦИИ МОНИТОРИНГА КОСМОСА

МИРОХИН А.В., \*ЯКОВЧУК Е.А.

ПАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева», г. Красногорск  
\*3 научная рота Космических войск ВКС

E-mail: geneayak@gmail.com

Современные оптико-электронные станции часто имеют в приемном канале широкоформатные ПЗС-матрицы. Они позволяют производить обзор звездного неба в высоком качестве, что стало основой качественного сопровождения и распознавания космических объектов.

Однако в ходе исследований было выявлено, что действующими алгоритмами широкоформатные снимки, полученные ПЗС-матрицами, не успевают обрабатываться за установленное время. Как вариант, были рассмотрены горизонтальное и вертикальное масштабирование телевизионного изображения, но это ведет к повышению цены, энергопотребления и сложности обслуживания. Была поставлена задача – существенно увеличить скорость обработки видеок кадров, не изменяя архитектуру аппаратной части вычислительной системы.

Анализ существующего аппаратного комплекса позволил выявить возможность оптимизации алгоритмов, используя технологию гетерогенных вычислений, т.е. вычислений, использующих различные типы вычислительных блоков. В данном случае, это центральный и графический процессоры с использованием технологии CUDA.

С учетом наложенных технических ограничений и потребностей был разработан алгоритм обработки видеопотока, который включает в себя несколько основных стадий: предобработка, выделение областей объектов, кластеризация изображения, проверка наложенных следов, расчет параметров объекта.

Первым шагом происходит расчёт гистограммы и ее усечение для экономии памяти. Далее, применяется теория вероятностей. Работая с гистограммой, как с нормальным распределением, можно разделить пиксели на принадлежащие объектам и фоновые. Для этого рассчитывается математическое ожидание и отклонение.

Зная эти значения, возможно отсеять фон, пикселей которого на снимке является абсолютное большинство. Таким образом, получается маска изображения. На этом же этапе происходит чистка кадра от шума. Таким образом, получается маска объектов.

Далее строится граф зависимостей пикселей друг от друга и происходит их кластеризация для разделения на объекты.

Подобной обработке подвергаются коллекции из нескольких изображений. Обнаруженные на них объекты накладываются друг на друга, получая наложенный след. Неподвижные звезды остаются на одном месте, а подвижные объекты-спутники смещаются.

Разрабатываемое программное обеспечение с применением гетерогенных вычислений позволит существенно сократить время обработки на отдельных этапах. В свою очередь, это позволяет повысить скорость и качество обработки видеопотока, увеличить количество обрабатываемых объектов, уменьшить вероятность ложной тревоги, что отвечает современным требованиям.

# ОСОБЕННОСТИ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ОБЪЕКТОВ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА И ВОЗМОЖНЫЙ ВАРИАНТ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ИХ УТИЛИЗАЦИИ

\*САМБАРОВ Г.Е., САУТКИН В.А.

**\*3 научная рота Космических войск ВКС  
ПАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева», г. Красногорск**

**E-mail:** detovelli@vtomske.ru

В настоящее время одной из наиболее актуальных тенденций в науке и технике является повышение требований к точности получаемых данных. Это в значительной степени относится к проблемам освоения космического пространства. По данным американской службы контроля космического пространства NASA в околоземном космическом пространстве на сегодня находится более 22000 объектов искусственного происхождения размером от 10 см и более, а так же значительное количество объектов естественного происхождения. Вся эта совокупность управляемых и неуправляемых объектов стала частью околоземной космической среды, эволюция которой происходит по законам небесной механики. Для исследования и определения местоположения этих объектов необходимо создание высокоточной математической модели, которая должна учитывать возмущающие воздействия соответствующего уровня точности (адекватности).

На орбиту движущегося в околоземном космическом пространстве тела действуют различные силы, которые обусловлены притяжением Луны и Солнца, приливными деформациями центрального тела, световым давлением, релятивистскими эффектами, возмущением от сопротивления атмосферы и другие факторы, неизбежно приводящие к дрейфу объектов околоземного космического пространства.

В работе исследуются возмущения движения космических объектов (КО), вызванные несферичностью геопотенциала Земли и анализ его влияния на характера их орбитального движения.

Для решения поставленной задачи интегрирование дифференциальных уравнений движения КО в данной работе выполнялось с использованием численного метода интегрирования Эверхарта. Общую теорию интегратора Эверхарта и программный код GAUSS\_15, который был использован для проведения исследований динамики околоземных объектов, представленных в данной работе, можно найти в работе В.А. Авдюшева.

На геосинхронных орбитах проблема засоренности пространства стоит довольно остро. Проблема в том, что из-за несферичности геопотенциала Земли на геостационарной орбите проявляются неоднородности движения объектов, которые подразделяются на несколько типов:

- объекты с устойчивым движением, объекты либрирующие около точки 75 градусов,
- объекты либрирующие около точки 255 градусов,
- объекты либрирующие около двух точек либрации,
- объекты, имеющие неустойчивое движение.

Главную трудность в геостационарной зоне представляют объекты, либрирующие около двух точек либрации и объекты, движение которых является неустойчивым, так как они представляют основную группировку объектов космического мусора на геосинхронных орбитах и их орбиты могут пересекать орбиты действующих спутников.

Исследование влияния вековых резонансов на орбитальную эволюцию отработавших космических объектов показало, что объекты всех существующих и разрабатываемых космических

систем подвержены влиянию большого количества вековых резонансов, и это необходимо учитывать при выборе параметров орбит утилизации. В работе представлено исследование орбит околоземного пространства, а так же, приведен подбор возможных орбит для утилизации объектов.

*Список литературы:*

1. Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А., Самбаров Г.Е. Способ оценки влияния модели сил на систематическую ошибку определения областей возможных движений астероидов // Изв. вузов. Физика. – 2013.– Т. 56. – № 6/3. – С.235–237.

2. Самбаров Г.Е., Сюсина О.М. Оценивание влияния ошибок модели движения астероидов, сближающихся с землей, на точность построения доверительных областей // Вестник СибГАУ. 2014. №4(56) , С. 111–118

3. Самбаров Г.Е., Сюсина О.М. Оценивание возмущающих ускорений в вероятностных моделях движения потенциально опасных астероидов// Физика космоса: Тр. 44 Междунар. студ. науч. конф., Екатеринбург, 2-6 февр. 2015г.- Екатеринбург: УрГУ. 2015.-С. 194.

Авдюшев В.А. Интегратор Гаусса—Эверхарта // Вычислительные технологии Т.15, №4, 2010 С.31-46.



# РАЗРАБОТКА, АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИЕМНОГО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КАНАЛА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

АЛЕЩЕВ А.А., КОЛИНЬКО В.И., КОЛОМИЙЦЕВ Е.Г\*., ЛЯХОВ А.Ю., САУТКИН В.А.

ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

\*ОАО «РусБИТех»

E-mail: sautkin@zenit-kmz.ru

Целью данной работы является создание математической модели оптико-электронного канала наблюдения для использования в перспективных разработках средств мониторинга космического пространства.

Актуальность работы состоит в создании математической модели типового оптико-электронного тракта прибора наблюдения, позволяющий моделировать работу приемной оптико-электронной системы в различной фоно-целевой обстановке и более точно спрогнозировать влияние параметров оптико-электронной системы, атмосферы и характеристик космического объекта на конечные результаты наблюдения.

Новизна состоит в уточнении математической модели приемного оптико-электронного канала для наблюдения космических объектов, что позволяет получить более точные и полные данные при анализе характеристик проектируемой оптико-электронной системы.

Решаемые задачи:

1. Разработка модели излучения околоземного космического объекта.
2. Разработка модели тракта прохождения излучения космический объект – оптико-электронный прибор. Разработка модели излучения фона.
3. Разработка модели оптико-электронного прибора и паразитных помех приемного канала.
4. Сквозная модель оптико-электронного тракта. Анализ и выбор критерия оценки качества тракта.
5. Оптимизация модели по выбранному критерию.
6. Отладка модели на контрольных задачах.

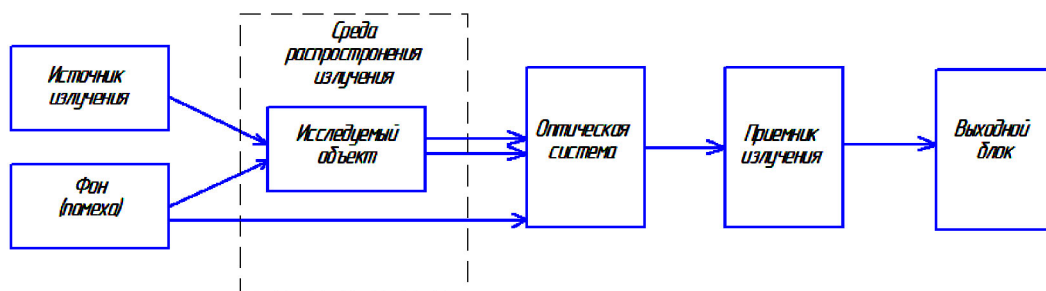


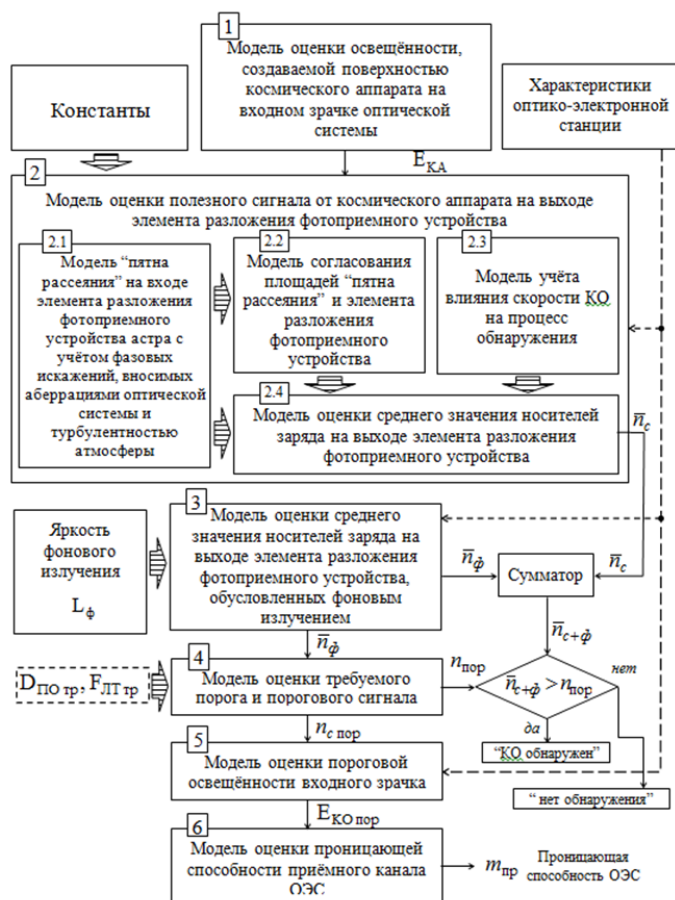
Рисунок 1.  
Обобщенная схема ОЭС

Обобщенная схема работы ОЭС включает в себя источник излучения - Солнце, анализируемый космический объект, среду распространения излучения, оптическую систему, приемник излучения и выходной блок. Источник излучения создает материальный носитель полезной информации – лучистый поток, порожденный Солнцем и отраженный от поверхности

космического объекта. Оптическая система формирует этот поток и направляет его на приемник излучения, превращая полезный сигнал от объекта, переносимый лучистым потоком, в электрический сигнал. Выходной блок формирует сигнал, по своим параметрам удовлетворяющей требованиям исполнительной автоматической системы.

Структурная схема математической модели представлена на рисунке 2. Особенности разработанной математической модели являются:

- моделирование “кружка рассеяния” в рабочем диапазоне длин волн принимаемого оптического излучения и излучения фона;
- возможность производить анализ изменения звездной величины КА в зависимости от геометрических, энергетических параметров и характеристик КА, параметров атмосферы, параметров оптической части, освещенности входного зрачка объектива, отношения сигнал-шум, параметров электронного тракта;
- учет яркости фоновое излучения неба от сумеречного до ночного с учетом его спектра;
- учет влияния aberrаций и турбулентности атмосферы на размер функции рассеяния, формируемой атмосферно -линзовым каналом;
- согласование размера кружка рассеяния с элементом разложения ПЗС матрицы;
- определение уровня сигнала и помехи с учётом различного спектра фоновое излучения;
- установка требуемого значения вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения полезного сигнала;
- оценка проникающей способности ОЭС при требуемом уровне фоновое сигнала для обнаружения полезного сигнала от наблюдаемого КА с требуемыми вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги.



**Рисунок 2.**  
**Структурная схема математической модели**

На рис. 2 представлена последовательность применения моделей, обеспечивающих оценку проникающей способности ОЭС, с учетом перечисленных выше функциональных зависимостей и возможностей модели.

*Список литературы:*

1. *Порфирьев Л.Ф.* Теория оптико-электронных приборов и систем: Учебн. пособие для приборостроительных вузов. – Л.: Машиностроение, 1980.-272 с.
2. *Якушенков Ю.Г.* Теория и расчет оптико-электронных приборов: Учебник для вузов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Советское радио, 1980, 392 с.
3. *Мартынов Д. Я.* Курс практической астрофизики. Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1977, 544 с.
4. *Якушенков Ю.Г.* Основы теории и расчета оптико-электронных приборов: Учебник для вузов. Изд-во «Советское радио», 1971, 336 с.
5. *Смирнов М.А., Лурье М.А., Дородницына О.А., Швалагин И.В.* Отчет. Исследование факторов, влияющих на эффективность наблюдений слабых небесных объектов. Уравнения для вычислений. – Академия наук СССР. Астрономический совет. Москва, 1983. – 41с.
6. *Шестов Н.С.* Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. М.: Советское радио, 1967, 348 с.

# МЕТОДИКА УЧЕТА СОСТОЯНИЯ ОБЛАЧНОСТИ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РАБОТЫ ОПТИЧЕСКОГО ИНФОРМАЦИОННОГО СРЕДСТВА В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

БАЙКОВ А.В.

ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

E-mail: baikov@zenit-kmz.ru

Предметом исследования в настоящем материале является изображение верхней полусферы, полученное от специализированной цифровой телевизионной камеры обзорного типа.

Целью настоящего исследования является выработка рекомендаций (методик) применительно к построению вычислительной схемы алгоритма формирования признаков, предназначенных для пространственно-временной оптимизации информационных, вычислительных и технологических ресурсов оптического средства.

Под учетом состояния ночной облачности, как правило, рассматривается задача формирования оцифрованных областей зоны ответственности оптических информационно-измерительных средств (ОС), имеющих установленный показатель интегральной прозрачности  $Q_{\text{атм}}$ .

В качестве исходных данных используется изображение верхней полусферы, поступающее от аппаратного комплекса (АК) обзорной цифровой телевизионной камеры (ЦТК) оптических информационно-измерительных средств.

Конфигурацию АК ЦТК можно условно разбить на три основных класса:

Широкоугольная ЦТК типа «FishEye» (рыбий глаз), обеспечивающая полный раскрыв поля зрения до 180 угл.град.

Сканирующая ЦТК с малым полем зрения  $\sim$  до 5 угл.град и высокой проникающей способностью.

Панорамная платформа 3D реальности, состоящая из 5-7 автономных видеоканалов с индивидуальными полями зрения.

Границы рабочих областей прозрачности можно определить как суперпозицию отдельных областей-сегментов произвольной формы, вырезаемых соответствующими телесными углами на поверхности сферы единичного радиуса, что вполне решается в полуавтоматическом режиме работы при наличии человека-оператора.

Результат оцифровки (линейное представление) выглядит как совокупность выпукловогнутых многоугольников, построенных в формате заданной картографической проекции. Необходимо также учесть вносимые оптикой искажения.

Для «полностью» автоматического режима работы оптических информационно-измерительных средств такой подход неприемлем в силу наличия технологических ограничений на исходные данные, вычислительные мощности, время исполнение задачи. что не позволяет создать универсальный алгоритм обработки исходных данных.

В автоматическом режиме под учетом состояния ночной облачности, в силу необходимости, будем рассматривать задачу построения не интегральной области прозрачности в пространстве всего раstra, а формирование отдельных локальных оцифрованных областей зоны ответственности ОС, имеющих в заданном направлении линии визирования оптической системы, а также установленный показатель интегральной прозрачности  $Q_{\text{атм}} = [0/1]$ .

Под локальной областью будем понимать область, вырезаемую на поверхности сферы единичного радиуса и содержащую маркеры прозрачности, а также ее «линейное» представление на картинной плоскости (в виде контура заданной формы), привязанной к текущему направлению линии визирования оптической системы. Оцифровка указанных областей ведется в контексте заданной картографической проекции.

Текущее положение линии визирования определено планом проведения работ по обслуживанию космических объектов (КО) искусственного и естественного происхождения в виде соответствующих координатных оценок (векторов) со своими ковариационными матрицами ошибок (D) в заданном пространстве координат ОС.

Перейдя из  $X_0Y_0Z_0$  к системе координат (СК), связанной с картинной плоскостью (СККП) относительно линии визирования (Рис.1), определим подлежащую анализу на предмет прозрачности область пространства для каждого такта планирования работ .

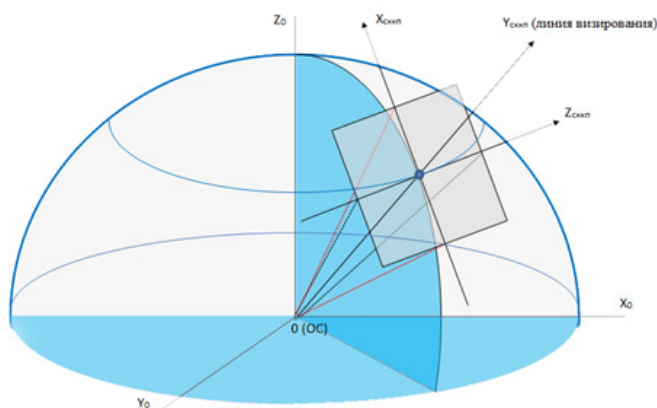


Рисунок 1.

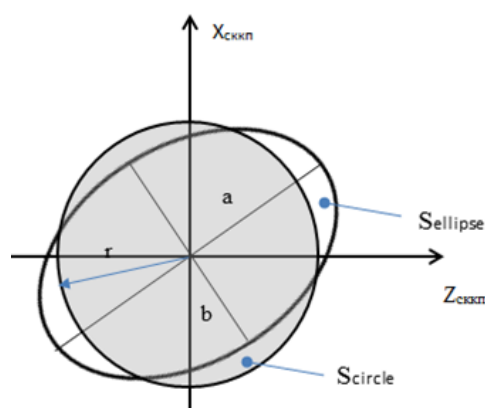


Рисунок 2.

На рис.2 показана картинная плоскость  $\{ X_{СККП}, Y_{СККП}=0, Z_{СККП} \}$  окружности рассеяния как проекции «эквивалентной» сферы ошибок объемом  $V_{circle}$  по заданному уровню СКО, сформированной на базе текущей ковариационной матрицы D в базовой системе координат  $X_0Y_0Z_0$ .

Параметры проекции, полуоси a,b и угол поворота полуосей, определяют  $\sigma_{xСККП}$  и  $\sigma_{zСККП}$ , т.е СКО по осям  $X_{СККП}, Z_{СККП}$  соответственно.

В случае отсутствия D используется максимально допустимое отклонение r (параметр-константа алгоритма как аналог радиус-вектора для окружность рассеяния) относительно оценки ЦУ, выбираемое из общих соображений с учетом априорных данных по КО – вид орбиты и тип КО, дальность, ТТХ ОС и т.д.

Таким образом, после преобразования в полярную систему координат, получим усредненную базовую оценку допустимого углового отклонения по полю ЦУ.

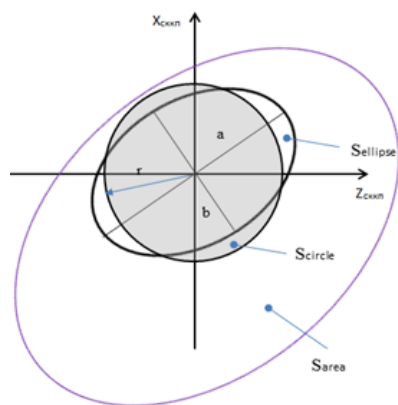
Для последующего принятия решения о возможности обслуживания заданного направления ( $Q_{атм}=1$ ) используется следующий критерий – если определенная выше область ошибок Scircle принадлежит «маркированной» области Sarea (ис. 3), идентифицируемой как область прозрачности, принимается решение о возможности обслуживания КО.

Если же указанное условие (Рис.4) не выполняется ( $Q_{атм}=0$ ), указанная точка ЦУ удаляется или задача обслуживание по ней переносится во времени или пространстве.

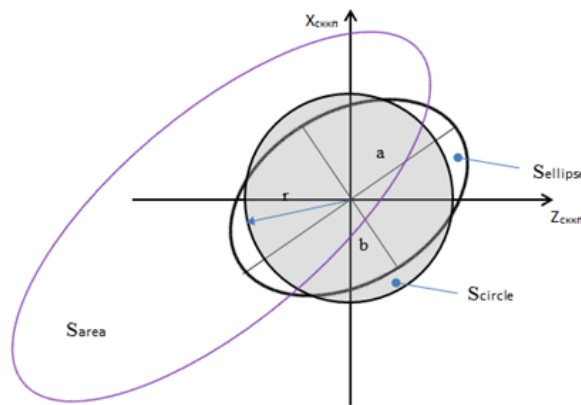
В качестве «маркированной» области в дальнейшем используется поверхность 2-го порядка в виде произвольно ориентированного эллипса  $S_{area}$ , лежащего в картинной плоскости и затем пересчитанного в пространство картографической проекции.

Для оценки параметров эллипса  $S_{area}$  используется процедура оптимизации в численном виде. При расчетах учитываются все маркеры прозрачности, радиус-вектор  $R_{маркер}$  которых в системе

координат, связанной с картинной плоскостью, удовлетворяет условию  $R_{\text{маркер}} \leq k \cdot r$ , где  $k$  – параметр алгоритма.



**Рисунок 3.**



**Рисунок 4.**

Предполагается, что учет состояния ночной облачности позволит при определенных условиях существенно повысить эффективность обслуживания средствами ОС установленной номенклатуры космических объектов.

Что имеется в виду?

1. Полученное от вышестоящего пункта управления задание на обслуживание КО установленной номенклатуры, т.е. знание траекторных параметров движения КО (эфемерид), позволяет исходя из требований к качеству обслуживания произвести планирование и распределение задач между средствами комплекса ОС с учетом астроклиматических условий (состояния ночной облачности).

2. Очевидно, что такое планирование обеспечит более высокую пропускную способность ОС в целом без снижения качества обслуживания, а также позволит более аккуратно расходовать имеющийся технологический ресурс ОС.

3. Отдельно можно рассматривать вопрос получение “избыточной” (по отношению к штатной) информации по КО – повышение качества имеющихся данных за счет “склейки” измерений по одному и тому же объекту в пространственно-разнесенных окнах прозрачности.

#### *Список литературы:*

1. Инженерный справочник по космической технике, изд. 2-е Под ред. АВ Солодова, Военное издательство МО СССР, 1977 г.
2. Прикладной анализ временных рядов Р.Отнес, Л. Эноксон, изд. Мир, 1982 г.
3. Статистика для физиков, изд. 2-е Д.Худсон, изд.Мир, 1970 г.
4. Математика для электро- и радиоинженеров, изд. 2-е Андре Анго, изд. Наука, 1964 г.
5. Датчик ночной облачности, патент на изобретение. *Здор Станислав Евгеньевич, Колинко Валерий Иванович*, ПАО Красногорский завод им. С.А. Зверева
6. Методы навигации в условиях неопределенности, Методическое пособие А.К.Платонов, Д.С. Иванов, изд. Московский физико-технический институт, 2013г.
7. Справочные материалы из сети интернет.

# КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ДЗЗ

ЗУБКО А.В., АРХИПОВ С.А.

ПАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева», г. Красногорск

E-mail: a.zubko@kmz.su

Воздействие ионизирующих излучений космического пространства (ИИКП) на элементы и материалы конструкции оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) приводит к деградации их характеристик вследствие эффектов накопленной дозы, что может оказаться решающим фактором для сохранения работоспособности аппаратуры. Критичной к воздействию ИИКП является полупроводниковая электронная компонентная база (ЭКБ) и изготовленные из стекла элементы оптической системы аппаратуры.

ИИКП характеризуются значительной зависимостью величин поглощенной дозы от массовой толщины защитного экрана. Поэтому, при расчетах стойкости электронно-оптических систем космической аппаратуры к воздействию ИИКП возникает задача расчета локальных доз для ЭКБ с учетом защитных свойств конструкции аппаратуры, а также локальных доз по глубине облучения стекол элементов оптической системы с учетом, как изотропной геометрии облучения, так и экранирования внутренних слоев оптического элемента его поверхностными слоями и элементами конструкции. Также, в ряде случаев существует потребность в достаточно простых и точных методиках для быстрого проведения оценок локальных доз ИИКП для защитных экранов, отличающихся от типовых «полусфера» и «полуплоскость» по ОСТ 134-1044-2007, без использования специального программного обеспечения и его сопряжения с САПР.

Для решения указанных выше задач на нашем предприятии была разработана комплексная методика расчета радиационной стойкости космической оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ. Исходными данными для этой методики являются требования ТЗ в части величин доз ИИКП за срок активного существования (САС), а также конструкция аппаратуры.

Предлагаемая методика включает в себя следующие этапы:

1. непрерывная аналитическая аппроксимация дискретных дозовых зависимостей факторов ИИКП заданных в ТЗ;
2. вычисление величин поглощенных доз ИИКП для критичных элементов аппаратуры с учетом защитных свойств ее конструкции;
3. оценка радиационной стойкости (полупроводниковой) ЭКБ в составе аппаратуры;
4. вычисление характеристик радиационно-оптической устойчивости стекол оптической части аппаратуры;
5. вычисление показателей деградации свойств оптической системы и оценка ее радиационной стойкости;
- выб. дача заключения о радиационной стойкости аппаратуры и (при необходимости) рекомендаций по ее обеспечению.

Этапы 1 и 2 методики связаны с расчетом доз ИИКП и образуют расчетный модуль «Доза», который является основным. Если в аппаратуре имеются оптические элементы, выполненные из стекла, тогда выполняются этапы 4 и 5 методики, образующие в совокупности расчетный модуль «Стекло». Модуль «Стекло» в качестве исходных данных использует, в том числе, результаты расчетов модуля «Доза».

Как правило, формой задания в ТЗ на аппаратуру требований по радиационной стойкости

является таблица значений величин поглощенных доз факторов ИИКП в зависимости от дискретного ряда значений массовой толщины  $z$  сферического защитного экрана. Эти данные, вместе с информацией о конструкции аппаратуры являются исходными для модуля «Доза».

Используя метод наименьших квадратов (МНК) в типовой системе компьютерной алгебры (Mathcad, MATLAB и т.п.), указанные дискретные зависимости доз ИИКП аппроксимируются непрерывными функциями массовой толщины  $z$  следующего общего вида:

$$f(z) = \frac{a_1 z^{b_1}}{1 + a_2 z^{b_2}} e^{a_3 z^{b_3}} + a_4 z^{b_4} \quad (1)$$

где  $a_i, b_i$  – числовые параметры аппроксимации.

Аппроксимируя защитные свойства конструкции аппаратуры по отношению к ИИКП в различных телесных углах  $\Omega_n$  совокупностью экранов с аналитической формой внешней и внутренней поверхностей, величину локальной дозы ИИКП в некоторой точке можно представить в следующем виде:

$$D(A) = \frac{1}{4\pi} \sum_n \int_{\Omega_n} d\omega \cdot f(z(\theta, \varphi)) \quad (2)$$

где интегрирование ведется в сферической системе координат  $(\theta, \varphi)$ , а функция  $z(\theta, \varphi)$  описывает массовую толщину защитного экрана в данном направлении. При необходимости и для удобства расчетов интеграл (2) может быть записан и в другой системе координат (например, прямоугольной или цилиндрической). Области интегрирования по телесным углам  $\Omega_n$  в выражении (2) выбираются так, чтобы их границы могли быть описаны кусочно-аналитическими функциями. На практике, защитные свойства большинства реальных конструкций с достаточной точностью можно аппроксимировать в различных телесных углах совокупностью фрагментов плоских пластин, сферических или цилиндрических оболочек.

Выражение (2) является непрерывным пределом, так называемого, метода секторирования или «лучевого метода» ГОСТ 25645.204-83.

На алгоритм вычислений модуля «Доза» оформлен патент [1].

Воздействие ионизирующих излучений на оптические материалы приводит к деградации их характеристик, в частности к возрастанию оптической плотности стекол и, соответственно, к снижению коэффициента пропускания. Указанный эффект обусловлен образованием радиационно-индуцированных центров окраски (ЦО) на дефектах структуры материала (ловушках) и их накоплением в объеме стекла. Эффект радиационного окрашивания стекол в наибольшей мере выражен в видимой части спектра.

Расчетный модуль «Стекло» данной методики основан на дифференциальном уравнении радиационной кинетики для ЦО оптических стекол следующего вида:

$$\frac{dn_\tau}{dt} = P \cdot \sigma \cdot (N_\tau - n_\tau) - \frac{1}{\tau} n_\tau \quad (4)$$

где:  $P$  – мощность дозы ИИ,  $\sigma$  – сечение процесса образования ЦО,  $N_\tau$  – полная концентрация ловушек с временем жизни  $\tau$ ,  $n_\tau$  – концентрация ЦО с временем жизни  $\tau$ .

Время жизни ЦО –  $\tau$  связано с энергией соответствующей ловушки –  $\varepsilon$  соотношением:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{\varepsilon}{kT}\right) \quad (5)$$

где:  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура.



Наличие у ЦО определенного времени жизни связано с их разрушением вследствие термических эффектов и проявляется в релаксации (обесцвечивании) радиационной окраски с течением времени.

Для ловушек принято непрерывное равномерное распределение в некотором диапазоне величин энергий, что согласно работе [2] позволяет достаточно точно описать радиационные свойства оптических стекол. Приращение оптической плотности стекла для заданной длины волны пропорционально полной концентрации ЦО.

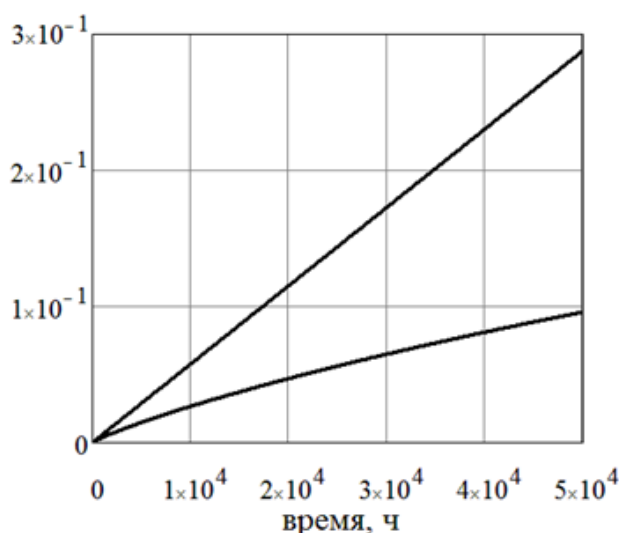
Для оптических стекол серии «0» характеристики радиационной кинетики, входящие в уравнение (4), определяются по справочным данным [3], которые содержат экспериментальные величины приращения оптической плотности образцов стекол при их облучении гамма-излучением  $Co^{60}$  в течение 50 часов при мощности экспозиционной дозы  $10^4$  Р/ч и последующей релаксацией (обесцвечивания) радиационной окраски без облучения в течение 720 часов.

Численные значения характеристик радиационной кинетики стекла элемента оптической системы, который выбран для расчета, находятся МНК в системе компьютерной алгебры при аппроксимации соответствующих справочных данных общим решением уравнения (4) для последовательных процессов облучения и релаксации радиационной окраски.

На следующем шаге методики с использованием расчетного модуля «Доза» производится расчет средней мощности дозы ИИКП по оптической оси выбранного элемента оптической системы путем усреднения соответствующих локальных доз с учетом, как изотропного характера ИИКП, так и экранирования оптического элемента конструкцией аппаратуры и космического аппарата. Далее производится пересчет параметров модели радиационной кинетики выбранного стекла от условий экспериментального облучения в данных справочника [3] к условиям эксплуатации, учитывающий различие мощности дозы соответствующих излучений.

После этого, с использованием расчетного модуля «Стекло», выполняется вычисление временной зависимости приращения спектральной оптической плотности отдельных элементов и оптической системы в целом в условиях эксплуатации.

На алгоритм вычислений модуля «Стекло» оформлен патент [4].



**Рисунок 1.**

**Приращение оптической плотности стекла БК4 с учетом (ниже) и без учета (выше) эффектов обесцвечивания**

На рисунке 1, в качестве примера представлены результаты расчета приращения оптической плотности образца стекла БК4 толщиной 1 см для длины волны  $\lambda=560$  нм в зависимости от времени облучения для мощности дозы 1 рад/ч, величина которой типична для условий эксплуатации космической аппаратуры ДЗЗ.

Из рисунка 1 видно, что при мощности дозы 1 рад/ч и для времени  $5 \cdot 10^4$  ч (что составляет примерно 5,7 лет) различие приращений оптической плотности без учета эффектов обесцвечивания и с учетом этих эффектов составляет примерно 3 раза.

Приведенный пример хорошо иллюстрирует важность более точного учета эффектов радиационной кинетики оптических стекол при расчете радиационной стойкости оптических систем космической аппаратуры ДЗЗ. Особое значение учет этих эффектов приобретает в связи с увеличением САС аппаратуры и соответствующим увеличением доз ИИКП, так как относительная величина указанных эффектов возрастает с возрастанием времени облучения, что может иметь решающее значение для расчетной оценки работоспособности оптических систем космической аппаратуры.

Кроме того, данная методика позволяет одновременно снизить стоимость и повысить качество разрабатываемых оптических систем аппаратуры ДЗЗ. Методика позволяет обоснованно применять в конструкции аппаратуры не радиационно-стойкие оптические стекла серии «0», имеющие более высокие значения начального коэффициента пропускания, по сравнению с их радиационно-стойкими аналогами серии «100», с меньшим начальным коэффициентом пропускания и имеющих более высокую стоимость.

Для получения высокой точности расчета радиационной стойкости оптических систем космической аппаратуры одинаково важны как результаты расчетов модуля «Доза», в части средней мощности дозы ИИКП на оси оптических элементов, так и результаты расчетов модуля «Стекло», в части вычисления собственно оптических характеристик.

В целом, данная комплексная методика расчета радиационной стойкости космической аппаратуры ДЗЗ характеризуется высокой точностью результатов, относительной простотой реализации (т.к. не требует сопряжения с САПР в части расчета доз ИИКП и основана на стандартных справочных данных в части расчета радиационной стойкости оптических систем) и низкой стоимостью внедрения.

Применение данной методики при разработке аппаратуры позволяет оперативно получать оценки ее радиационной стойкости, что имеет большое значение на этапе эскизного проектирования для выбора оптимальной конструкции аппаратуры, а также одновременно повышать качество и снижать стоимость космической аппаратуры ДЗЗ.

Предлагаемая методика является дальнейшим развитием экспериментальных [5] и теоретических работ [6] по исследованию эффектов радиационной кинетики оптических стекол и разработки методики их учета, вошедшей в состав отраслевых нормативных документов [7], [8].

Данная методика, в отличие от [6], [7], [8] является комплексной, поскольку включает в себя метод расчета доз ИИКП. Также в части расчета эффектов радиационной кинетики оптических стекол данная методика является полностью теоретически последовательной, восполняя ограничения исходной методики. Это относится как к полному учету эффектов релаксации и насыщения в процессах образования ЦО, так и к явному учету непрерывности и равновероятности распределения ловушек в некотором диапазоне величин энергий в моделях кинетики радиационной окраски стекол.

Данная комплексная методика в полном объеме была использована для расчета радиационной стойкости ОЭА «Аврора» в составе МКА «Аист-2Д», который был выведен на орбиту 28.04.2016г. с космодрома «Восточный».

*Список литературы:*

1. *Архинов С.А., Зубко А.В., Лалакин А.В.* Способ определения локальных доз ионизирующих излучений космического пространства за защитными экранами с аналитической формой поверхности. Патент № RU №2564472, (2015)
2. *Treadaway M. J., Passenheim B.C., Kitterer B.D.* Radiation coloring and bleaching of glass. IEEE Transactions on Nuclear Science, NS-23, 1976, №6, p.1820-1825
3. РТМ 3-996-77 Стекло оптическое бесцветное. Радиационно-оптическая устойчивость к гамма-излучению.
4. *Архинов С.А., Зубко А.В., Лалакин А.В.* Способ выбора марок оптических стекол для конструирования оптических систем космической аппаратуры в условиях длительного воздействия ионизирующих излучений космического пространства. Патент № RU 2626450, (2017)
5. *Лалакин А.В.* Исследование влияния времени воздействия гамма-излучения кобальта-60 на потемнение оптических стекол. В сб. Радиационная стойкость элементов и материалов оптоэлектронных систем. М., ЦНИИ информации, 1984, с.160-163.
6. *Лалакин А.В.* Методика расчета радиационной стойкости оптических систем при длительном воздействии ионизирующих излучений. В сб. Радиационная стойкость элементов и материалов оптоэлектронных систем. М., ЦНИИ информации, 1984, с.146-149.
7. РД В50-25645.320-86 Методические указания. Оценка радиационных повреждений элементов и технических устройств космического аппарата.
8. РТМ В3-1655-84 Приборы оптические. Методы расчета радиационной стойкости.

# ПРОЕКТ ФОТОННОГО АЦП

ЯКУШЕНКОВ П.О.

АО «Ангстрем», г. Москва, Зеленоград

E-mail: loss24680@yandex.ru

## ВВЕДЕНИЕ

Как известно, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) – это прибор, принимающий аналоговый сигнал и выдающий набор цифр. Суть аналого-цифрового преобразования заключается в дискретизации сигнала во времени и квантовании его по амплитуде или мощности (рис. 1). Дискретизация сигнала обеспечивает не сплошной, а побитовый поток информации, а квантование придает каждому биту одно из дискретных значений (обычно 0 или 1).

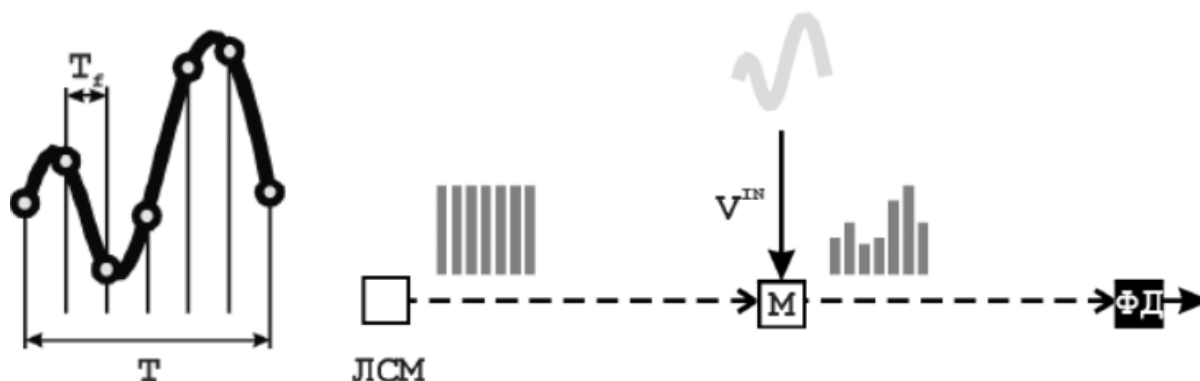


Рисунок 1.

*ЛСМ – генератор импульсов для дискретизации, М – модулятор и ФД – приемник сигнала обеспечивают квантование [1]*

Наибольшая частота электронных АЦП, изготавливаемых в России, близка к 500 МГц. Процесс повышения производительности АЦП в настоящее время замедлился, поскольку не удалось снизить флуктуации электронного генератора импульсов, используемого для дискретизации аналогового сигнала, и улучшить быстродействие АЦП. В то же время экспериментально обосновано, что фотонные АЦП (ФАЦП) позволяют на оптической несущей получить значительно более высокую частоту выборки аналогового сигнала, чем это может обеспечить транзисторная электроника. Создание из электрооптических модуляторов фотонного АЦП может обеспечить аналого-цифровое преобразование с частотой порядка 10 ГГц.

Известны различные схемы реализации ФАЦП: с увеличением частоты выборки за счет задержки (рис. 2); с оптическим демультиплексированием сигнала по длине волны в параллельные каналы (рис. 3); с оптическими частотными каналами (рис. 4); ФАЦП с модуляторами с различными длинами электродов для обеспечения нужной передаточной характеристики для обеспечения нужной цифры на выходе (рис. 5), которая так же может быть обеспечена и отклонением луча из-за нелинейных эффектов и пропусканием его через транспаранты с периодическими щелями и фотодетекторами, настроенными на разные диапазоны, с мультиплексированием и демультиплексированием оптической несущей.

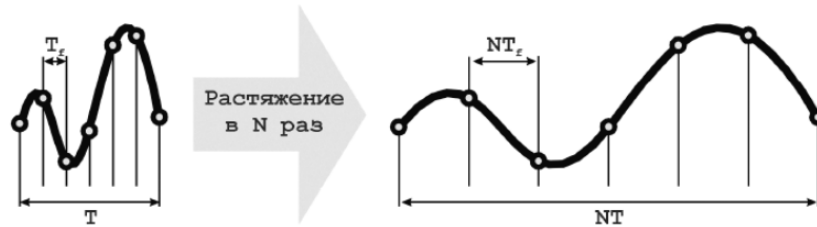


Рисунок 2.

Возможность увеличения частоты выборки за счет задержки [1]

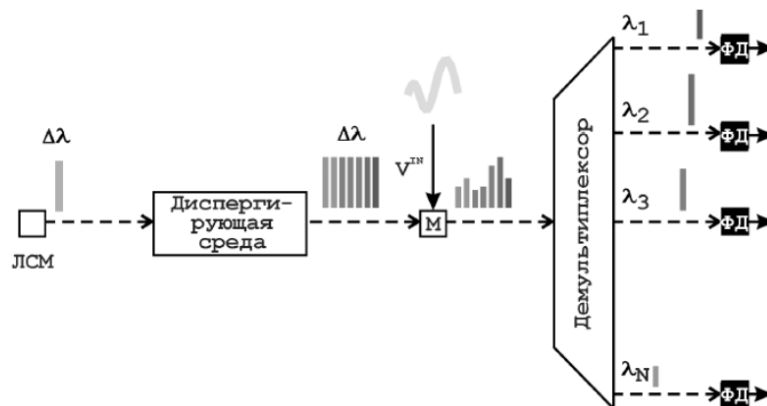


Рисунок 3.

ФАЦП с демультиплексированием по длине волн в параллельные каналы [1]

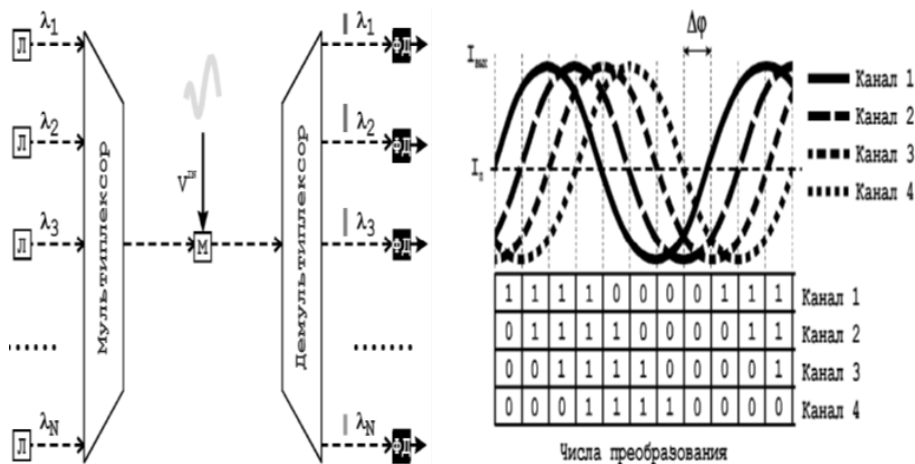


Рисунок 4.

ФАЦП с оптическими частотными каналами и их передаточная характеристика [1]

Для реализации ФАЦП на фотонной интегральной схеме (ФИС) наиболее оптимальна последняя схема, т. к. в ней используется одна длина волны, количество компонентов в ней минимально, а модуляторы с различными длинами электродов обеспечивают сразу же необходимые выходные характеристики и не надо для этого делать на чипе еще и электронную схему.

### ФАЦП на фотонной интегральной схеме

Остановимся на схеме реализации ФАЦП, которую можно будет реализовать на фотонной интегральной схеме (ФИС) в виде одного чипа. Основными элементами чипа являются - импульсный лазер, электрооптический модулятор и фотоприемник, изготовленные на единой схеме в интегральном исполнении (как рис. 5, но с лазером и приемником на той же интегральной схеме).

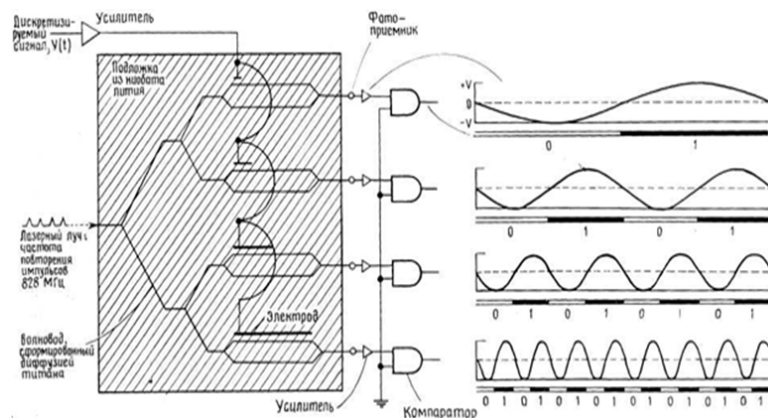


Рисунок 5.

### ФАЦП с модуляторами с различными длинами электродов и их выходные сигналы [3]

Для обеспечения быстрого аналого-цифрового преобразования можно использовать быстродействующие импульсные высокочастотные лазеры с частотой импульсов порядка ГГц и быстрые фотоприемники в интегральном исполнении на материалах АЗВ5 для диапазона длин волн в районе 1,55 мкм (популярная в ВОЛС длина волны), изготавливаемые в НПО «Полус» им. М.Ф.Стедьмаха.

Для обеспечения быстрого аналого-цифрового преобразования необходим модулятор с большой частотой переключения, для чего нужно, чтобы быстро перезаряжалась емкость на электродах. Для этого целесообразно использовать материалы с высокой подвижностью, такие, как материалы группы АЗВ5. На сегодняшний день лучшим вариантом электрооптического модулятора является модулятор типа Маха-Цендера (рис. 6). Однако в нашей стране электрооптические модуляторы Маха-Цендера пока делаются только на ниобате лития («ПНППК»), который закупается за границей.

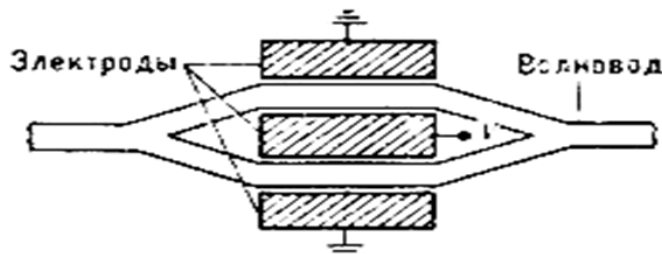


Рисунок 6.

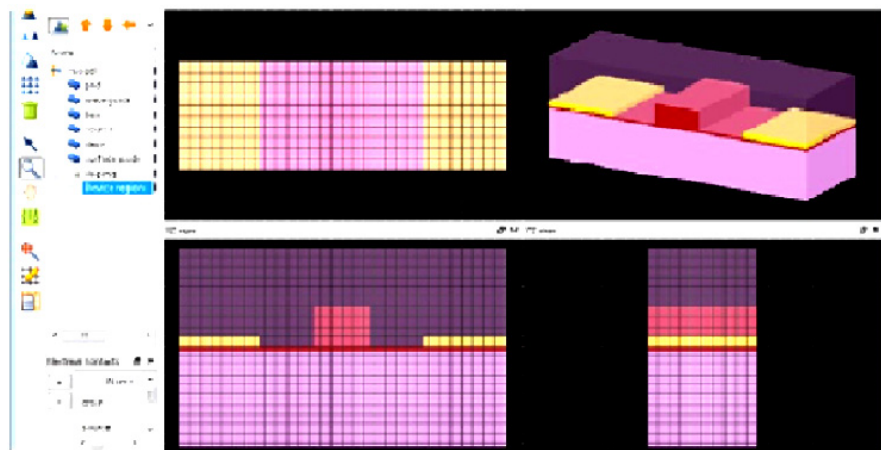
### Электрооптический модулятор типа Маха-Цендера [3]

Для реализации ФАЦП на интегральной схеме необходимо создать электрооптический модулятор типа Маха-Цендера в интегральном исполнении, который можно интегрировать вместе с лазером и фотоприемником и который обеспечит частоту переключения от 10 до 100 ГГц. Гетероструктуры из материалов АЗВ5 можно выращивать, не закупая материалы за границей, а технологические операции с гетероструктурами можно выполнять на существующей технологической базе.

За границей уже делают интегральные электрооптические модуляторы типа Маха-Цендера на InP и GaAs, например Teraxion, Oclaro, aXenics. Более того, уже производятся линейки лазер-модулятор-фотоприемник в интегральном исполнении на единой схеме [2]. Для ФАЦП по сути надо сделать несколько таких параллельных линеек.

Для создания ФАЦП предстоит спроектировать и промоделировать его топологию в СА-ПрЕ, разработать технологический маршрут для ее реализации, вырастить необходимую гетероструктуру и провести технологические операции согласно маршруту.

В последнее время многие компании стали выпускать САПР для ФИС, например Lumerical, COMSOL, PhoeniX, Optiwave. Для проектирования нами был выбран САПР Lumerical [4]. Эта система совместима с Cadence Virtuoso, на котором проектируется сейчас большинство электронных схем, а так же включает в себя несколько пакетов: FDTD Solutions, в котором можно моделировать различные волноводы, разветвители и другие волноводные структуры из различных материалов; DEVICE, в котором можно моделировать различные приборы; INTERCONNECT для проектирования многих элементов на единой схеме и MODE Solutions в котором можно моделировать плазмонные волноводы, фотонные кристаллы и др. На рис. 7 показан промоделированный в САПР Lumerical простой вариант электрооптического модулятора типа Маха-Цендера.



**Рисунок 7.**  
**Электрооптический модулятор типа Маха-Цендера,**  
**промоделированный в САПР Lumerical**

После проектирования и моделирования топологии необходимо подобрать нужную гетероструктуру и технологические операции с ней (такие как травление, осаждение, литография, МЛЭ...), которые нужны для реализации ФАЦП.

Для реализации топологии сверхбыстродействующего ФАЦП не обязательно обладать самыми современными в мире технологическими нормами, как Intel (13 нм). Необходимые технологические операции можно выполнить и на имеющемся в России оборудовании (например Corial); ведь Intel нужна такая норма для реализации быстродействующих переключателей - чем меньше длина, тем быстрее переключается транзистор, однако электрооптический модулятор типа Маха-Цендера даже размером до нескольких мм может переключаться со скоростями порядка 10 ГГц.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый ФАЦП может иметь быстродействие около 10 ГГц. Реализовать топологию ФАЦП на материалах АЗВ5 (вырастить для этого гетероструктуру и провести с ней необходимые технологические операции) можно полностью в России. Имея фотонный АЦП, можно будет разрабатывать цифровые фотонные схемы, включая цифровые оптические процессоры.

#### Список литературы:

1. Р. С. Стариков Фотонные АЦП - ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2015.
2. 'InP-Based Photonic Integrated Circuits', Goldren, 2008.
3. Якушенков П. О., Балаклеяский Н. С. Фотонные интегральные схемы. – Сб. докладов 6-ой Международной конференции по фотонике и информационной оптике.- М., 02 февраля 2017 г., НИИЯУ «МИФИ» с. 146-148.
4. [www.lumerical.com](http://www.lumerical.com).

# РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ АЛГОРИТМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПЛОСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

ГЛАДЫШЕВА Я.В., БАРЫШНИКОВ Н.В., ПАТРИКЕЕВ В.Е.

МГТУ им. Н.Э.Баумана, г. Москва

E-mail: lyanagladysheva@gmail.com

На сегодняшний момент существуют современные научно-технические задачи, такие как создание сверхкрупных телескопов или сверхмощных лазеров, которые требуют изготовления крупногабаритных оптических деталей очень высокой точности [1]. Требования к качеству поверхностей таких деталей очень высоки, так как определяют качество функционирования оптической системы в целом.

Для контроля качества оптических поверхностей высокой точности применяются интерференционные методы. Однако для получения высокой точности измерений при использовании интерферометрических методов необходимо проведение калибровки эталонной поверхности, входящей в схему интерферометра. Так как качество измеряемой детали сравнимо с качеством эталонной поверхности, то для получения объективных результатов требуется исключить ошибки поверхности эталона из результатов измерений. Для решения этой задачи применяются методы абсолютной калибровки [2-4].

Авторами был реализован алгоритм абсолютной калибровки методом двух плоскостей [5]. Метод заключается в измерении исследуемой поверхности в схеме интерферометра Физо. Принцип метода заключался в перемещении исследуемой поверхности относительно эталонной в вертикальном и горизонтальном направлениях относительно оптической оси на величину перемещения  $T$  [6-7]. При обработке полученных экспериментальных данных используется анализ на основе преобразования Фурье профиля поверхности.

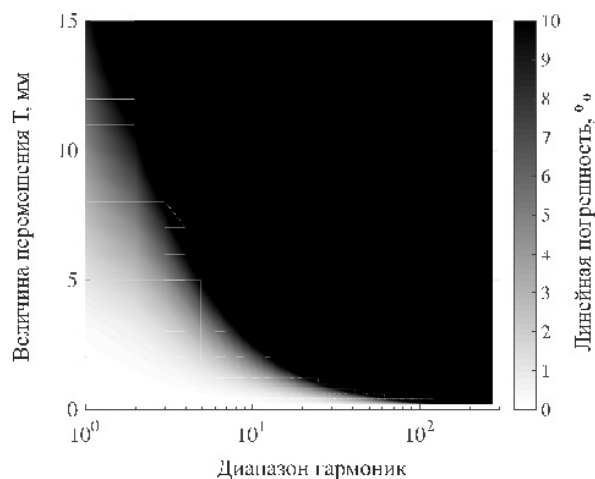
В данной работе были проанализированы погрешности алгоритма построенного по методу двух плоскостей. Общая погрешность измерения по методу двух плоскостей состоит из алгоритмической погрешности, приборной погрешности, которая включает в себя также и погрешности, связанные с условиями проведения эксперимента.

В начале была проанализирована погрешность метода при помощи математического моделирования. В качестве исследуемой поверхности задавались гармонические функции. В результате был исследован диапазон гармоник (от 1 до 275) и рассчитана погрешность восстановления каждой гармоники в зависимости от величины перемещения  $T$  (Рисунок 1).

Согласно проведенному анализу был выявлен диапазон величины перемещения  $T$  для пространственно-частотного спектра неоднородностей и таким образом определены границы применимости алгоритма абсолютной калибровки по методу двух плоскостей.

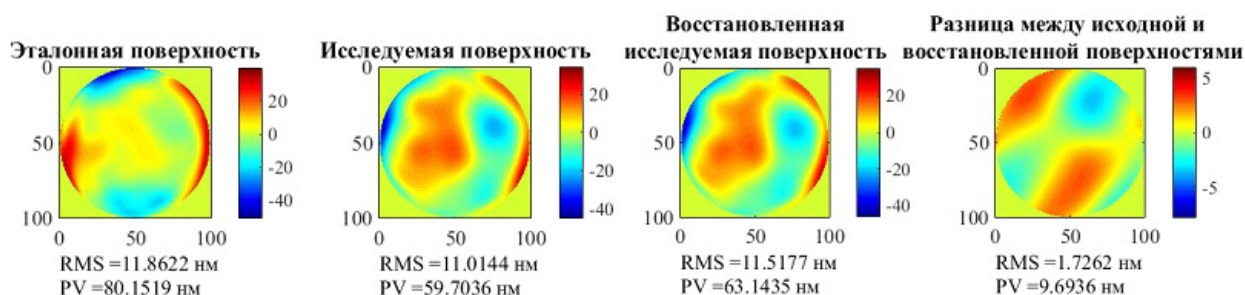
На основе проведенного исследования был проведен анализ алгоритмической погрешности метода абсолютной калибровки по методу двух плоскостей. Для этого было проведено восстановление реального двумерного профиля поверхности, полученного при измерении 100мм плоскопараллельной пластины при помощи интерферометра Zygo GPI XP/D.





**Рисунок 1.**  
**Исходная и восстановленная функции**

На рисунке 2 представлены два профиля поверхности. Один из них принят за эталонный профиль поверхности, другой – за исследуемый. В результате исследуемая поверхность была восстановлена. Для определения погрешности восстановления была рассчитана разность между профилями: исходными исследуемым и восстановленным исследуемым профилями поверхности.

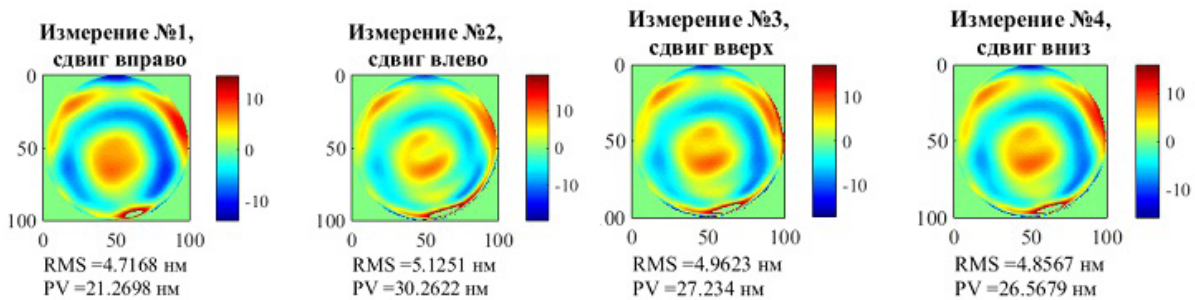


**Рисунок 2.**  
**Исходные эталонная и исследуемая поверхность, XOY;**  
**Восстановленные эталонная и исследуемая поверхности, XOY**

На основе данного анализа была вычислена алгоритмическая погрешность алгоритма абсолютной калибровки по методу двух плоскостей, которая составила 2,05% при перемещении детали на расстояние  $T = 1,23$  мм.

Следующим этапом было проведено экспериментальное исследование. Измерения проводились на интерферометре Zygo. В качестве исследуемой поверхности была выбрана плоскопараллельная пластинка диаметром 130 мм. Апертура анализа составила  $4''$  (102 мм), апертура исследуемой детали - 130 мм. Перемещение детали осуществлялось при помощи микрометрических винтов, а контролировалось индикатором часового типа с погрешностью измерения 10 мкм. Количество точек анализа составило 815x815.

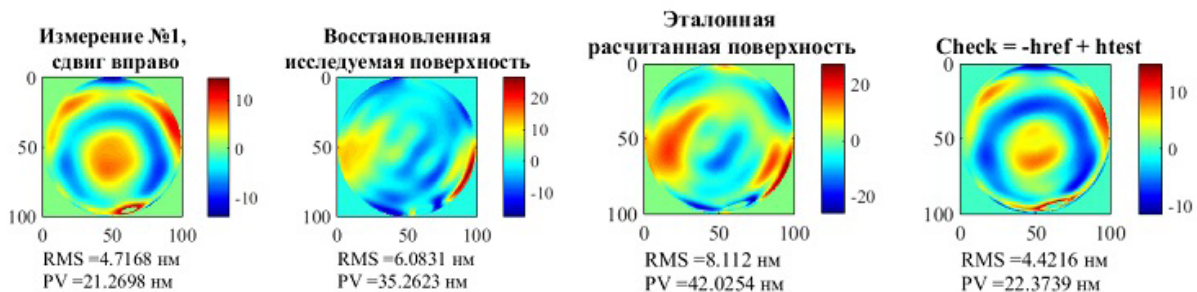
Вначале было проведено четыре последовательных измерения: со сдвигом вправо, влево, вверх и вниз исследуемой детали относительно эталонной (Рисунок 3). Перемещение детали в одно из направлений составило 1 мм согласно рассчитанному диапазону перемещений.



**Рисунок 3.**

**Результат проведения эксперимента со смещением исследуемой детали вправо (А), влево – (Б), вверх (В), вниз (Г) на величину перемещения  $T = 1$  мм**

Затем полученные файлы с измеренными поверхностями были обработаны при помощи алгоритма абсолютной калибровки по методу двух плоскостей и профили исследуемой и эталонной поверхностей были восстановлены (Рисунок 4). В качестве проверки работы алгоритма также была рассчитана разница между восстановленными исследуемой и эталонной поверхностями. Как видно из рисунка этот профиль с высокой точностью совпадает с Измерением №1.



**Рисунок 4.**

**Результат проведения эксперимента со смещением исследуемой детали вправо; Восстановленная исследуемая поверхность; Восстановленная эталонная поверхность**

Результаты восстановления исследуемого профиля поверхности представлены в Таблице 2.

**Таблица 2. Результат восстановления исследуемой поверхности при помощи алгоритма абсолютной калибровки по методу двух плоскостей**

№ эксперимента	$S_q$ , нм	$PV$ , нм
Восстановленный исследуемый профиль поверхности	6,0831	35,2623
Восстановленный эталонный профиль поверхности	8,112	42,0254
Измерение №1	4,7168	21,2698
Измерение №1, восстановленный	4,4216	22,3739

На данный момент авторами проводятся исследования приборной погрешности метода калибровки двух плоскостей, связанные с анализом серии экспериментов, проведенных в одинаковых условиях, а также отработкой методики проведения эксперимента.

### Список литературы

1. *Campbell J. H.* NIF optical materials and fabrication technologies: An overview // Proceedings of SPIE. 2004. Vol. 5341.
2. *B. S. Fritz*, “Absolute calibration of an optical flat,” *Opt. Eng.* 23, 379–383 (1984).
3. *Chen Xu, Lei Chen,\* and Jiayi Yin* Method for absolute flatness measurement of optical surfaces. *APPLIED OPTICS* / Vol. 48, No. 13 / 1 May 2009
4. *U. Griesmann*, “Three-flat test solutions based on simple mirror symmetry,” *Appl. Opt.* 45, 5856–5865 (2006).
5. *Franck Morin, Stéphane Bouillet* Absolute interferometric measurement of flatness: application of different methods to test a 600 mm diameter reference flat. *Proc. of SPIE* Vol. 6616 66164G-1
6. *Gladysheva Y. V. et al.* The absolute calibration of high-precision optical flats across a wide range of spatial frequencies // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2015. – T. 584. – №. 1. – C. 012020.
7. *Gladysheva Y.V. et al.* Profile-Recovery Algorithm for a High-Accuracy // *Optical Flat Measurement Techniques*, 2015. - 59 (2), pp. 142-148



**Секция 2**

**Технологии производства  
оптико-электронных приборов  
и комплексов**

# ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТОК И ПРОИЗВОДСТВА СПЕЦИАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН В АО «НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И. ВАВИЛОВА»

ТЕР-НЕРСЕЯНЦ Е.В.

АО «НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И.Вавилова», г. Санкт-Петербург

E-mail: volokno@goi.ru, ter@goi.ru

Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова» (НИТИОМ), был создан в 1966 году как 1-й филиал Государственного оптического института (ГОИ) на базе Ленинградского завода оптического стекла. Исторически, основным направлением деятельности НИТИОМ являлось создание и исследование оптических стекол. Но уникальные оптические и механические свойства кварцевого стекла способствовали стремительному развитию волоконной оптики в начале 70-х годов прошлого века. Это обстоятельство потребовало от НИТИОМ разработки собственной технологии производства кварцевых световодов для линий связи. В 1979 году в институте было выделено отдельное материаловедческое направление, а в 1982 году д.т.н. Ю.Н. Кондратьевым образована лаборатория оптических волокон, которой впоследствии руководили К.В. Дукельский и П.В. Безбородкин. С конца 80-х годов и по настоящее время группой научных сотрудников и инженеров лаборатории (М.А. Ероньян, В.С. Шевандин, М.М. Серков, А.В. Хохлов, Е.В. Тер-Нерсеянц, В.В. Демидов) разрабатываются технологии волоконных световодов специального назначения, а также осветительных волоконно-оптических жгутов. За время существования лаборатории было выполнено более 10 крупных государственных НИОКР.

## **Направления научно-производственной деятельности лаборатории за последние 35 лет:**

- Одномодовые волокна с сохранением поляризации излучения диаметром 40, 80 и 125 мкм
- Многомодовые волокна со ступенчатым профилем показателя преломления и сердцевиной диаметром от 100 до 1000 мкм
- Многомодовые волокна с градиентным профилем показателя преломления и низкой временной дисперсией, оптимизированные для работы в УФ/видимой областях спектра
- Волокна в герметичном защитном покрытии
- Волокна с высокой механической прочностью
- Волокна, устойчивые к воздействию высокого радиационного фона
- Фоторефрактивные волокна
- Микроструктурированные и фотонно-кристаллические волокна
- Волоконно-оптические кабели и жгуты для передачи светового излучения

## **В настоящее время лаборатория проводит научные исследования по следующим направлениям:**

- Одномодовые волокна, устойчивые к изгибу, воздействию температуры и радиации
- Одномодовые/многомодовые волокна в комбинированном защитном покрытии
- Диффузно-рассеивающие волокна
- Антирезонансные волокна с поллой сердцевиной
- Волокна с сердцевиной из многокомпонентных стекол
- Конусные волокна
- Волокна с сердцевиной прямоугольной формы

Также лаборатория занимается выполнением НИОКР и разработкой технологий световодов согласно требованиям конкретного заказчика.

На данный момент лаборатория представляет собой коллектив из 16 человек, в состав которого входят доктор наук, 3 кандидата наук, 2 аспиранта, научные сотрудники и инженеры высокой квалификации.

# ВОЗМОЖНОСТИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ СТЕКЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ДИОДНОЙ СИСТЕМЫ

ОДИНОКОВ С.Б., САГАТЕЛЯН Г.Р., БУГОРКОВ К.Н., КОВАЛЁВ М.С.

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва

E-mail: h\_sagatelyan@mail.ru

Дифракционные или голограммные оптические элементы [1] содержат на рабочей поверхности детали детерминированный расчётный микрорельеф (периодический или образующий узорчатую конфигурацию) глубиной от 100 нм до 1 – 2 мкм. Кроме того, детали современного приборостроения, в частности, кварцевые пластины маятниковых акселерометров [2] – это МЭМС, которые содержат функциональный рельеф - локальные выступы высотой до 30 мкм и локальные лунок глубиной до 225 мкм.

Перспективным методом создания микрорельефов подобного типа на деталях микроэлектроники является плазмохимическое травление [3], при котором удаление материала с обрабатываемой поверхности осуществляется соединениями фтора, содержащимися в газоразрядной плазме. Наиболее простыми по конструкции, а, следовательно, и технологичными в эксплуатации являются установки плазмохимического травления, в которых обрабатываемую заготовку помещают непосредственно в плазму, образованную высокочастотным разрядом. Такие установки предназначены преимущественно, например, для удаления остатков резиста после выполнения операций электронно-лучевой или фотолитографии, или удаления тонких плёнок различных материалов – органических или неорганических. Однако производители соответствующего оборудования, например, компания Diener electronic GmbH + Co. KG заявляют возможность применения этого оборудования и для собственно плазмохимического травления, стекла [4].

Целью настоящих исследований являлось экспериментальное установление технологических возможностей плазмохимического травления оптического стекла с помещением изолированной заготовки в объём плазмы высокочастотного разряда.

Для проведения экспериментальных исследований применяли установку RIE-300 производства фирмы Torr International, Inc., устройство которой схематически представлено на рис. 1. Подвергаемый обработке образец 1 размещают на диэлектрической полочке 2, вводимой через соответствующее окно в полость вакуумной камеры 3. Плазма 4 создаётся высокочастотным ( $f = 13,56$  МГц) напряжением, подаваемым на выполненную в виде спирали антенну 5, расположенную снаружи. При этом электромагнитное поле вводится в рабочую камеру через диэлектрическое (кварцевое) окно 6. Образец располагается на расстоянии  $L$  от диэлектрического окна.

Подвергаемые плазмохимическому травлению образцы имели размер 10x10 мм. Они были вырезаны из одного группового образца, изготовленного из заготовки фотошаблона для интегральных микросхем толщиной 2,5 мм, представлявшего собой оптическую плоскопараллельную пластину из силикатного стекла, полированную с двух сторон (на одну из полированных плоскостей нанесён слой хрома толщиной 40 нм) [5]. Образцы содержали полученный методом электронно-лучевой литографии [6] рисунок, представлявший собой рандомизированный набор оптически прозрачных (хром протравлен до стекла) и непрозрачных (хром не тронут) участков равной площади.

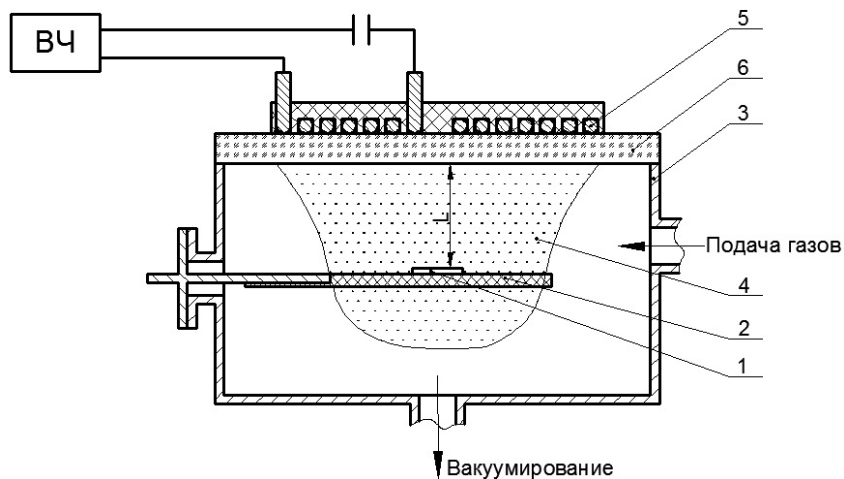


Рисунок 1.

*Схематичное устройство установки плазмохимического травления RIE-300*

Каждый опыт представлял собой технологическую операцию, состоящую из пяти переходов. При этом: первый и пятый переходы – кислородная очистка продолжительностью 5 мин; второй и четвёртый переходы - собственно плазмохимическое травление продолжительностью  $t_{пр}$ ; третий переход – кислородная очистка продолжительностью  $t_{ко}$ .

В качестве выходного параметра рассматривалась производительность процесса, которую оценивали глубиной стравленного обрабатываемого материала (силикатного стекла), определяемой профилографическим методом, снимая на профилографе-профилометре модели «Talysurf-7» [7] профилограммы поверхности образца до и после опыта. Под производительностью процесса  $q$ , нм/мин понимали частное от деления глубины  $H$ , нм стравленного в данном опыте стекла на величину  $2t_{пр}$ , мин.

В качестве факторов эксперимента рассматривали: 1) расстояние  $L$  от образца до диэлектрического окна, контактирующего со спиральной антенной установки RIE-300; 2) продолжительность перехода кислородной очистки  $t_{ко}$ ; 3) продолжительность каждого из переходов собственно плазмохимического травления  $t_{пр}$  (продолжительности этих двух переходов были приняты равными друг другу). Были приняты следующие диапазоны изменения факторов:  $L = 12 - 22$  мм;  $t_{ко} = 2 - 6$  мин;  $t_{пр} = 5 - 15$  мин.

Постоянными величинами, характеризующими условия эксперимента, были: мощность излучаемой антенной электромагнитной волны  $W = 200$  Вт, а также расходы газов. При кислородной очистке – расход кислорода  $C_{O_2} = 50$  см<sup>3</sup>/мин; расход аргона  $C_{Ar} = 50$  см<sup>3</sup>/мин. При собственно плазмохимическом травлении – расход элегаза  $C_{SF_6} = 100$  см<sup>3</sup>/мин; расход кислорода  $C_{O_2} = 40$  см<sup>3</sup>/мин; расход аргона  $C_{Ar} = 35$  см<sup>3</sup>/мин. В рабочей камере формировались следующие величины давления вакуума: при кислородной очистке  $p_{ко} = 65$  Па; при собственно плазмохимическом травлении  $p_{пр} = 57$  Па.

Был реализован полный факторный эксперимент  $2^3$ .

Рассчитав коэффициенты по стандартным формулам [8], получили следующее уравнение регрессии:

$$q = 784 - 17,208L - 26,25t_{ко} - 44,5t_{пр} + 0,625Lt_{ко} + 1,75Lt_{пр} + 8,95t_{ко}t_{пр} - 0,35Lt_{ко}t_{пр} \quad (1)$$

В формулу (1) следует подставлять натуральные значения факторов в пределах диапазонов, указанных выше. Тогда скорость травления стекла  $q$  имеет размерность нм/мин.

Подвергнем анализу полученные коэффициенты регрессии.



При реализации опыта в центре плана эксперимента, т.е. при  $L = 17$  мм;  $t_{ко} = 4$  мин;  $t_{np} = 10$  мин была получена скорость травления, весьма близкая к величине, рассчитываемой по формуле (1). Это значит, что эксперимент проводился в области адекватности линейного характера зависимости скорости съёма обрабатываемого материала от рассматривавшихся факторов при их варьировании в исследованных пределах. Также из этого факта можно заключить, что погрешности эксперимента невелики, и все коэффициенты регрессии являются значимыми.

Численное значение коэффициента  $b_1 = -26,25$  в сочетании с численными значениями коэффициентов  $b_{12} = +0,625$ ;  $b_{13} = +1,75$  и  $b_{123} = -0,35$  указывает на то, что скорость съёма обрабатываемого материала увеличивается при приближении образца к антенне – источнику плазмы. Это может быть объяснено неравномерностью распределения энергии в плазме, обусловленной конструкцией применяемой установки плазмохимического травления, содержащей антенну в виде плоской спирали [9]. Кроме того, оказывается, что при близком расположении образца увеличение продолжительности кислородной очистки приводит к более полному очищению поверхности стекла от «высадки», чем при более отдалённом расположении образца. Также можно утверждать, что более интенсивное пассивирование поверхности стекла растущей плёнкой полимера происходит в области более высоких напряжённости электромагнитного поля, что, в свою очередь, объясняется интенсификацией реакций полимеризации «высадки». В целом же в областях электромагнитного поля, характеризующихся повышенными значениями локализованной мощности, интенсифицируются все процессы, присущие плазмохимическому травлению.

Численное значение коэффициента  $b_2 = -26,25$  в сочетании с численным значением коэффициента  $b_{23} = +8,95$  указывает на то, что скорость съёма обрабатываемого материала возрастает с увеличением времени, затрачиваемого на кислородную очистку образца, производимую между двумя переходами собственно плазмохимического травления. Очевидно, что увеличение продолжительности кислородной очистки обеспечивает более полное удаление образующейся плёнки полимера, которая препятствует доступу к обрабатываемой поверхности стекла химически активных частиц. К повышению средней производительности процесса плазмохимического травления приводит одновременное повышение продолжительностей кислородной очистки и плазмохимического травления или же одновременное уменьшение продолжительностей этих переходов. Эта особенность проявляется более отчётливо при близком расположении образца относительно диэлектрического окна.

Численное значение коэффициента  $b_3 = -44,5$  указывает на то, что скорость съёма обрабатываемого материала, т.е. количество материала, удаляемого в единицу времени, с увеличением продолжительности перехода плазмохимического травления в целом несколько снижается, несмотря на естественное увеличение общего съёма. Такой результат является следствием наличия процесса пассивации обрабатываемой поверхности образца с увеличением продолжительности процесса плазмохимического травления.

В целом, достигнутая производительность  $q = 10$  нм/мин при плазмохимическом травлении силикатного стекла на установке RIE 300 относительно невелика, и примерно в 5 раз меньше производительности, достигаемой на установке «Caroline 15 PE» [10], что объясняется принципиально различными схемами травления на данных установках. Однако можно рекомендовать эту установку для получения на поверхностях деталей из оптического стекла рельефа высотой до 350 нм.

#### *Список литературы:*

1. Сойфер В.А., Котляр В.В., Досколович Л.Л. Дифракционные оптические элементы в устройствах нанопотоники. – Компьютерная оптика, т. 33, № 4, 2009. – С. 352 – 368.
2. Совершенствование технологического процесса изготовления пластины маятникового ак-

селерометра / Г.Р. Сагателян, К.Л. Новоселов, А.В. Шишлов и С.А. Щукин. – Естественные и технические науки, № 6, 2012. – С. 369 – 376.

3. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях [Электронный ресурс]: учебное пособие / В.А. Галперин, Е.В. Данилкин, А.И. Мочалов; под ред. С.П. Тимошенкова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 283 с.

4. Etching: <https://www.plasma.com/en/plasmatechnik/low-pressure-plasma/>

5. Фотошаблонные заготовки для производства микросхем, ФШЗ. - [http://xn--b1alaqc.xn--plai/index.php?information\\_id=7&route=information](http://xn--b1alaqc.xn--plai/index.php?information_id=7&route=information) /information.

6. Расчёт, конструирование и изготовление дифракционных и голограммных оптических элементов: учебное пособие / С.Б. Одинокоев, Г.Р. Сагателян, М.С. Ковалёв. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2014. – С. 42 – 59.

7. Серия Форм Талисурф | Taylor Hobson. - <http://taylor-hobson.ru/katalog-produktsii.html?start=9>

8. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976. - 280 с.

9. *Lieberman M.A.* A Mini-Course on the Principles of Plasma Discharges, Berkeley, 2003.- P. 97.

10. *Odinokov S.B., Sagatelyan H.R.* The Design and Manufacturing of Diffraction Optical Elements to Form a Dot-Composed Etalon Image within Optical Systems. – Optics and Photonics Journal, 2013, 3, 102-111.

# ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ РАБОЧАЯ СТАНЦИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ШКАЛ, СЕТОК, ФОТОШАБЛОНОВ

БЕССМЕЛЬЦЕВ В.П., БАЕВ С.Г., ГОЛОШЕВСКИЙ Н.В., МАКСИМОВ М.В.,  
ГОРЯЕВ Е.П., КАСТЕРОВ В.В., НИКАНОРОВ Ю.Н.\*

Институт автоматизации и электротехники СО РАН, г. Новосибирск  
\*АО «Швабе – Оборона и Защита» г. Новосибирск

E-mail: bessmelt@iae.nsk.su

Для решения задач высококачественной микрообработки диэлектрических материалов, (стекло, оптических кристаллов, керамика), обычно используется точная механическая обработка или масочное травление. Применение для этой цели лазерных технологий с источниками непрерывного или импульсного излучения с наносекундной длительностью импульса оказывалось менее эффективным, поскольку тепловые эффекты, возникающие при лазерной обработке, приводили к появлению дефектов микронных размеров (микросколов, напряжений, буртиков вокруг зоны обработки). Появление лазеров с пико и фемтосекундной длительностью импульса с большой средней мощностью и высокой частотой повторения вызвало резкий всплеск исследований по этой тематике /1/. Однако оказалось, что если при одноимпульсном воздействии абляционные процессы длительностью в доли пикосекунды не приводят к образованию сколов и трещин, то при обработке серией импульсов тепловые и гидродинамические процессы существенно ухудшают качество микрообработки. Проведенные исследования /2/ показали, что при лазерной обработке стеклянных заготовок из К8 методом векторной гравировки, режим близкий к оптимальному по соотношению качество/ производительность ограничивает скорость обработки (формирование глубоких – 5мкм микроканалов шириной 10мкм) величиной 20 мм/с (средняя мощность 0.1Вт, длительность импульса 290 фс, тактовая частота порядка 1 кГц). Для большинства производственных задач по микрообработке изделий из стекла (например при изготовлении сеток) такая производительность представляется чрезвычайно малой. При этом современные промышленные фемтосекундные лазеры имеют частоту подачи управляемых импульсов более 1 МГц при средней мощности более 10 Вт. Таким образом, скорость движения луча при микрообработке может быть доведена до 0.5 м/с даже при размере пятна 1 мкм (перекрытие 50%), с расчетной глубиной следа на стеклянных заготовках более 3 мкм при мощности менее 1 Вт.

В рамках проекта Мин. Обр. науки № 2012-218-03-004 Институтом автоматизации и электротехники СО РАН создана «Лазерная технологическая рабочая станция на основе лазера с перестраиваемой длительностью импульсов (фемто - пико) – (ФПЛ)» с оснасткой для быстрой смены заготовок серийных изделий, обеспечивающая высокую производительность обработки – более 500мм/с при обработке заготовок из оптического стекла и кристаллов и максимальной скоростью обработки 1 м/с. при формировании изображений на стеклах с металлическим напылением.

При проектировании учитывалось, что в большинстве конструкций фемтосекундных промышленных лазеров имеется возможность без существенных затрат получить с выхода лазера кроме основной длины волны (обычно 1.030мкм), излучение второй и третьей гармоник. Так как технология фемтосекундной микрообработки еще не вышла на уровень стандартизации технологических режимов, мы посчитали необходимым создать систему, в которой оператор может по расчетным или литературным данным выбрать не только режим обработки, но и длину волны излучения.

Лазерная рабочая станция ФПЛ на основе технологического фемтосекундного лазера, генерирующего три длины волны – 1030, 515 343 нм, включает в себя трехканальную систему формирования и позиционирования сфокусированного лазерного излучения на основе комплементарной системы управления положением лазерного луча, содержащую блоки быстрого сканирования на основе прецизионных сканеров с объективами плоского поля. Блоки быстрого сканирования фокусировки расположены на каретке механизма вертикального перемещения Z. Там же расположена система технического зрения с микронным разрешением и система автофокуса. Обрабатываемые детали располагаются на рабочем столе механизма прецизионного двухкоординатного привода XY с полем 200x200 мм и дискретностью перемещения 50 нм. Запись может проводиться в режиме последовательного формирования полной зоны обработки в стартстопном режиме и, также, при непрерывном движении рабочего стола, что обеспечивается специальным контроллером на основе системы на кристалле, содержащей процессор архитектуры ARM9 и ПЛИС. Контроллер управляет составной многокоординатной системой в реальном времени при движении лазерного луча со скоростью до 1 м/с.

Программное обеспечение станции, объединяет в себе средства импорта CAD-модели, подготовки к обработке и контроля качества ее результатов (автоматическое или ручное совмещение обрабатываемых зон с заданием, поиск границ объектов, определение размеров и формы структурных элементов объекта и эффектов обработки). Подготовка данных для обработки может вестись в стандартных (в том числе отечественных) CAD продуктах с учетом ГОСТ и ОСТ.

#### Основные технические характеристики рабочей станции:

Способ сканирования	растровый, векторный
Максимальная скорость обработки, мм/с	до 1000
Максимальный размер зоны обработки, мм, не менее	200x200x100
Минимальная дискретность позиционирования, нм, не хуже	100
Воспроизводимость, нм, не хуже	150
Минимальная ширина гравированной линии, мкм	3
Режимы обработки	– индивидуальная групповая.

На рисунке 1 показан внешний вид ФПЛ и изображения элементов сеток, полученных на рабочей станции методом микрогравировки на поверхности и в глубине стекла, и микрорезки из металлической фольги.

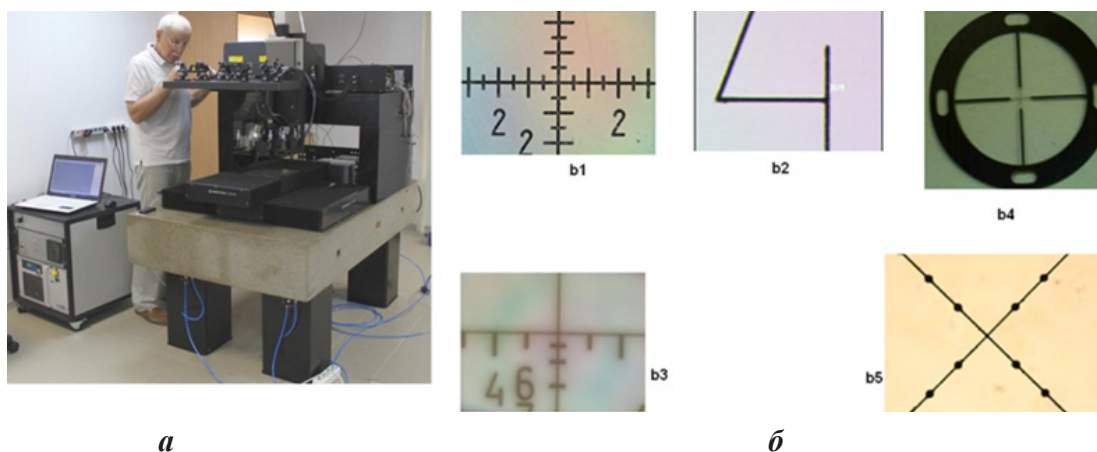


Рисунок 1:

*a – внешний вид ФПЛ (без защитных кожухов), б – фотографии элементов сеток, сформированных: на поверхности стекла: b1 (размер линий 12 мкм, глубина 7 мкм) и b2 (толщина линии 3 мкм, глубина 3 мкм); в глубине стекла на расстоянии 80 мкм от поверхности (ширина линии 10 мкм) b3; резка металлической фольги толщиной 100 мкм – b4 (размер объекта 20 мм), b5 – увеличенный центральный фрагмент изделия на фото b4 (толщина «струны» 20 мкм)*

Особенностями рабочей станции являются возможность микрообработки изделия на трех длинах волн фемтосекундного лазерного излучения, а также широкие возможности индивидуальной конфигурации системы под заказчика.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Двухлетний опыт использования в серийном и опытном производстве АО «Швабе — Оборона и Защита» Лазерной рабочей станции для создания оптических приборов нового поколения показал: система позволяет гибко решать задачи микрообработки как единичных изделий, так и серийной продукции, существенно ускорить создание опытных образцов изделий, повысить качество и надежность. Внедрение лазерной технологии позволило поднять производительность труда и конкурентоспособность продукции, освоить новую номенклатуру изделий, производство которой ранее было невозможно в России, осуществить замену морально и физически устаревшего оборудования, полностью исключить ранее применявшиеся опасные технологические процессы, связанные с плавиковой кислотой.

#### *Список литературы:*

1. *A. Zoubir, L. Shah, K. Richardson, M. Richardson* Practical uses of femtosecond laser micro-materials processing // *Appl. Phys. A* 77, pp.311–315, 2003
2. *Bulushev E. D., Bessmeltsev V. P., Dostovalov A. V., Goloshevsky N. V, and. Wolf A. A.* «High-speed and crack-free direct-writing of microchannels on glass by an IR femtosecond laser»// *Opt. Lasers Eng.*, vol. 79, pp. 39–47, 2016.

# ОПТИЧЕСКИЙ ЭНКОДЕР НА ОСНОВЕ ЧЕТЫРЁХСЕКЦИОННОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЁТКИ

ЖЕРДЕВ А.Ю., ШИШОВА М.В., ЛУШНИКОВ Д.С., ОДИНОКОВ С.Б., МАРКИН В.В.

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва

E-mail: odinokov@bmstu.ru

*Оптический энкодер включает в себя закреплённую подвижную дифракционные решётки. Лазерное излучение проходящее и дифрагирующее на этих двух решётках создаёт интерференционный сигнал на приёмнике излучения. Декодирование фазы интерференционного сигнала позволяет определить текущее смещение решёток друг относительно друга. Известные оптические энкодеры используют несколько точно съюстированных оптических каналов, включающих приёмники чтобы получить сигналы с различной фазой для повышения разрешения энкодера. Мы предлагаем использовать для решения этой задачи один оптический канал с многосекционной анализирующей дифракционной решёткой для упрощения оптической схемы и снижения требований к юстировке. Оптическая схема энкодера на основе четырёхсекционной анализирующей дифракционной решётки разработана и описана в данной статье.*

**Ключевые слова:** оптические энкодеры, оптические датчики линейного положения, дифракционные решётки

## ВВЕДЕНИЕ

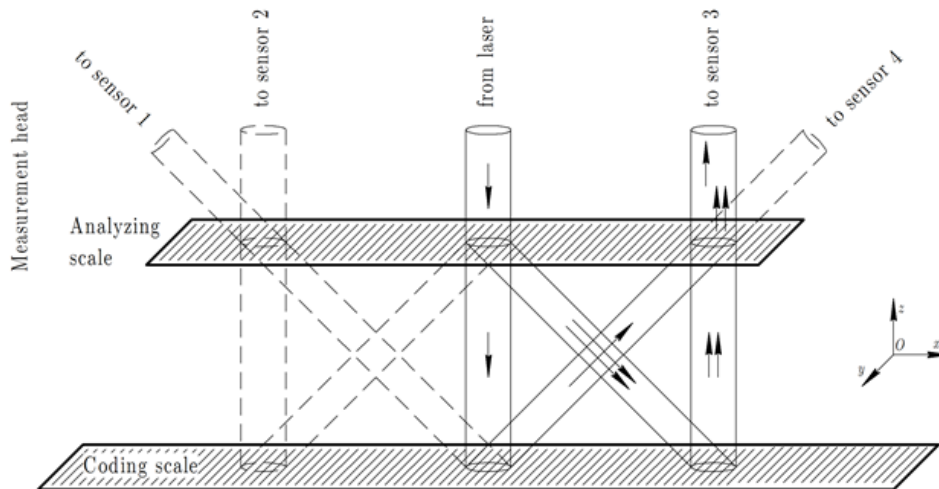
Оптические энкодеры используются в прецизионном машиностроении, требующем нанометрическое разрешение положения. Энкодер включает в себя две части: закреплённая шкала и подвижная измерительная головка.

В основе работы оптического энкодера могут лежать т. н. теневой или интерференционный методы. Теневой метод [1] подразумевает использование двух решёток: в шкале и измерительной головке — для создания картины Муара, в определённой точке которой интенсивность излучения зависит от смещения шкалы. В этой точке расположен приёмник излучения и цифровая обработка сигнала с этого приёмника позволяет определить смещение шкалы. Интерференционный метод [2] подразумевает использование двух дифракционных решёток для создания оптического сигнала путём интерференции пучков, сформированных от одного источника при дифракции на этих решётках в различных дифракционных порядках. На приёмнике излучения образуется интерференционная полоса бесконечной ширины, и, аналогично, цифровая обработка сигнала с приёмника позволяет определить смещение шкалы. Решётка в измерительной головке называется анализирующей шкалой, решётка измерительной шкалы называется собственно кодирующей шкалой.

Шкалы могут быть получены фотолитографическим, голографическим, нарезным, рольным и электронным литографическим методами. Фотолитографический метод [3] не позволяет получать шкалы с периодом менее 10 мкм и, таким образом, подходит только для теневого метода. Голографический метод не позволяет получить шкалы большого размера. Литографический метод требует наиболее современного и дорогого оборудования для получения шкал без ошибок фазировки технологических фреймов, из которых состоят получаемые структуры. Нарезной метод не позволяет получить шкалы с высокой точностью периода штрихов. Рольный метод [4] ещё достаточно новый, очень дорогой и малодоступный.

## 1. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА

Общепринятая оптическая схема интерференционного оптического энкодера показан на рис. 1. Для повышения разрешения и снижения погрешности энкодера необходимо получать несколько разнофазных оптических сигналов. Для решения этой задачи в общепринятой схеме существует четыре оптических канала и четыре приёмника излучения. Расфазировка сигналов достигается тонкой юстировкой оптических элементов.



**Рисунок 1.**  
**Общепринятая оптическая схема**

Возможность минимизации габаритов энкодера ограничена из-за наличия четырёх оптических каналов в схеме (два справа и два слева). На кодирующей шкале должно быть три рабочих точки с некоторым расстоянием между ними.

Юстировка заключается в точном повороте и наклоне лазера и шкал. Поворачивая анализирующую шкалу на малый угол  $\gamma_{AS}$  вокруг оси  $Oy$  можно достигнуть расфазировки сигналов как показано в таблице 1. Расфазировка  $\Delta\Phi_{2-1}$  между сигналами приёмника 1 и приёмника 2 составляет

$$\Delta\Phi_{2-1} = \Phi_2 - \Phi_1,$$

где  $\Phi_1$  – фаза сигнала 1,  $\Phi_2$  – фаза сигнала 2.

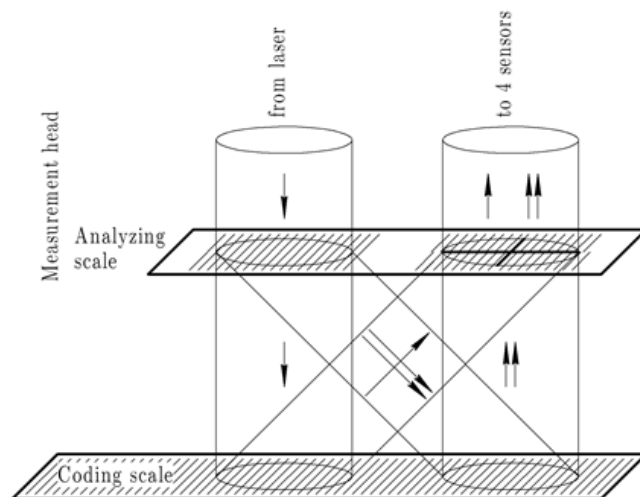
**Таблица 1. Зависимость расфазировки сигналов  $\Delta F$  от угла наклона  $\gamma_{AS}$  анализирующей шкалы и расстояния  $l$  между шкалами**

$\gamma_{AS}$	$\Delta\Phi_{1-1}$	$\Delta\Phi_{2-1}$	$\Delta\Phi_{3-1}$	$\Delta\Phi_{4-1}$
$l = 3 \text{ мм}$				
2"	0	$\pi/4$	0	$-\pi/4$
4"	0	$3\pi/2$	$\pi$	$\pi/2$
8"	0	$\pi$	0	$\pi$
$l = 10 \text{ мм}$				
6"	0	$\pi/4$	0	$-\pi/4$
12"	0	$3\pi/2$	$\pi$	$\pi/2$
24"	0	$\pi$	0	$\pi$

Как видно из таблицы 1, необходим угол 4" между анализирующей и кодирующей шкалами при расстоянии 3 мм между ними, чтобы создать расфазировку четырёх сигналов с шагом  $\pi/2$ .

Мы предлагаем использовать один оптический канал для четырёх приёмников применяя

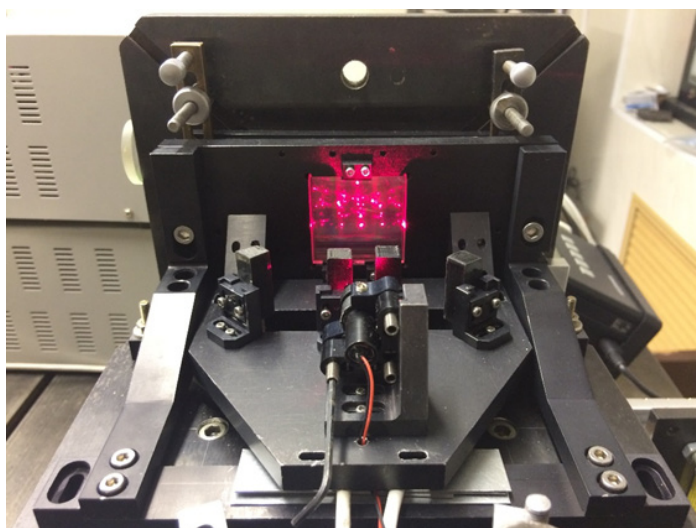
4-секционную анализирующую шкалу вместо четырёх оптических каналов и приёмников со сплошной шкалой. Предлагаемая анализирующая шкала состоит из четырёх секций с равной пространственной частотой около 1,000 л/м, но с различной начальной фазой, сдвинутой на  $\pi/2$  друг относительно друга. Современные электронно-лучевые литографы могут производить подобные сложные структуры. Оптическая схема с одним каналом требует только двух рабочих точек с вдвое меньшим рабочим расстоянием на кодирующей шкале. Расфазировка сигналов достигается автоматически без тонкой юстировки.



**Рисунок 2.**  
**Оптическая scheme based on 4-section analyzing scale**

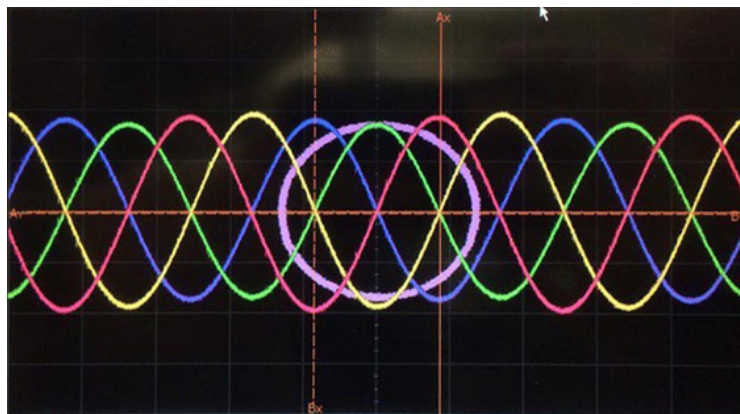
## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе экспериментальных исследований мы создали экспериментальный образец энкодера на основе общепринятой оптической схемой, показанный на рис. 3. Путём юстировки оптической системы и прежде всего положения анализирующей шкалы, мы получаем четыре расфазированных сигнала, показанных на рис. 4. Фигура Лиссажу, построенная по первому и второму сигналам также показана на рис. 4.

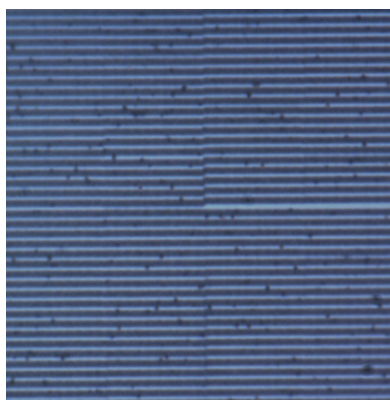


**Рисунок 3.**  
**Фотография экспериментального образца энкодера**





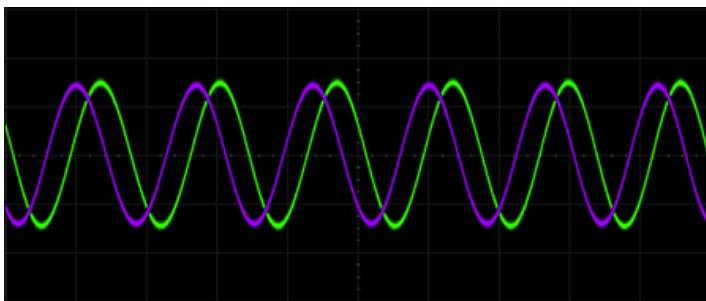
**Рисунок 4.**  
*Sin, Cos, -Sin, и -Cos сигналы, полученные на общепринятой оптической схеме, и фигура Лиссажу для первого и второго из них*



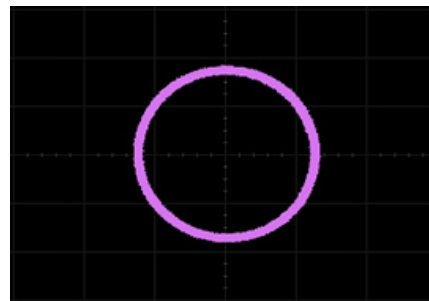
**Рисунок 5.**  
*Вид 4-секционной дифракционной решётки в оптический микроскоп*

Используя 4-секционную шкалу мы получили расфазированные сигналы, два из которых показаны на рис. 6. Фигура Лиссажу, построенная по этим двум сигналам показана на рис. 7.

Как видно из последних рисунков, сигналы, полученные с 4-секционной дифракционной решёткой и фигура Лиссажу, построенная по ним, имеют меньший шум. Измерения показывают, что шум снижается в 4–6 раз. Это вызвано тем, что оптическая схема с 4-секционной шкалой съюстирована вне зависимости от угла наклона  $\gamma$  между анализирующей и кодирующей шкалами и чувствительность шума к разъюстировке других оптических компонентов снижена.



**Рисунок 6.**  
*Sin и Cos сигналы, полученные в 2-секционной схеме*



**Рисунок 7.**  
*Фигура Лиссажу для сигналов, полученных в 2-секционной схеме*

Более того, схема с 4-секционной шкалой показывает меньшую зависимость разности фаз  $\Delta F$  от положения оптических компонентов.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование 4-секционной дифракционной решётки в качестве анализирующей шкалы позволяет: 1) снизить зависимость разности фаз  $\Delta F$  от юстировки оптической схемы, 2) снизить уровень шума в сигналах и 3) снизить размер рабочей зоны на кодирующей шкале. Все эти достижения ведут к снижению габаритов и повышению разрешения энкодера.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в МГТУ им. Н. Э. Баумана при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения Соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0197 (ID RFMEFI57715X0197).

#### Список литературы:

1. *Rozman, J.* Linear Optical Encoder System with Sinusoidal Signal Distortion Below  $-60$  dB / J. Rozman, A. Pleteršek // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2010. – Vol. 59. – No. 6.
2. *Teimel, A.* Technology and Applications of Grating Interferometers in High-Precision Measurement // Precision Engineering. – 1992. – Vol. 14 – No. 4.
3. *Li, X.* Analysis of Signal Distortion Caused by Opening Ratio Variation of Main Scale And Index Scale in Linear Encoder / X. Li, L. Yin, Y. Shi, G. Ye, H. Yu, H. Liu // Advanced Materials Research. – 2013– Vols. 712–715. – P. 1833–1837.
4. *Fan, S.* A Study on the Fabrication of Main Scale Of Linear Encoder Using Continuous Roller Imprint Method / S. Fan, Y. Shi, L. Yin, L. Feng, H. Liu // SPIE Proceedings. – 2013. – Vol. 8916. – P. 3W.
5. *Жердев, А. Ю.* Модель дифракции излучения на дифракционной решётке в произвольной системе координат для анализа погрешностей расположения элементов оптических систем / А. Ю. Жердев, С. Б. Одинокоев, Д. С. Лушников, В. Е. Талалаев, М. В. Шишова // Голография. Наука и практика: 13-я международная конференция «ГолоЭкспо 2016»: Тезисы докладов. – 2016. – С. 291–294.

# СОВРЕМЕННОЕ ОПТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ВАЛЕЙСКИЙ Д.В., ДОРОШКЕВИЧ А.Г., ДЕМИДОВИЧ Т.И.,  
КРАСОВСКИЙ С.Н., ШУШКАНОВА Т.Г.

ОАО «Оптической станкостроение и вакуумная техника»,  
Республика Беларусь. г. Минск

E-mail: os\_vt@mail.belpak.by

Открытое акционерное общество «Оптическое станкостроение и вакуумная техника» на протяжении более сорока лет занимается разработкой и изготовлением оптического оборудования. За это время разработано и внедрено на оптических предприятиях ближнего и дальнего зарубежья более 180 моделей станков, вакуумных установок и промывочных комплексов.

За последние пятнадцать лет сотрудниками акционерного общества разработано 23 модели современного оборудования. Управление этим оборудованием осуществляется промышленными компьютерами или программируемыми контроллерами.

В первую очередь необходимо отметить гамму оборудования с ЧПУ моделей АП-160, АП-350, АПД-500, АП-1000 для обработки прецизионных сферических и асферических деталей диаметром от 50 до 1000 мм с точностью рабочей поверхности по параметру СКО  $\lambda/80$  (при  $\lambda=0,63$  мкм). В настоящее время изготовлен и проходит испытание станок модели П-600, предназначенный для обработки асферических поверхностей с точностью по параметру СКО  $\lambda/80$  и шероховатостью  $R_z - 0,005$  мкм деталей диаметром от 100 до 600 мм. Станок имеет две инструментальные головки: одна для обработки методом ретуши, вторая для обработки с помощью магнитореологической жидкости.

На предприятии проведен большой объем работ по созданию гаммы заготовительных станков:

- моделей РСД-100, АЗР-100 – для автоматического распиливания оптического стекла на мерные заготовки разного профиля;
- моделей КШС-35, АЗК-100 – для кругления исходных стержней квадратного и круглого сечения до диаметра от 15 до 100 мм;
- моделей АСШ-20, МОС-100, АСШ-350, ШС-1600 – для сферошлифования оптических заготовок диаметром от 2 до 1000 мм.

Сферошлифовальные станки позволяют осуществлять ряд других операций: крушение, огабаривание заготовки по высоте, обработку конструкционных и технологических фасок, сверление и расшлифовку осевого отверстия. При обработке на сферошлифовальных станках оптических заготовок диаметром от 100 до 1000 мм не требуется дальнейшего центрирования линзы. В третьем квартале текущего года проведены приёмочные испытания станка модели МФС-350 для профильной обработки оптических заготовок с габаритными размерами от 60 до 350 мм.

В акционерном обществе не прекращаются работы по промывочной тематике. За истекший период создана гамма ультразвуковых установок для промывки оптических деталей:

- моделей АКП-1, и АКП-2 – после механической обработки деталей;
- модели МКП-1 – перед нанесением покрытий на детали методом золь-гель технологии.

Промываются оптические детали из водорастворимого кристалла KDP, поэтому промывка осуществляется в органических растворителях.

- модели АКП-3 – перед нанесением покрытий в вакууме.

Всё разработанное оборудование внедрено в ряде оптических цехов предприятий Российской Федерации и Республики Беларусь.

# ГИБРИДНАЯ 3D ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ГОЛОВКА ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ КОНТАКТНЫХ И БЕСКОНТАКТНЫХ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ЛЕУН Е.В., СЫСОЕВ В.К., ШАЛАЙ В.В., БЕЛОВОЛОВ М.И., КУРЛОВ В.Н.,  
ВОЛКОВ П.В., ШУЛЕПОВ А.В.

АО «НПО Лавочкина», Московская область, г. Химки

E-mail: leun@laspace.ru

Успешное развитие ракетно-космической промышленности в России невозможно без обеспечения высокого качества изделий. Одним из условий его обеспечения при контроле геометрических параметров изделий сложной формы является высокая точность координатных измерений. Для их реализации уже в течение длительного времени широко используются координатно-измерительные машины (КИМ) с измерительными головками касания триггерного типа (рис.1) формирующие переключающий сигнал  $U_{вых}(t) \sim 1(1-10)$  в момент касания наконечника такой головки с поверхностью изделия для синхронного определения координат по трем осям:  $Ox$ ,  $Oy$  и  $Oz$ :  $l_x$ ,  $l_y$  и  $l_z$  [1].



*Рисунок 1.*

*Координатная измерительная машина и измерительная головка*

Точность измерений современных измерительных головок касания, как правило, не хуже  $\approx 0,5-1,5$  мкм. Однако, необходимость достижения высокой точности измерений оборачивается малой скоростью подведения наконечника к поверхности изделия с существенным увеличением времени измерений. Для малых объектов с небольшим числом точек измерений потери времени невелики, но для больших объектов измерения, например, таких как космический радиотелескоп (КРТ) или его элементов они становятся значительными. Так по оценочным расчетам длительность координатных измерений для КРТ Гершеля (запущенного в 2009 г.) и проектируемых Миллиметрон, SPICA и JSWT при измерении одной точки в течение до 10 с соответствует 81, 1806, 306,  $275 \cdot 10^4$  ч. На этом примере наглядно видно противоречие между точностью и длительностью контактных измерений.

Один из путей преодоления этого ограничения лежит в создании и использовании высокоточных бесконтактных 3D измерительных головок, лишенных вышеуказанного недостатка. И в этом направлении достигнут определенный прогресс за рубежом и в России как, например, в [2, 3]. Однако, к полной замене широко используемым контактных измерительных головок с переходом на принципиально другие бесконтактные промышленность пока не готова из-за существенных издержек, определяемыми значительными изменениями элементов и узлов КИМ, алгоритмов их работы и т.п.

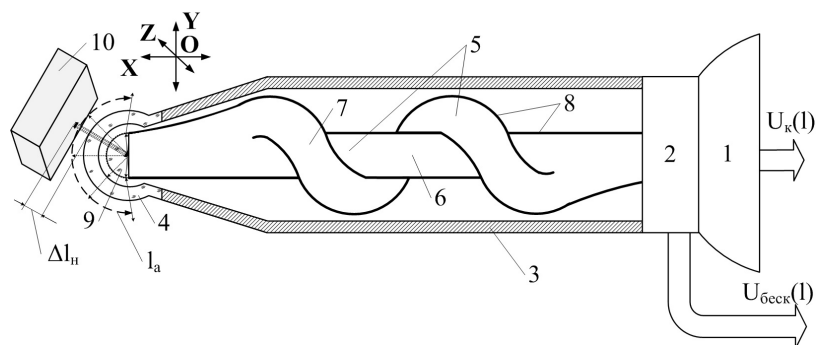
Поэтому более перспективным может быть промежуточный вариант, заключающийся в создании гибридных 3D измерительных головок, способных в зависимости от задачи, особенностей контролируемого изделия реализовать как контактные, так и бесконтактные координатные измерения.

Успешное решение поставленной задачи может быть обеспечено достижениями в оптических технологиях. Так за последнее время достигнут прогресс в получении профилированных кристаллов сапфира различного поперечного сечения с капиллярными каналами [4], позволяя создать сферические наконечники малых размеров с внутренним каналом. Развитие методов низкокogerентной волоконно-оптической интерферометрии [5] позволяет создать высокоточные системы измерений перемещений изделий с шероховатыми поверхностями и/или некогерентными оптическими потоками. Также усовершенствовались технологии создания микролинз на торцах световодов [6], позволяя формировать полусферическую диаграмму направленности излучения и приема оптического потока  $\alpha \approx \pi$  ср.

С учетом этих заделов за счет встраивания бесконтактной измерительной головки внутрь контактной была разработана гибридная 3D измерительная головка для координатных измерений, один из вариантов которой (рис. 2) состоит из контактного 1 и бесконтактного 2 (на основе низкокogerентного интерферометра) измерителей, измерительного стержня 3 со сферическим сапфировым наконечником 4. Внутри последних размещены световодный элемент 5, созданный из оптически связанных прямого 6 и спирального 7 многомодовых световодов с нанесенным внешним металлическим покрытием 8, с установленным на его торце рассеивающей микролинзой 9.

Принцип действия разработанной гибридной 3D измерительной головки позволяет реализовать как контактные, так и бесконтактные координатные измерения изделий 10.

Для контактных координатных измерений используется механическая конструкция 3D измерительной головки: измерительного стержень 2 со сферическим сапфировым наконечником 4. При подведении и последующем касании сапфировым наконечником 4 поверхности изделия 10 измерителем 1 формируется переключающий выходной сигнал  $U_k(1) \sim 1(1-I_0)$  с синхронным измерением трех координат:  $I_x$ ,  $I_y$ , и  $I_z$  и оцифровывании данной точки.



**Рисунок 2.**  
**Гибридная 3D измерительная головка для координатных измерений**

Реализация бесконтактных координатных измерений основана на сочетании двух следующих возможностей:

1) формирование с помощью прямого 5, спирального 6 многомодовых световодов и рассеивающей микролинзы 9 оптических потоков с полусферической трехмерной диаграммы излучения и приема  $\alpha \approx \pi$  ср;

2) создание бесконтактным измерителем 2 оптических потоков с заданной разностью хода  $\Delta l$  для формирования снаружи сапфирового наконечника 4 сферической пространственно-чувствительной координаты  $l_a$ .

Процесс координатных измерений заключается в следующем. В процессе приближения сапфирового наконечника 4 к поверхности изделия 10 происходит ее пересечение этой сферической пространственно-чувствительной координаты  $l_a$ , с регистрацией этого измерителем 2, генерированием переключающего выходного сигнала  $U_{\text{беск}}(l) \sim 1(l-l_0)$  для синхронных измерений трех координат:  $l_x$ ,  $l_y$ , и  $l_z$  и оцифровывании данной точки.

В докладе также описываются другие особенности построения подобных измерительных головок, в частности, необходимость использования импульсного режима, невидимого для человека ИК-излучения, отличия бесконтактного режима работы от контактного и освещаются особенности алгоритмов работы разработанной измерительной головки при бесконтактных координатных измерениях.

#### Список литературы:

1. Гапшиц А.А., Каспарайтис А.Ю., Модестов М.Б., Раманаукас В.-З. А., Серков Н.А., Чудов В.А. Координатные измерительные машины и их применение, Изд-во «Машиностроение», 1988, -328 с.

2. Патент РФ №2235972 Российская Федерация,. Способ оптического контроля геометрических параметров изделий / Леун Е. В. МПК G01B9/02; заявл. 14.08.00; опубл. 10.09.04.

3. Патент на полезную модель №157867 Бесконтактная оптическая головка для контроля геометрических параметров изделий / Леун А. Е., Юдин А. Д., Дмитриев А. О., Привезенцева И. В., Леун Е. В., Пчелкин С. Е. МПК G01B9/02.; заявл. 09.02.15; опубл. 20.12.15, Бюл. № 15.

4. Шikuнова И.А., Курлов В.Н., Стрюков Д.О., Лощенов В.Б. Новые медицинские лазерно-волоконные приборы и инструменты на основе профилированных кристаллов сапфира // Актуальные проблемы физики конденсированного состояния. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2015. С.31-46.

5. Ахсахалян А.А., Ахсахалян А.Д., Волков П.В., Горюнов А.В., Лукьянов А.Ю., Суслов Л.А., Тertyшник А.Д. / Перспективы применения метода тандемной низкокогерентной интерферометрии для измерения формы асферических поверхностей // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2015, №8, с.1-4.

6. Плеханов А.И., Шелковников В.В. Оптические волокна с концевыми фотополимерными микролинзами // Российские нанотехнологии, т.1, №1-2, 2006, с. 240-244.

# ПРИБОР ВЫСОКОТОЧНОГО КОНТРОЛЯ БИЕНИЯ ОСИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРОВ

АЛЕХНОВИЧ В.И., БАЗРОВ Б.М., ЧЕТВЕРНИН М.Ю., ШИРАНКОВ А.Ф.

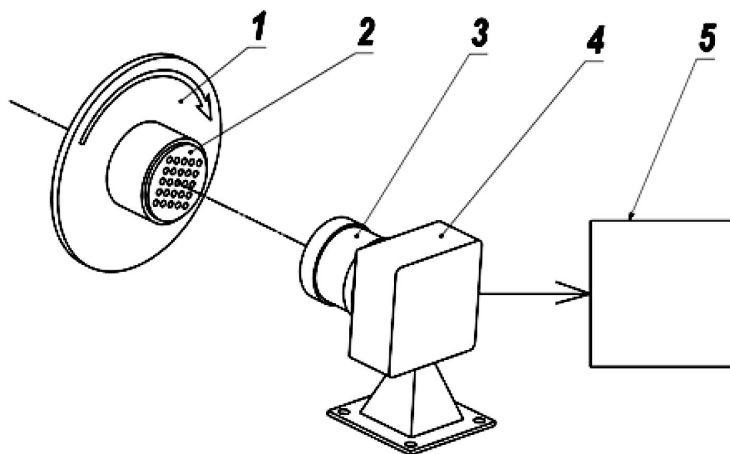
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: vial@bmstu.ru

Высокоточные измерения биения оси вращения детали необходимо для устранения погрешностей определения ее угловых характеристик, а также при настройке шпинделя, удерживающего деталь для уменьшения разрушающего воздействия несбалансированного момента инерции.

Это происходит из-за различных погрешностей изготовления и установки измерительного устройства: поперечной и угловой децентрировки направляющих поворота устройства.

Схема прибора для измерения биения оси вращения ротора представлена на рис.1.



*Рисунок 1.*

*Схема прибора для измерения биения оси вращения ротора:  
1 - вращающийся ротор; 2 - оптическая марка; 3 - объектив;  
4 - ТВ камера с ПЗС матрицей; 5 - микропроцессорный блок*

При измерениях совмещаем ось вращения детали с осью лазерного пучка. С целью уменьшения влияния поперечных смещений детали используем Фурье-объектив.

Основой измерения биения оси является измерение траектории движения выделенной точки в марки при вращении ротора вместе с маркой. Очевидно эта траектория будет отличаться от идеальной окружности как раз из-за биения оси. Погрешность измерения биения оси определяется неравномерностью шумов многопиксельной матрицы, неравномерностью фотонных шумов осветителя.

Покажем влияние каждого фактора на погрешность определения положения марки на фотоприемном устройстве (ФПУ).

Шумы многопиксельной ПЗС матрицы можно разделить на три вида:

- 1) аддитивный случайный шум матрицы;
- 2) структурный шум матрицы, который приводит к появлению мультипликативного шума;
- 3) фотонный шум излучателя;

Наиболее сложным является шум мультипликативный, так как он слабо поддается фильтрации.

Однако при высокоточных измерениях сигнала этой матрицей можно протестировать усиление и квантовый выход каждого пикселя, тем самым уменьшить его влияние до аддитивного шума.

Фотонный шум источника может быть уменьшен за счет стабилизации источника излучения. Будем считать, что как и в предыдущем случае, можно достичь уровня аддитивных шумов.

Таким образом, реально учитывая только влияние аддитивного шума.

Первоначальные измерения позволяют получить погрешность, равную одному пикселю. Для примера рассмотрим ФПУ с матрицей 2048x2048 пк.(пикселя на пиксель) с размером одного пикселя 5x5 мкм<sup>2</sup>.

Для увеличения точности положения марки на ФПУ будем привязывать её к энергетическому центру распределения освещенности на матрице.

Пусть сигнал с каждого пикселя представляет собой сумму регулярного сигнала  $\bar{S}_j$  и случайного аддитивного шума  $\tilde{S}_j$ .

$$S_j = \bar{S}_j + \tilde{S}_j \quad \text{Обозначим отношение } \frac{\tilde{S}_j}{\bar{S}_j} = n;$$

Так как уровень шума  $\tilde{S}_j$  зависит от матрицы условий ее получения и условий ее применения, то  $\tilde{S}_j$  имеет фиксированное значение.

Величина детерминированной составляющей  $\bar{S}_j$  зависит от интенсивности источника. Таким образом можно получить отношение  $n$  достаточно малым:  $n = 0,01 \dots 0,0001$ .

Тогда определение энергетического центра можно получить с точностью долей пикселя.

При  $N=2048$ рх.

$$\sigma_N = \frac{5 \times 10^{-3} \text{ мм}}{2048} = 2,5 \times 10^{-6} \text{ мм} = 2,5 \times 10^{-9} \text{ м} = 2,5 \text{ нм}.$$

Этот результат совпадает с полученным методом компьютерного моделирования измерений.



# ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СЕЛЕНИДА ЦИНКА (CVD-ZnSe) В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

ТИМОФЕЕВ О.В., НОВИКОВ В.П.

**R'AIN Group (ООО «НН Оптика», ООО «Интеллектуальные системы НН»)  
г. Нижний Новгород**

**E-mail:** ovtimofeev@rambler.ru

Процесс химико-механического полирования оптических элементов из поликристаллического селенида цинка, полученного методом химического осаждения из газовой фазы (CVD-метод), имеет ряд особенностей связанных с поликристаллической структурой и механическими свойствами обрабатываемого материала. Кроме того, применение селенида цинка в качестве оптического материала лазерных систем с высокой плотностью мощности предъявляет повышенные требования к качеству обработки поверхности и ставит задачу разработки более совершенных технологий получения поверхностей с гарантированным качеством. В связи с этим целью нашей работы являлось исследование механизмов химических и физических процессов протекающих на поверхности поликристаллического селенида в ходе химико-механического полирования.

Участок механической обработки компании R'AIN Group (ООО «НН Оптика», ООО «Интеллектуальные системы НН») оснащен новейшим и модернизированным оборудованием, позволяющим проводить как черновую обработку материала, изготовление заготовок, предварительную полировку, так и изготовление изделий сложной профильной формы, и финишную полировку оптических элементов. Кроме того, участок оснащен современным контрольно-измерительным оборудованием, которое позволяет решать не только производственные, но и научные задачи.

Выявление механизмов механохимического воздействия на поверхность и механизмов дефектообразования в результате такого воздействия невозможно без надёжных методов контроля чистоты поверхности обрабатываемых материалов. Поэтому была разработана компьютерная методика контроля качества полированных поверхностей, включающая в себя получение увеличенной картины поверхности методом оптической микроскопии и компьютерное распознавание типа и геометрических размеров дефектов, а так же количественное определение их содержания.

В ходе исследований влияния параметров химико-механической обработки (давления, времени, температуры, скорости обработки) на качество обрабатываемой поверхности было показано, что изменение данных параметров в процессе обработки, как по одному, так и в совокупности приводит к существенному изменению механизмов протекающих процессов. И как следствие к изменению количества и геометрических размеров оптических дефектов на полированной поверхности поликристаллического селенида цинка. Изучены механизмы травления и химико-механического полирования поликристаллического CVD селенида цин-

ка, с использованием в качестве химически-активного компонента растворов неорганических кислот, в условиях близкого соответствия химического и механического воздействия на обрабатываемую поверхность.

Таким образом, в результате проведенных исследований разработаны физико-химические основы механохимической модификации поверхности поликристаллического селенида цинка, которые нашли практическое применение при создании методик механического и химико-механического полирования позволяющих получать поверхности высокого оптического качества (диаметром от 5 до 500 мм) – до 2-3 класса чистоты включительно с точностью формы до  $\lambda/8$ .

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРАВЛЕНИЯ И ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОГО ПОЛИРОВАНИЯ CVD-ZnSe С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИРУЮЩИХ ТРАВИТЕЛЕЙ

ТИМОФЕЕВ О.В., ЯШНОВА Н.А.

R'AIN Group (ООО «НН Оптика», ООО «Интеллектуальные системы НН»)  
г. Нижний Новгород

E-mail: ovtimofeev@rambler.ru

Для изготовления оптических элементов необходимо проводить механическое и химико-механическое полирование. Под химико-механическим полированием понимается одновременное сочетание химического и механического воздействия на поверхность для получения более совершенной по структуре и рельефу поверхности по сравнению с чисто химической, либо механической обработкой.

Химическое воздействие обуславливается введением в состав композиции травителей, разрушающих поверхностный слой полируемой поверхности. Механическое воздействие заключается в обработке поверхности мелкодисперсными частицами абразива.

В связи с этим, целью настоящей работы являлось исследование процесса травления и химико-механического полирования CVD-ZnSe с использованием полирующих травителей.

Для выявления механизмов взаимодействия селенида цинка были проведены эксперименты в растворе следующего состава:  $\text{HBr} / \text{H}_2\text{O}_2 / \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3 / \text{H}_2\text{O}$  (50 в интервале температур 20-90°C. В результате проведенных экспериментов была получена зависимость изменения массы образцов селенида цинка от времени протекания процесса травления в растворе  $\text{HBr} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ , которая приведена на рисунке 1. Из рисунка видно, что увеличение температуры травления приводит к увеличению изменения массы образца в ходе обработки, и как следствие к возрастанию скорости травления.

Установлено, что при температурах 20-30°C наблюдается слабый полирующий эффект. Поверхности становятся полупрозрачными, однако скорость травления при данных температурах мала, поэтому полирующий эффект незначителен. При понижении концентрации, в интервале температур 30-40°C наблюдается усиление эффекта полирующего травления, которое сопровождается существенным растравливанием поверхности образцов в местах поверхностных эффектов. Далее при увеличении температуры начинает преобладать селективное травление, т.е. наблюдается интенсивное растравливание поверхности в области поверхностных дефектов и появление ямок травления.

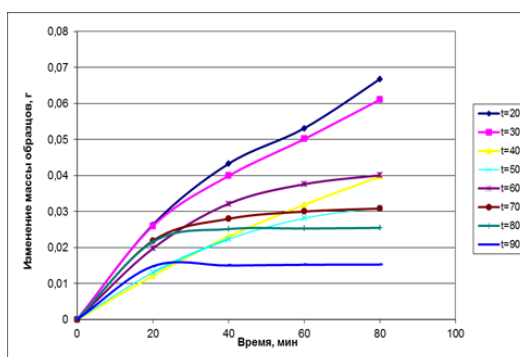


Рисунок 1.

*Зависимость изменения массы образцов селенида цинка в растворе  $\text{HBr} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$  от времени при различной температуре травления*

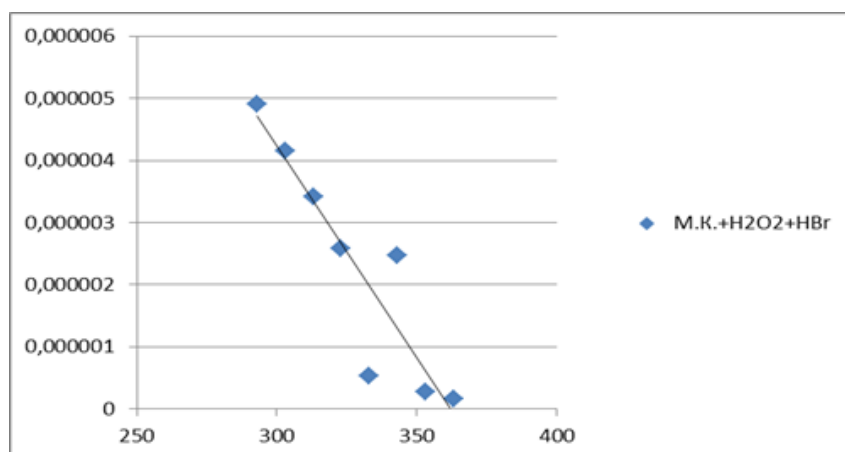
**Таблица 1. Скорости травления селенида цинка  
в водном растворе  $HBr+H_2O_2+C_3H_6O_3$**

Температура T, °C	Средняя скорость травления, моль/(см <sup>2</sup> ·с)	Скорость травления на начальном этапе, моль/(см <sup>2</sup> ·с)	Скорость травления на конечном этапе, моль/(см <sup>2</sup> ·с)
20	$4,91 \cdot 10^{-06}$	$6,35 \cdot 10^{-06}$	$3,46 \cdot 10^{-06}$
30	$4,16 \cdot 10^{-06}$	$7,96 \cdot 10^{-07}$	$4,22 \cdot 10^{-07}$
40	$3,42 \cdot 10^{-06}$	$3,97 \cdot 10^{-06}$	$2,87 \cdot 10^{-06}$
50	$2,58 \cdot 10^{-06}$	$3,72 \cdot 10^{-06}$	$1,45 \cdot 10^{-06}$
60	$5,26 \cdot 10^{-07}$	$8,32 \cdot 10^{-07}$	$2,20 \cdot 10^{-07}$
70	$2,48 \cdot 10^{-06}$	$4,49 \cdot 10^{-06}$	$4,57 \cdot 10^{-07}$
80	$2,81 \cdot 10^{-07}$	$5,55 \cdot 10^{-07}$	$7,06 \cdot 10^{-09}$
90	$1,7 \cdot 10^{-07}$	$3,35 \cdot 10^{-07}$	$5,58 \cdot 10^{-09}$

Для того чтобы установить механизмы возможных процессов на основании полученных нами экспериментальных данных по изменению массы образцов, были рассчитаны скорости травления ZnSe при соответствующей температурах. Полученные результаты приведены в таблице 1.

Из таблицы видно, что скорость травления на начальном и конечном этапе существенно различается. В графическом виде, экспериментальные данные по средней скорости травления представлены на рисунке 2.

Полученные значения скоростей реакции, были использованы для расчета энергии активации  $E_a$  (ккал/моль) процесса травления поликристаллического ZnSe.

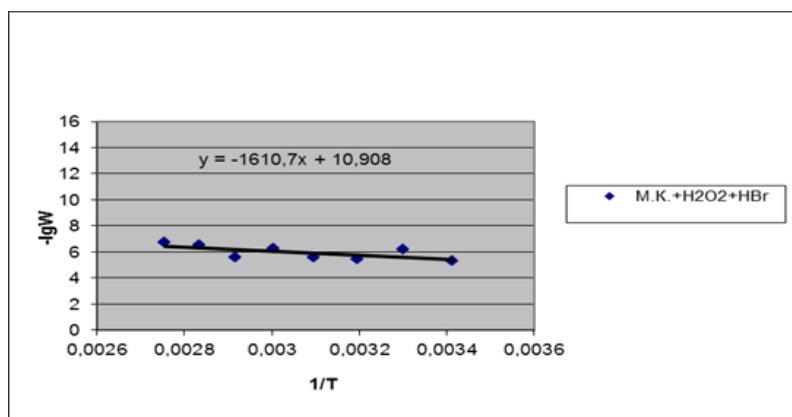


**Рисунок 2.**

**Зависимость скорости травления селенида цинка  
от температуры, в водном растворе  $HBr+H_2O_2+C_3H_6O_3$**

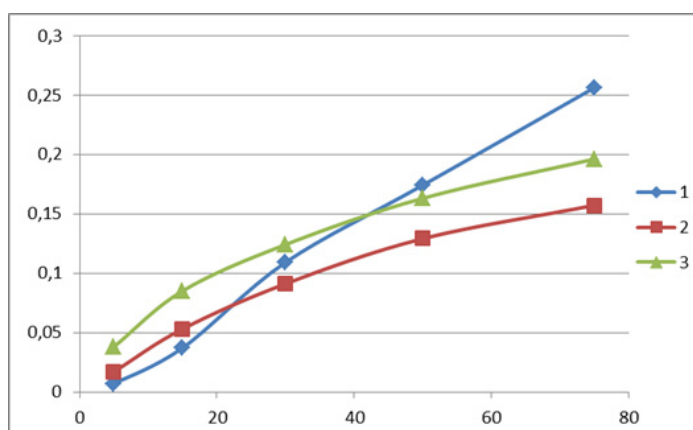
В результате для интервала температур 20-90°C были получены следующие значения: энергия активации травления селенида цинка в растворе  $HBr+H_2O_2+C_3H_6O_3$  составила 3,07 кДж/моль, это говорит о том, что травление протекает в диффузионной области. Т.е. самой медленной стадией процесса травления является диффузия реагентов к поверхности и отвод от поверхности продуктов реакции.

Также в результате эксперимента по химико-механическому полированию были получены изменения массы образцов селенида цинка в процессе полирования от времени. Из рисунка 4 видно, что зависимости не являются линейными, и масса постепенно убывает. Поэтому можно сделать вывод, что скорость полирования не будет постоянна на протяжении всего времени, а будет убывать.



**Рисунок 3.**

**Зависимость  $-lgW$  от  $1/T$  для процесса травления поликристаллического селенида цинка водным раствором  $HBr+H_2O_2+C_3H_6O_3$**



**Рисунок 4.**

**Зависимость изменения массы образцов селенида цинка от времени**

Таким образом, полученные экспериментальные результаты позволили установить механизмы протекающих процессов при травлении и химико-механическом полировании селенида цинка с использованием в качестве ХАК раствора состава  $HBr+H_2O_2+C_3H_6O_3$ . Совокупность полученных экспериментальных результатов по чистоте, и геометрии поверхности позволяет утверждать, что данный состав ХАК можно использовать при изготовлении оптических элементов из поликристаллического селенида цинка с классом чистоты поверхности не ниже третьего.

*Список литературы:*

1. Томашик З.Ф., Шелюк И.А., Томашик В.Н., Стратийчук И.Б., Чернюк А.С. // Химико-динамическое полирование монокристаллов GaAs, GaSb, InAs и InSb травителями  $H_2O_2$ - $HBr$ -молочная кислота. // Вопросы химии и химической технологии, 2009, №5, с. 117-120.

# ВЫПОЛНЕНИЕ КОМПЛЕКСА РАБОТ ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ И УЛУЧШЕНИЮ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА ТЕЛЕСКОПА БТА

АБДУЛКАДЫРОВ М.А., БЕЛОУСОВ С.П., ВЛАДИМИРОВ Н.М., ДОБРИКОВ Н.С., ИГНАТОВ А.Н., ПАТРИКЕЕВ В.Е., ПРИДНЯ В.В., ПОЛЯНЩИКОВ А.В., СЕМЕНОВ А.П., ШАРОВ Ю.А.

АО «Лыткаринский завод оптического стекла», г. Лыткарино Московской обл.

E-mail: lastro@lzos.ru

АО ЛЗОС завершил комплекс работ по восстановлению и улучшению оптических характеристик главного зеркала телескопа БТА (Большой Телескоп Азимутальный) диаметром 6 м. В процессе выполнения работ был разработан и реализован комплекс технологических методов и метрологических средств, которые позволили достичь требуемого качества и точности изготовления главного зеркала со среднеквадратичным отклонением в 0.3 длины волны в оптическом диапазоне.

Целью данной темы являлось выполнение комплекса работ по формообразованию рабочей поверхности главного зеркала БТА (ГЗ), восстановлению и улучшению ее оптических характеристик.

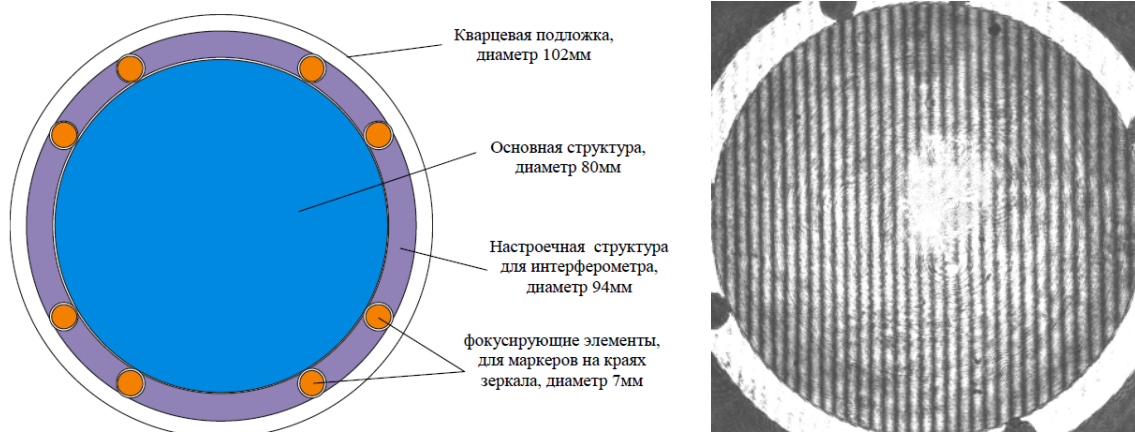
Комплекс работ включает:

- разработку и изготовление корректора волнового фронта и оснастки для контроля рабочей поверхности ГЗ;
- проведение расчетов и выбор системы базирования ГЗ (расчет методом конечных элементов);
- доводку рабочей поверхности ГЗ полированием до СКО отраженного волнового фронта не более  $0,3\lambda$ , (где  $\lambda=632,8$  нм) и равномерно распределенной по поверхности шероховатости не более  $Rq$  3 нм;
- устранение располировок в местах вклеек и завалов по краям зеркала.

В процессе работ по формообразованию для минимизации площади дефектов рабочей поверхности закрытых технологическими вставками были проведены работы по удалению части материала с рабочей поверхности ГЗ. Толщина удаленного материала составила – 8 мм.

В качестве оптического элемента для контроля рабочей поверхности ГЗ был выбран CGH – корректор волнового фронта (CGH-Computer Generated Hologram или ДОЭ- дифракционный оптический элемент). Это оптическая подложка с амплитудной и фазовой дифракционной структурой на одной из поверхностей, рассчитанной с помощью компьютера и изготовленной методом прецизионной лазерной или электронно-лучевой литографии. Корректор преобразует сферический волновой фронт в асферический, соответствующий контролируемой поверхности, обеспечивая нормальное падение лучей на контролируемую оптическую поверхность. Для проверки и аттестации корректора волнового фронта был также изготовлен CGH – имитатор. Это оптическая подложка с амплитудной дифракционной структурой на отражающей поверхности, позволяющая отразить падающие лучи, выполнив условие автоколлимационного хода. При этом CGH – имитатор имитирует оптическую поверхность в непосредственной близости от корректора волнового фронта. На рис. 1 представлено схематическое изображение корректора волнового фронта и интерферограмма волнового фронта корректора, проконтролированная с имитатором зеркала. Фактические отклонения волнового фронта при аттестации CGH – корректора не более  $\lambda/50$ , для  $\lambda = 632,8$  нм. Кроме того, на настроечной структуре голограммы имеются фокусирующие элементы для маркеров на краях зеркала. Они позволяют однозначно

позиционировать интерферометр в комплексе с корректором относительно ГЗ. Причем один из фокусирующих элементов определяет оптическую вершину зеркала, когда осуществлена точная юстировка корректора относительно зеркала и интерферометра, т.е. устранена юстировочная кома. Об этом будет сказано далее.

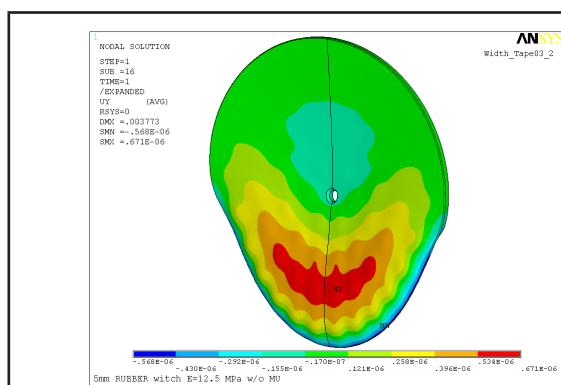


**Рисунок 1.**

***Схематическое изображение корректора волнового фронта и интерферограмма волнового фронта корректора с имитатором.***

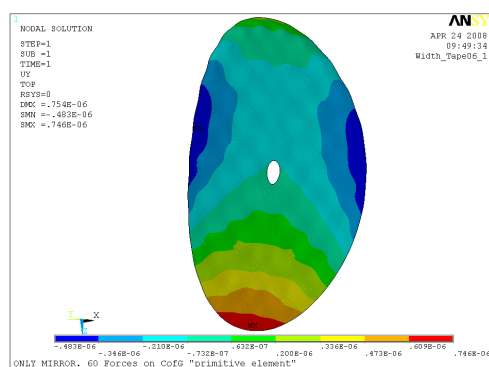
Производственные условия оптического цеха позволяют выполнить контроль зеркала с горизонтальным расположением оптической оси. Вершинный радиус кривизны зеркала 48 метров. Были проведены сравнительные расчеты методом конечных элементов деформации рабочей поверхности ГЗ для двух систем базирования при горизонтальном расположении оптической оси – в штатной оправе и в разгрузочной ленте. В процессе моделирования получены близкие по величине деформации результаты (рис. 2-3). Принципиальным отличием является характер ошибки, возникающей в результате деформации:

- астигматизм при базировании в оправе;
- кома при базировании в ленте.



**Рисунок 2.**

***Деформация рабочей поверхности ГЗ БТА в ленте. RMS 0.56λ, P-V 3.6λ***



**Рисунок 3.**

***Деформация рабочей поверхности ГЗ БТА в оправе. RMS 0.46λ, P-V 2.5λ***

На финишной стадии формообразования из волнового фронта, получаемого в процессе контроля, вычитался волновой фронт разности между разгрузкой в ленте и разгрузкой в штатной оправе. Тем самым, выполнялось формообразование поверхности под заданный волновой фронт, который должен быть скомпенсирован при помещении зеркала в штатную оправу.

Далее выполнялось моделирование деформации зеркала в штатной оправе. Целью моделирования являлось определение рабочих усилий и точек их приложения необходимых для устранения астигматизма, триангулярной комы и квадратичного астигматизма с коэффициентами до  $0.5\lambda$ . Были проведены математические расчеты и моделирование работы штатной оправы в трех положениях:

- направление оптической оси – горизонтально;
- направление оптической оси – вертикально;
- направление оптической оси – под углом  $45^\circ$  к горизонту.

Отклонения отраженного от рабочей поверхности волнового фронта в результате деформаций в штатной оправе при вертикальной ориентации оси RMS  $0.08\lambda$ , P-V  $0.37\lambda$ .

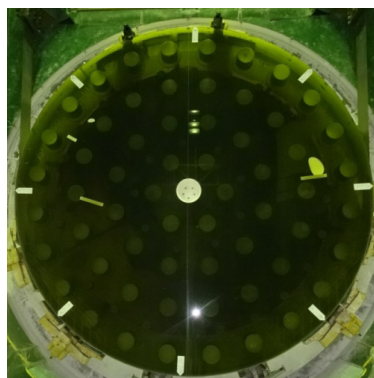
Отклонения отраженного от рабочей поверхности волнового фронта в результате деформаций в штатной оправе при горизонтальной ориентации оси RMS  $0.46\lambda$ , P-V  $2.52\lambda$ .

Отклонения отраженного от рабочей поверхности волнового фронта в результате деформаций в штатной оправе при ориентации оси под  $45^\circ$  RMS  $0.371\lambda$ , P-V  $2.093\lambda$ .

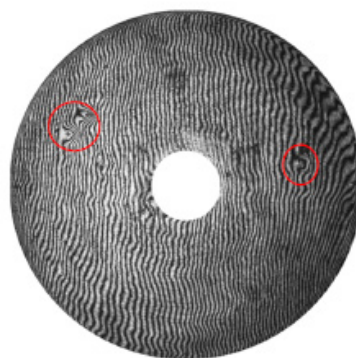
Выполнена минимизация ошибок в областях технологических вставок. На финальной стадии формообразования суммарная площадь дефектов типа «Располировка» составила менее 0.7% и распределилась между 3-мя зонами с искажением не более  $3\lambda$  (рис 4-7).

По результатам фрезерования рабочей поверхности произошло уменьшение массы зеркала БТА. Измеренная масса составила 40621 кг.

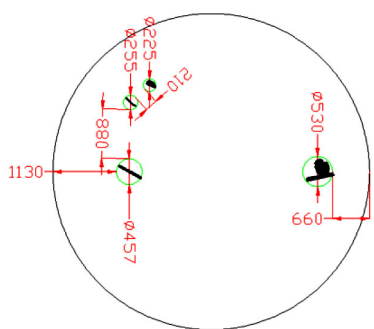
Микрошероховатость, достигнутая на рабочей поверхности зеркала БТА по Rq менее 1,02 нм.



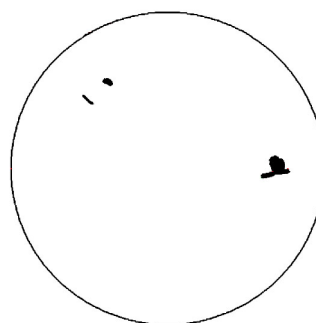
**Рисунок 4.**  
**Вставки на поверхности зеркала**



**Рисунок 5.**  
**Зоны располировок на интерферограмме**



**Рисунок 6.**  
**Заплатки на поверхности детали, дающие располировки, составляли 1.68% по площади, располировки 9.8% на волновом фронте**



**Рисунок 7.**  
**Заплатки на поверхности детали, дающие располировки, составляют 0.3% по площади, располировки на волновом фронте 0.7%**

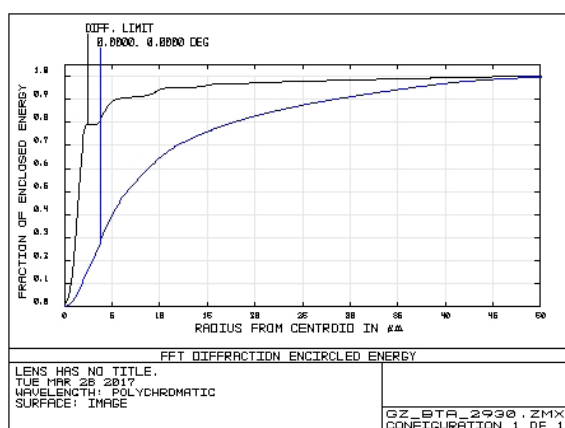


На финальной стадии изготовления рабочей поверхности зеркала были проведены испытания целью которых являлось определения величины и характера регулярных составляющих, вызванных деформацией оптической поверхности в разгрузочной ленте. Суть испытаний заключалась в серии измерений деформации ОП ГЗ при различном угловом положении ГЗ в ленте. Были проведены повороты ГЗ относительно ленты на различные углы:  $+60^\circ$ ,  $-60^\circ$ ,  $+90^\circ$ ,  $+120^\circ$ ,  $-120^\circ$  и  $180^\circ$ . Суммарные отклонения волнового фронта, вызванные деформацией в ленте составили по регулярным составляющим:

астигматизм  $A = 1,5\lambda / \varphi_A = 30,1^\circ$ , триангулярная кома  $T_r = 3,2\lambda / \varphi_{Tr} = -3,1^\circ$ , квадратичный астигматизм  $Q = 1,4\lambda / \varphi_Q = -18,4^\circ$ . Дальнейшие работы по формообразованию рабочей поверхности ГЗ проводились с учетом полученной по результатам испытаний деформации.

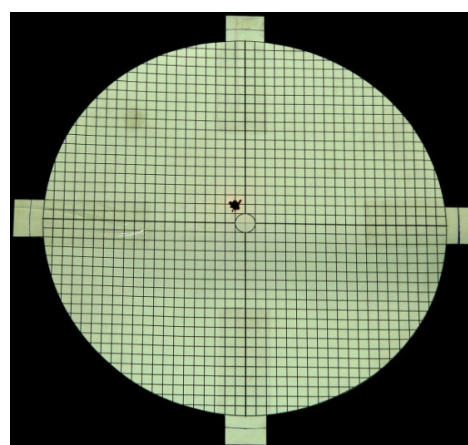
Отклонения волнового фронта отраженного от поверхности ГЗ после удаления деформационных составляющих в разгрузочной ленте - RMS  $0,31\lambda$ , P-V  $3,0\lambda$ .

Значение функции точки рассеивания для ГЗ БТА с обновленной рабочей поверхностью меньше по отношению к действующему и составляет 0.31 угл. сек (рис. 8).



**Рисунок 8.**

*Энергия 80% концентрируется в кружке диаметром 36 мкм. ФТР (функция точки рассеивания) составляет 0.31 угл. сек*



**Рисунок 9.**

*Определение смещения оптической оси относительно геометрического центра зеркала. Шаг сетки 10 мм. Смещение 22 мм*

Как уже отмечалось, на настроенной структуре голограммы имеются фокусирующие элементы для маркеров на краях зеркала. Причем один из фокусирующих элементов определяет оптическую вершину зеркала, когда осуществлена точная юстировка корректора относительно зеркала, т.е. устранена юстировочная кома. Такая юстировка была осуществлена и измерено положение вершины зеркала относительно геометрического центра (рис. 9).

Выводы по результатам аттестации формы поверхности зеркала:

- по результатам серии контролей волнового фронта отраженного от рабочей поверхности зеркала БТА среднеквадратичное отклонение составляет по RMS =  $0,3\lambda$  ( $\lambda=632,8$  нм), по размаху P-V  $3,0\lambda$ ;
- функция точки рассеивания составляет 0,31 угл. сек;
- проведены испытания для выявления регулярных составляющих деформации рабочей поверхности ГЗ в ленте;
- проведено моделирование остаточных регулярных составляющих деформации рабочей поверхности в штатной оправе;
- по результатам аттестационного контроля можно заключить, что достигнутая форма рабочей поверхности соответствует требованиям технического задания.

# ОПЫТ ОБРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ

ДОБРИКОВ Н.С., АБДУЛКАДЫРОВ М.А., ВЛАДИМИРОВ Н.М.,  
ПОЛЯНИЦКОВ А.В., СЕМЕНОВ А.П., ПАТРИКЕЕВ В.Е.

АО «Лыткаринский завод оптического стекла», г. Лыткарино Московской обл.

E-mail: lastro@lzos.ru

На АО ЛЗОС разработана технология формообразования рабочих поверхностей крупногабаритных оптических деталей из карбида кремния, включающая стадии шлифовки, полировки и автоматизированной доводки с программным управлением, разработаны методы и средства контроля оптических поверхностей.

В настоящее время наблюдается увеличивающийся интерес Заказчиков и в России, и за рубежом к карбиду кремния, который обладает уникальным сочетанием физико-механических характеристик, позволяющих создавать принципиально новые конструкции крупногабаритной оптики, включая не только оптические зеркала, но и элементы конструкции аппаратуры (таблица 1).

В рамках проводимых на АО ЛЗОС разработаны технологии и введено в эксплуатацию оборудование, позволяющее изготавливать зеркала из спеченного карбида кремния (по международной классификации SSiC) диаметром до 1500 мм.

*Таблица 1. Физико-механические характеристики SSiC*

Плотность	3,1 - 3,2 г/см <sup>3</sup>
Прочность на сжатие	3000 МПа
Прочность на изгиб при 20 °С	≥ 450 МПа
Прочность на изгиб при 1200 °С	≥ 450 МПа
Модуль упругости Юнга (E)	≥ 420 ГПа
Коэффициент Пуассона (коэффициент поперечного расширения)	0,17 – 0,21
Пористость	< 2 %
Теплопроводность	130 Вт/м·К
Коэффициент температурного линейного расширения (КТЛР)	4,5·10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>

Основными особенностями и преимуществами карбида кремния являются:

- высокая удельная жесткость и прочность (в 4-5 раз выше чем у стеклокерамики), позволяющая создавать сверхоблегченные самонесущие тонкостенные конструкции;
- высокая теплопроводность (в 100 раз выше чем у стеклокерамики), позволяющая мгновенно перераспределяться температуре по всему объему элементов оптико-механической системы, что позволяет избежать ухудшения качества изображения, связанного с термическими деформациями исполнительных поверхностей.

К зеркалам из SSiC применимо большинство технологий оптической шлифовки и полировки. Отличительной особенностью является использование в качестве шлифующего и полирующего материала суспензий на основе алмазных микропорошков различной фракции – от АСН 40/28 до АСН 1/0.

Для доводки поверхностей оптических деталей используется автоматизированная система с программным обеспечением, которая позволяет решить следующие задачи:

- автоматизированным способом оперативно обработать изображение интерферограммы и построить подробную топографию поверхности, что осуществимо при наличии надежных и достоверных средств контроля и разгрузки оптической детали;

- произвести расчет сеанса автоматизированной доводки оптической поверхности и передать данные о траектории движения и скоростях перемещения инструмента в управляющий комплекс автоматизированной системы;

- обеспечить стабильную сходимости технологического процесса доводки оптической поверхности;

- получить высококачественную оптическую асферическую поверхность крупногабаритной детали с произвольной конфигурацией внешнего периметра и отверстий, со среднеквадратичным отклонением формы поверхности от требуемой в  $0.01-0.03 \lambda$  ( $\lambda = 0.6328$  мкм);

- произвести обработку поверхностей облегченных оптических деталей с высоким качеством;

Для достижения этой цели:

- разработаны теоретические методы, математические модели, алгоритмы и программы для ЭВМ, обеспечивающие обработку результатов контроля формы поверхности, расчет технологических сеансов, анализ и корректировку режимов обработки при автоматизированной доводке поверхностей оптических деталей;

- разработаны методы расчета съема материала с поверхности детали, расчета траектории движения малого инструмента для деталей произвольной конфигурации, позволяющие проводить целенаправленный съем материала и гарантированное улучшение формы поверхности;

- разработаны методы определения и корректировки технологических параметров обработки поверхностей оптических деталей, позволяющие сократить время обработки детали и ускорить процесс сходимости;

- разработаны технологические приемы обработки поверхностей и выявлены особенности обработки оптических деталей из карбида кремния, разработан специальный инструмент и полировальная суспензия на основе алмазных микропорошков;

- выполнен анализ особенностей полировки поверхностей при базировании оптических деталей в различных штатно-технологических разгрузочных устройствах;

- произведена экспериментальная проверка разработанных методов и программного обеспечения и изготовлены опытные образцы деталей из карбида кремния.

Формообразование оптической поверхности деталей из карбида кремния можно разделить на 2 основных этапа (рис. 1):

1. Обработка детали полноразмерным инструментом – шлифовка/полировка.

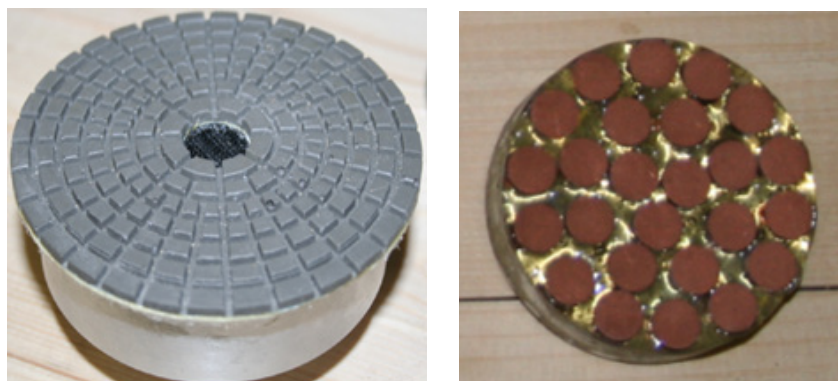
2. Обработка детали малым инструментом с использованием управляющей программы.

На первом этапе применяется последовательно латунный инструмент, инструмент из оргстекла и смолы с постепенным уменьшением фракции микропорошка, который составляет основу полирующей суспензии. На втором этапе используется исключительно смоляной инструмент. Стоит отметить, что ранее было опробовано несколько разновидностей инструмента, изготовленного на основе связанного алмаза – использовалась органическая, медная, латунная связка. Но приемлемых результатов достичь не удалось – поверхность покрывалась сеткой царапин и ни увеличение скорости обработки, ни повышение давления не позволяли избавиться от этих дефектов. Переход на полирующие суспензии дал необходимый результат и позволил добиться шероховатости оптической поверхности порядка ( $R_q$ ) порядка 1 нм. На рис. 2 показаны типы применяемого инструмента.

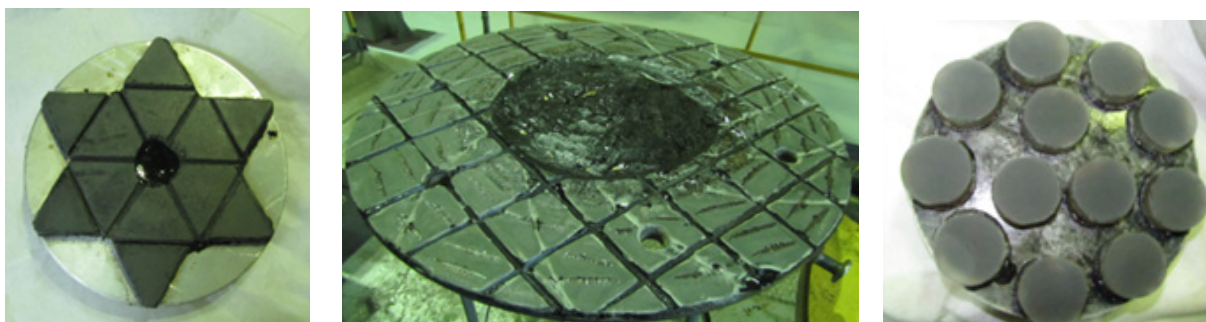


**Рисунок 1.**

**Обработка деталей на шлифовально-полировальном станке  
и станке автоматизированной доводки**



**а)**



**б)**

**Рисунок 2.**

**Типы инструмента, применяемого при обработке деталей из карбида кремния.**

**а) - инструмент на связанном алмазе;**

**б) - инструмент для использования совместно с полирующей  
суспензией (несвязанный алмаз)**

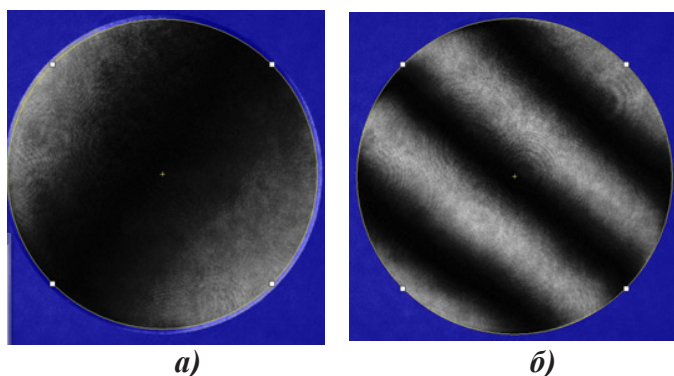
В процессе отработки технологии были последовательно изготовлены зеркала диаметрами 300, 540 и 775 мм (рис. 3). Для определения жесткости материала, способности деталей держать форму поверхности, была произведена обработка зеркала диаметром 300 мм, контроль проводился при разгрузке в ленте (рис. 3). При нулевом положении удалось достичь следующих отклонений отраженного волнового фронта:

- $PV=0.164$   $RMS=0.017$  – на целой детали;
- $PV=0.085\lambda$ ,  $RMS=0.015\lambda$  – в оптической зоне ( $\varnothing$  280 мм).

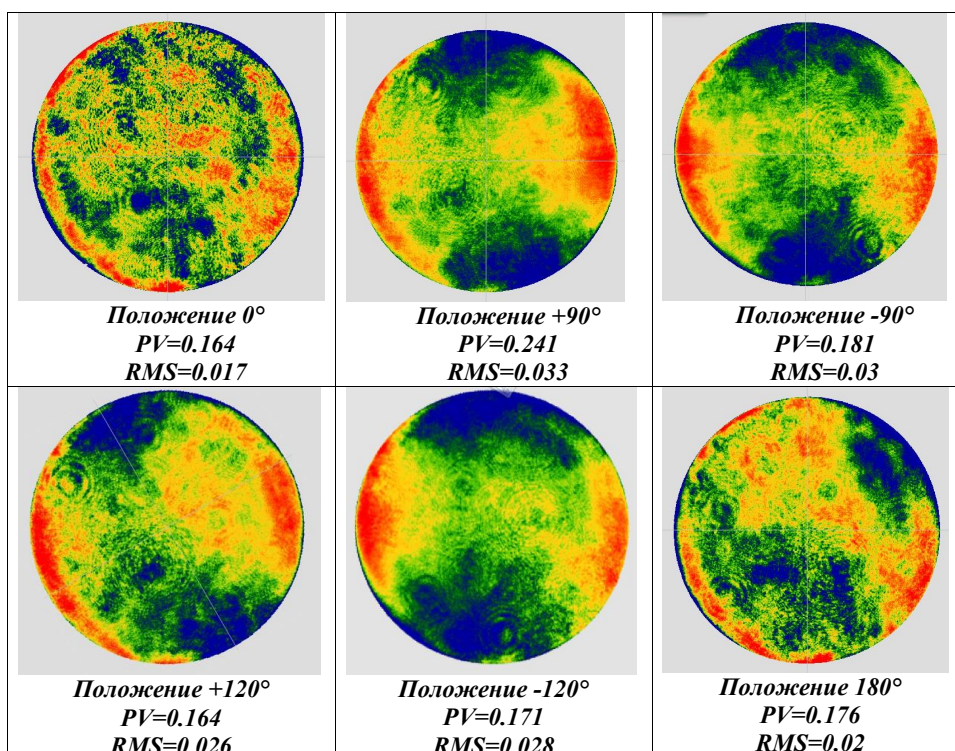
Таким образом, отклонение от заданной формы поверхности (по СКО) составило 4,75 нм, что уже само по себе является значительным достижением и говорит об уникальных свойствах зеркал из карбида кремния – жесткости и способности держать форму.



**Рисунок 3.**  
*Зеркало Ø300 мм и стенд контроля при разгрузке в ленте*



**Рисунок 4.**  
*Интерферограммы, полученные на приборе 4D PhaseCam 5030:*  
*а) - интерференция в 0 положении;*  
*б) - интерференция в положении +90°*



**Рисунок 5.**  
*Топографии отраженного волнового фронта при различных положениях зеркала в ленте. Топографии приведены для целой детали (без учета оптической зоны) и повернуты до метки, нанесенной на зеркале*

После завершения финишной доводки был произведен контроль зеркала при поворотах в ленте относительно нулевого положения на  $+90^\circ$ ,  $-90^\circ$ ,  $+120^\circ$ ,  $-120^\circ$  и  $180^\circ$ .

Результаты контроля показаны на рис. 5. На топографиях видно, что основной вклад в общую ошибку при повороте зеркала вносит астигматизм. Наихудшая ошибка появляется при повороте на  $\pm 90^\circ$  -  $0,033 \lambda$  ( $\lambda = 0,6328$  мкм). На сегодняшний день для подобных деталей стандартное требование к отраженному от оптической поверхности волновому фронту составляет  $0,03\lambda$  (по СКО). И это уже лежит на границе технологических возможностей. На рассматриваемой детали удалось достичь этого высокого требования при любых положениях зеркала относительно разгрузки. По сути разгрузка не повлияла на характеристики оптической поверхности.

Проведенный эксперимент доказал, что зеркала из карбида кремния обладают уникальными свойствами, и этот материал имеет перспективное будущее в применении при создании современных оптико-электронных комплексов.

# ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАКОВ

ДУБОВ В.В., ПЕРЕБЕЙНОС В.В., РЫЖКОВ А.А., КУЗНЕЦОВ А.Н.

АО «Лыткаринский завод оптического стекла», г. Лыткарино Московской обл.

E-mail: ogk45@lzos.ru

АО «ЛЗОС» с 70-х годов производит датчики высоты нижней границы облаков построенные на принципе измерения времени пролета света до рассеивающей среды. Старое поколение приборов использовало импульсные газонаполненные лампы с длительностью импульса в единицы микросекунд имело довольно габаритную оптику, а само светолокационное устройство состояло из двух блоков. Новые поколения приборов используют в качестве источника света лазеры и дискретизируют полученный сигнал при помощи АЦП, хотя так же оснащены все еще габаритной оптикой и состоят из двух разнесенных между собой передатчика и приемника сигналов.

Прогресс в разработке высокоэффективных квантовых счетчиков и однофотонных приемников, работающих без промежуточных усилителей электрического сигнала, позволил разработать сотрудникам ОАО «Эполар» и АО «ЛЗОС» лидар нового поколения ЛДВО-01 с малым, безопасным для глаз, уровнем излучения на трассе зондирования, сравнимым с интенсивностью естественной освещенности.

ЛДВО-01 имеет следующие характеристики:	
Длина волны излучения	1,064 мкм
Длительность импульса излучения	< 1 нсек
Энергия импульса излучения	3 мкДж
Частота следования импульсов	6000 Гц
Диапазон измерения ВНГО и ВВ	10-3000 м
Интервал измерения	20 – 30 сек
Точность измерения расстояния	±5 м во всем диапазоне дальности
Безопасность	класс 1М IEC/EN 60825-1
Максимальная дальность связи	≤ 8 км (RS 232)
Напряжение питания	220 В
Потребляемая мощность	≅ 120 Вт
Габаритные размеры (Вес):	400 x 160 x 90 мм (4,5 кг)
блок оптический	400 x 160 x 90 мм (4,5 кг)
блок питания и связи	220 x 225 x 145 мм (3,5 кг)
Масса комплекта (без ноутбука и монтажных конструкций)	- 8 кг
Возможна поставка ЛДВО-01 с батареей резервного питания - аккумулятором 12В. 7 А-час.	
При этом обеспечивается автономная работа лидара в течение 1 часа	



В таких лидарах для получения представительной физической информации об объекте исследования, необходимо использовать длинный цуг из нескольких тысяч микроджоульных лазерных импульсов и статистический режим обработки информации. Для чего в процессоре организуется массив из тысячи элементов с разрядностью в 1 бит. Номер элемента массива соответствует времени, равному произведению скорости света на удвоенную дистанцию до световозвращающего аэрозоля с кратностью пять метров. Затем массивы складываются.

Таким образом получается эхограмма отраженного сигнала. Далее, путём решения лидарного уравнения, строятся графики концентрации рассеивающего аэрозоля и поглощения по трассе.

ЛДВО-01 обладает следующими преимуществами:

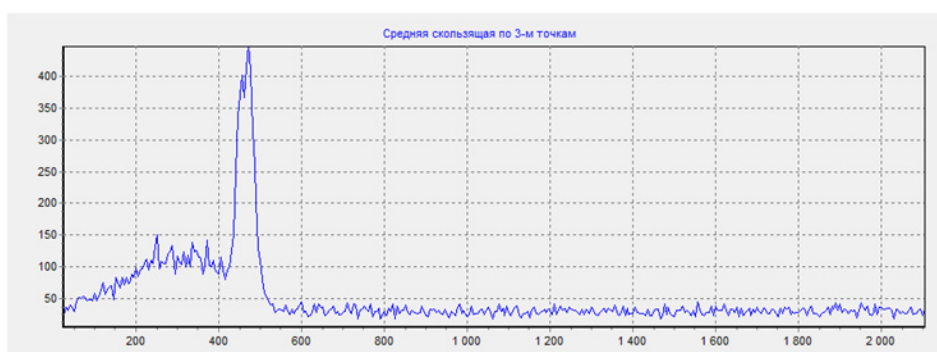
небольшая мощность используемого лазера обеспечивается источниками питания с небольшой средней мощностью, что определяет низкие массогабаритные характеристики всего устройства и возможность работы с автономным источником питания небольшой емкости;

цифровые цепи управления, регистрации и обработки сигнала без применения аналого-цифровых преобразователей, усилителей, при низковольтном питании – повышают надежность и точность измерений;

компактность и малая масса снимают проблему транспортировки и, при необходимости, обеспечивает возможность быстрого развертывания в полевых условиях;

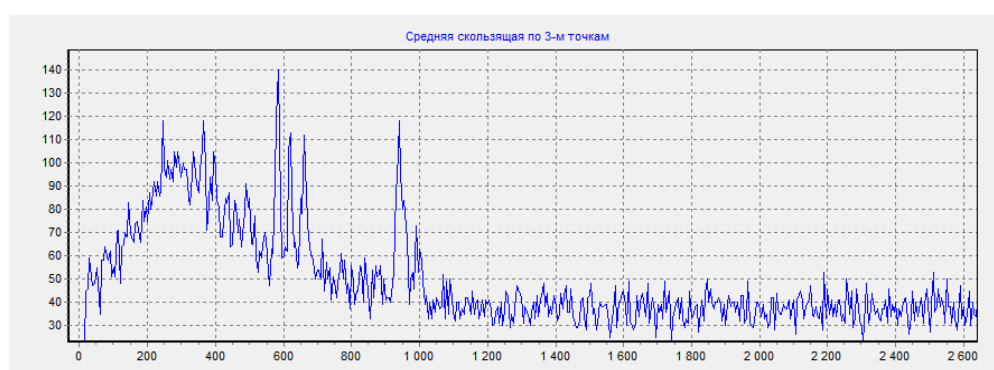
Существенным преимуществом счетчика квантов является то, что приемник может работать в условиях сильной перегрузки по световому потоку. С учетом высокой чувствительности этот фактор обеспечивает работу лидара без мертвой зоны, т.е. сигнал рассеяния может быть принят с малых расстояний без опасности выхода приемника из строя. Это особенно важно при измерении дальности до аэрозольного облака или высоты облачности в условиях сильных осадков, снегопада, дождей или туманов. Этот режим работы был экспериментально проверен на примере зондирования многослойных облаков в сильный снегопад, когда визуально не было никакой возможности оценить наличие даже нижней границы облачности, и в условиях дождя.

На рисунках 1 и 2 показан пример зондирования ЛДВО-01 облачности в условиях осадков в виде дождя.



**Рисунок 1.**

**Профиль сигнала обратного рассеяния импульсов лидара при зондировании облачности в первые минуты после начала сильного дождя. Чётко видна нижняя граница облака на высоте 400 м. Горизонтальная ось калибрована в метрах.**



**Рисунок 2.**

**Профиль сигнала обратного рассеяния импульсов лидара при зондировании облачности в период окончания дождя. Наблюдается подъем облачного слоя с 400 м (см. рис. 5) до 1000 м, а также несколько слоёв облачности до высоты 1000 м**





**Рисунок 3.**

**Профиль сигнала обратного рассеяния импульсов лидара при зондировании облака водяного аэрозоля, распыляемого в коридоре**

Высокая чувствительность ЛДВО-01 и высокое пространственное разрешение за счет короткого зондирующего импульса (~1нс) позволяют определять распределение поглощения по трассе зондирования и тем самым определять метеорологическую дальность видимости на базовой дистанции до 3 км. При этом не важно, в каком направлении ведется зондирование (вертикальное, горизонтальное или наклонное). На рисунке 4 представлены графики эхосигнала полученные с помощью ЛДВО-01 во время ледяного дождя. Верхний график –исходный эхосигнал от ЛДВО-01, второй график отражает сглаженный эхосигнал по 3-м точкам (в данном примере сглаживание не проводилось), на третьем графике показан эхосигнал за вычетом фона и шума приемника и на четвертом графике представлена диаграмма суммарного поглощения по трассе зондирования (верхняя горизонтальная линия порог видимости).

Согласно четвертого графика дальность видимости составляет 590 м



**Рисунок 4.**

**Пример обработки результатов измерения ЛДВО-01 во время ледяного дождя прошедшего в Москве 30.10.2010 г. в 19 час 27 мин.**

Данное свойство ЛДВО-01 позволяет в дальнейшем использовать его в качестве дистанционного измерителя наклонной дальности видимости, что важно для обеспечения безопасности посадки самолетов в аэропортах.

**Список литературы:**

1. Дубов В.В., Макаров В.С., Перебейнос В.В., Першин С.М. Патент Российской Федерации «Способ светолокационного измерения высоты облачных слоев и устройство для его осуществления» № 2361237 от 10 июля 2009 г.

# ИЗГОТОВЛЕНИЕ И КОМПЛЕКСНЫЙ КОНТРОЛЬ АСФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЯ «АВРОРА-2»

ГОРШКОВ В.А., ВАСИЛЬЕВА Е.Ю., НЕВРОВ А.С., ЩЕННИКОВА Т.И.  
\*ГЕРАСИМЕНКО В.В., \*ПОЗДНЯКОВ Ю.И., \*СКЛЯРОВ С.Н.

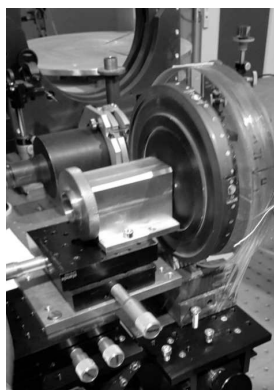
Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Оптика», г. Москва  
\*ПАО «Красногорский завод им.С.А.Зверева», г. Красногорск

E-mail: vladgor@bk.ru

В апреле 2016 г. с космодрома «Восточный» был выведен на рабочую орбиту малый космический аппарат (МКА) «Аист-2Д». На МКА установлена широкозахватная мультиспектральная оптико-электронная аппаратура (ОЭА) видимого диапазона «Аврора». ОЭА «Аврора» разработана ПАО «Красногорский завод им.С.А.Зверева» совместно с НПО «ОПТЭКС» - филиалом АО «РКЦ «Прогресс». С целью повышения выходных оптических характеристик ОЭА до уровня дифракционного предела разработчиком ПАО «КМЗ им.С.А.Зверева» было принято решение об изготовлении ОЭА (условно «Аврора-2») с использованием асферических оптических компонентов с повышенными техническими параметрами по критерию RMS и проведению комплексных исследований системы при различных воздействиях внешних факторов. Первоначальной задачей ставилось изготовление АО «НПО «Оптика» вторичного зеркала объектива ОЭА «Аврора-2» и проведение исследований совместно с имеющимся в наличии ранее изготовленным главным зеркалом. Формообразование главного и вторичного зеркал объектива ОЭА «Аврора-2» проводилось в АО «НПО «Оптика», комплексные исследования осуществлялись совместно.

При изготовлении вторичного зеркала АО «НПО «Оптика» было предложено использовать оптическую заготовку высокого качества (цедур, кварц, ситалл) с целью ее контроля как линзового компонента. Представленные заготовки, предварительно обработанные на станках фирмы Optotech, при их прополировке и асферизации АО «НПО «Оптика» с использованием инструмента «маски» выявили значительные дефекты материала (свилы, пузыри) что сделало невозможным формообразование асферической поверхности. Кроме того, по просьбе заказчика формообразование необходимо было проводить в штатной оправе, ввиду выявленной деформации поверхности зеркала при его штатной установке (приклейке).

Для выполнения этого пожелания в АО «НПО «Оптика» был разработан и изготовлен интерферометр Физо с эталонной асферической поверхностью, эквидистантной форме поверхности вторичного зеркала, позволяющий осуществлять интерференционный контроль поверхности вторичного зеркала аналогично пробному стеклу (рис. 1).



*Рисунок 1*

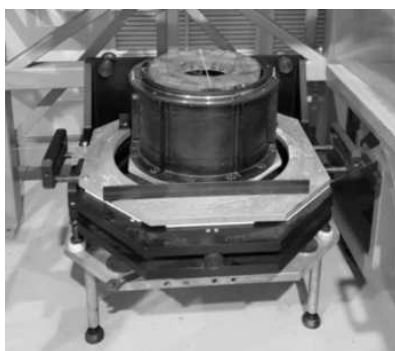
Изготовленное вторичное зеркало комплексно исследовалось с имеющимся у Заказчика главным зеркалом как система «главное зеркало – вторичное зеркало – корректор поля».

В результате было выявлено:

- наличие астигматизма главного зеркала при его креплении в штатной оправе;
- влияние местных зональных ошибок на главном зеркале;
- влияние мелкоструктурных ошибок вторичного зеркала на качество суммарного волнового фронта.

Было принято совместное решение:

- ужесточить требования к зеркалам по критериям PV и RMS ( $PV = 1/10$ ,  $RMS = 1/60$ , MCO не более  $1/80$  для  $\lambda = 0,6328$  мкм );
- ввести требования на величину местных ошибок ( $1/15$ );
- проводить обработку главного зеркала с использованием штатной системы базировки (рис. 2);
- проводить измерения формы поверхности главного зеркала при его креплении в горизонтальной схеме контроля.

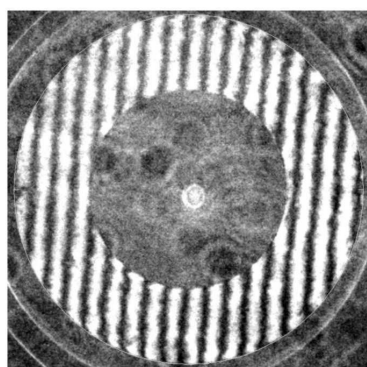


**Рисунок 2**

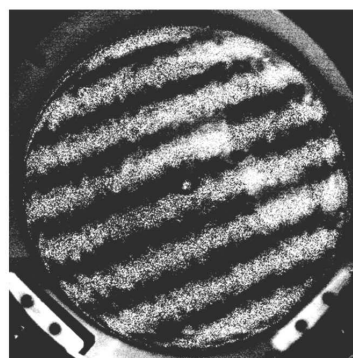
Для достижения указанных целей АО «НПО «Оптика» была разработана и успешно применена новая технологическая программа «Анфас», минимизирующая MCO.

По главному и вторичному зеркалам получены следующие результаты:

- главное зеркало:  $PV = 1/12$ ,  $RMS = 1/101$ ,  $MCO = 1/144$
  - вторичное зеркало:  $PV = 1/8$ ,  $RMS = 1/55$ ,  $MCO = 1/100$
- удовлетворяющие новым требованиям заказчика.



**а)**



**б)**

**Рисунок 3.**

**а) - интерферограммы главного зеркала; б) - вторичного зеркала**

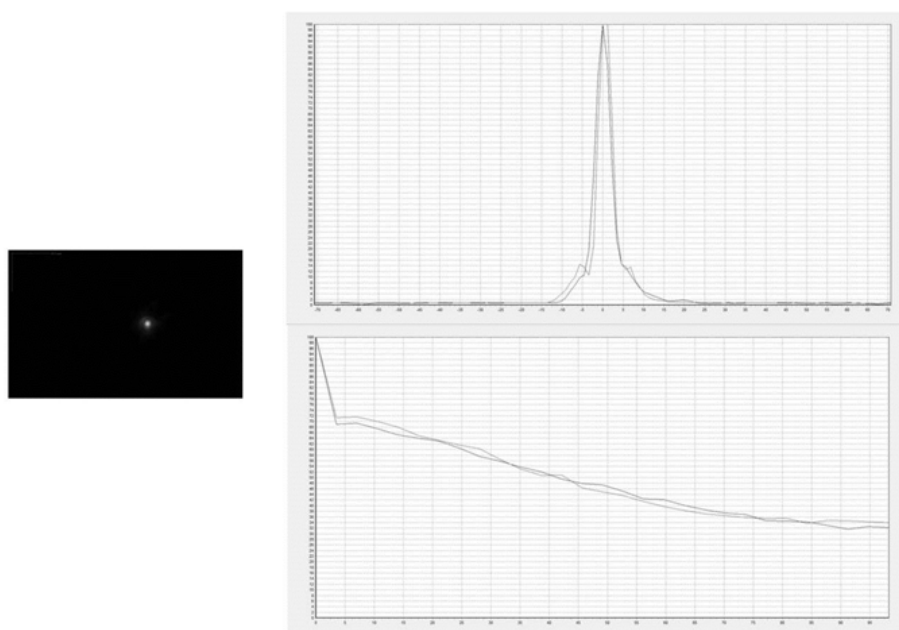
На основании полученных результатов были проведены комплексные измерения собранной системы «главное зеркало – вторичное зеркало» при горизонтальном расположении оптической оси системы (рис. 4) с использованием внеосевого зеркального коллиматора АО «НПО «Оптика» с рабочим полем 400 мм и фокусом 6 м.



*Рисунок 4*

Полученные параметры указанной системы удовлетворили требования заказчика.

Измерения, выполненные специалистами КМЗ с использованием корректора поля при вертикальном расположении оптической оси системы «главное зеркало – вторичное зеркало – корректор поля» показали результаты, представленные на рис. 5.



*Рисунок 5*

Опыт, полученный в результате проведения совместных исследований, в дальнейшем будет использован при разработке нового поколения ОЭС.

# СИСТЕМА АДАПТАЦИИ ВНЕОСЕВОГО АСФЕРИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА Ø1100 мм

ГОРШКОВ В.А., КОРНЕЕВ Н.Г., НЕВРОВ А.С.,  
КАЗАНЦЕВ А.О., ПОНОМАРЁВА О.А., САЛЬНИКОВА Л.Ю.

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Оптика», г. Москва

E-mail: vladgor@bk.ru

При изготовлении и эксплуатации крупногабаритных высокоточных оптических деталей возникает проблема, связанная с деформацией рабочей поверхности оптической детали при различных её пространственных положениях под собственным весом. На примере зеркала диаметром 1100 мм демонстрируется возможность адаптации формы поверхности до требуемой точности с помощью программно-управляемых актуаторов. В докладе обсуждается принцип работы программы адаптации, получение функций отклика поверхности на единичное воздействие актуатора, устройство электронно-механического блока управления актуаторами, а также предельные возможности адаптации.

Специалистами АО «НПО «Оптика» была исследована динамика изменения формы поверхности внеосевого асферического зеркала Ø1100 мм с радиусом рабочей поверхности 18 000 мм при различном пространственном положении. Результаты исследований показали, что имеет место нестабильность формы поверхности зеркала в диапазоне от достигнутых значений среднеквадратического отклонения от номинальной формы (СКО)  $\lambda/80$  до величин  $\lambda/20$ . Принято решение осуществить адаптирование формы поверхности зеркала. Для этого была разработана система адаптации, содержащая механический блок с расположенной на нём системой актуаторов, осуществляющих физическое воздействие на тыльную нерабочую поверхность зеркала, блок управления и программа адаптации. Последняя предназначена для вычисления перемещений актуаторов, обеспечивающих усилия, которые должны быть приложены к обратной поверхности зеркала для того, чтобы компенсировать искривления рабочей поверхности. Известны аналогичные системы компенсации оптических aberrаций поверхности путем механических воздействий на оптическую деталь [1], [2].

Рассматривались варианты кругового расположения актуаторов и по прямоугольной сетке. Для каждой конфигурации теоретически рассчитаны топографические карты идеальной рабочей поверхности, деформированной воздействием одного актуатора величиной 10 Н со стороны нерабочей поверхности, названные функциями отклика рабочей поверхности на единичное воздействие актуатора (рис. 1).

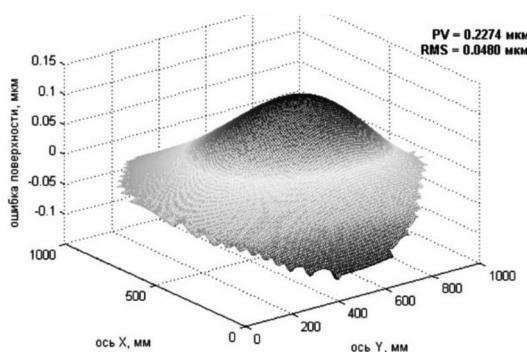


Рисунок 1.

*Вид функции отклика рабочей поверхности на единичное воздействие*

*Таблица 1. Технические характеристики системы адаптации*

Диаметр зеркала	1155 мм
Диаметр световой зоны	1100 мм
Количество актуаторов	22
Диапазон адаптации	Не менее 8 крат
Точность формы поверхности (RMS) после адаптации	Не более $\lambda/80$
Время адаптации	Не более 30 мин.
Датчик обратной связи деформаций рабочей поверхности зеркала	Интерферометр
Система воздействий на форму поверхности	Магнитная
Диапазон силового воздействия	0,1÷3 кг
Система управления	2-контурная, компьютерно-управляемая
Программное обеспечение	Программа «Адаптация», разработана АО «НПО «Оптика»
Длина волны	0,6328 мкм

Определение оптимальных величин усилий осуществляется путём многофакторного анализа с использованием метода градиентного спуска. Суть метода заключается в том, что минимум функции нескольких переменных находят, последовательно перемещаясь от точки к точке в пространстве значений аргументов функции вдоль направлений, противоположных градиенту функции в каждой точке.

В системе адаптации целевой функцией является СКО адаптированной поверхности, зависящее от усилий приводов. В начале работы алгоритма адаптации происходит задание нулевых начальных значений усилий приводов. Затем на основании математической модели происходит вычисление частных производных целевой функции, по усилиям каждого из приводов. После этого осуществляется определение направления в пространстве усилий приводов, противоположного градиенту целевой функции. Затем происходит перемещение в пространстве усилий приводов вдоль данного направления на некоторое расстояние и выбор новых исходных значений усилий приводов. Данные действия повторяются итеративно до тех пор, пока не будет найден минимум целевой функции, в котором градиент равен нулю.

При построении математической модели воздействия системы адаптации на оптическую деталь использованы следующие допущения:

- 1) Функция отклика поверхности на воздействие привода системы адаптации линейно зависит от усилия, вырабатываемого приводом.
- 2) Функция отклика поверхности на одновременное воздействие двух и более приводов системы адаптации с некоторыми усилиями равна сумме функций отклика на воздействие каждого из приводов в отдельности с данными усилиями.

В компьютерной программе адаптации предусмотрена возможность моделировать характерные ошибки поверхности, вносящие аберрации волнового фронта типа астигматизм, кома и трёхлистник. При этом можно задать размах и угол аберрации. Программа формирует топографическую карту поверхности с указанной ошибкой. Проведя цикл адаптации, можно анализировать возможности адаптации конкретных ошибок при различных расположениях и количестве актуаторов. Также возможно механически вводить ошибку в рабочую поверхность, чтобы компенсировать ошибки других компонентов оптической системы.



**Рисунок 2.**  
**Общий вид системы адаптации**

Имея топографическую карту реальной поверхности, подлежащей адаптации, программа подбирает линейную комбинацию функций откликов, создающую деформацию, приближенно равную реальной с противоположным знаком. Величины усилий пересчитываются в величины перемещений актуаторов и количество шагов шаговых двигателей. Пример таблицы рассчитанных перемещений – на рисунке 3.

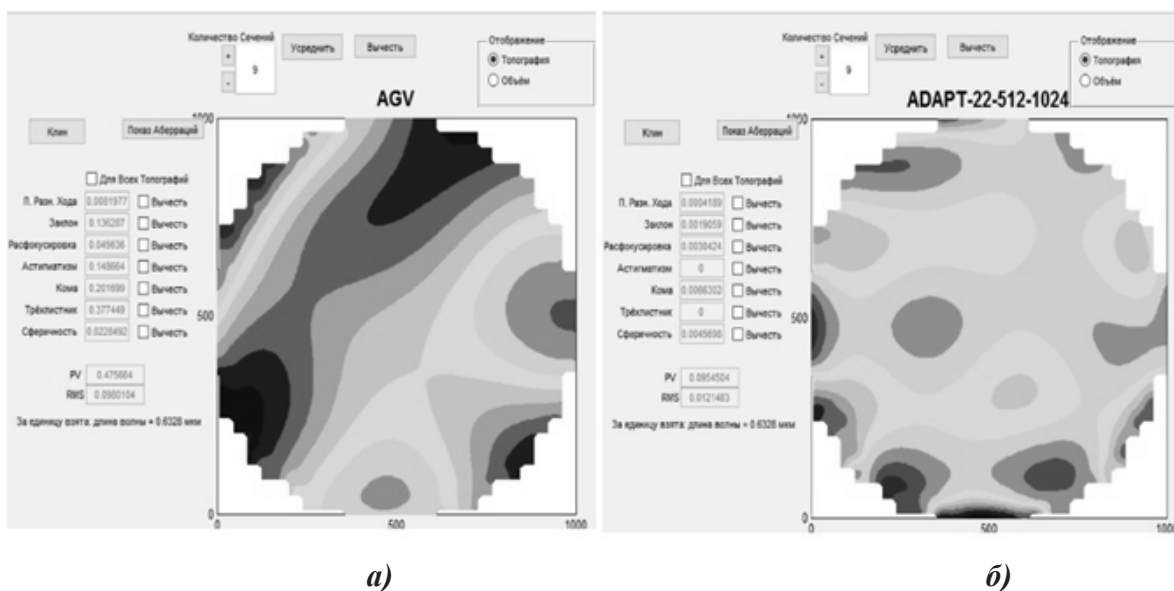
АдаптивныйGUI					
№1	13.3995 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить	№13	21.5952 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить
№2	22.7241 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить	№14	10.3164 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить
№3	10.7579 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить	№15	17.6353 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить
№4	18.0276 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить	№16	22.8759 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить
№5	11.757 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить	№17	21.2229 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить
№6	13.1067 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить	№18	13.2383 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить
№7	18.8643 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить			
№8	13.1583 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить	№19	16.8205 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить
№9	19.9167 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить	№20	16.1837 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить
№10	9.8759 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить	№21	17.5729 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить
№11	9.79 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить	№22	24.1542 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить
№12	13.3345 мм	<input type="checkbox"/> Исполнить			<input type="checkbox"/> Возврат

**Рисунок 3.**  
**Таблица перемещений актуаторов**

Выходным параметром программы адаптации, поступающим в систему управления, должно являться количество шагов двигателя, обеспечивающее необходимые для адаптации усилия актуаторов. Задача усложняется тем, что связь между силой отталкивания магнитов и воздушным промежутком между ними не является линейной. Для пар магнитов, установленных в макете системы адаптации, была экспериментально измерена эта зависимость. Полученная зависимость имеет нелинейный характер. Учитывая данную зависимость, программа адаптации пересчитывает величины усилий в количество шагов двигателя и передаёт соответствующий набор команд в систему управления.

Проделанная работа демонстрирует возможность создавать системы адаптации, в которых процесс адаптации проходит по заранее рассчитанному сценарию и не требует интерференционного контроля поверхности во время работы системы.

Кроме того, априорный расчет усилий позволяет оценить максимально возможный результат адаптации и выбрать наилучшую конфигурацию расположения актуаторов. Компьютерные методы моделирования открывают новые возможности для создания крупногабаритных оптических деталей, отвечающих высоким техническим требованиям. Становится возможным добиваться требуемой формы поверхности не только за счёт механической обработки, но и путём адаптации. Топографические карты поверхности до и после адаптации на рисунке 4 демонстрируют эффективность работы системы адаптации.



**Рисунок 4.**  
**а) - топографическая карта рабочей поверхности до адаптации;**  
**б) - после адаптации**

*Список литературы:*

1. Патент РФ № [2 623 661](#) С2, G02В 26/08, 28.06.2017
2. Патент РФ № [2 047 880](#) С1, G02В 26/06 ; G02В 5/10, 28.06.1991
3. Справочник технолога-оптика под редакцией М.А. Окатова, Издательство Политехника, Санкт – Петербург, 2004. стр. 366 – 377



# ВНЕОСЕВЫЕ ЗЕРКАЛЬНЫЕ КОЛЛИМАТОРЫ С РАБОЧИМ ПОЛЕМ 200÷1000 мм ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

ГОРШКОВ В.А., КОРНЕЕВ Н.Г., ЧУРИЛИН В.А.

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Оптика», г. Москва

E-mail: vladgor@bk.ru

Внеосевые зеркальные коллиматоры предназначены для создания плоского эталонного волнового фронта в широком диапазоне спектра: от ультрафиолетового (УФ) до инфракрасного (ИК) излучения.

Преимущества внеосевых коллиматоров (ВК) в том, что их зеркальная система не имеет дополнительных оптических компонентов, устанавливаемых в коллимированном пучке [1].

В состав ВК входят компоненты:

- внеосевое параболическое зеркало;
- объективодержатель;
- фокальный узел.

Внеосевое зеркало устанавливается в юстируемом блоке. Блок состоит из оправы, предназначенной для базирования и разгрузки зеркала, и юстировочных подвижек, обеспечивающих повороты зеркала вокруг горизонтальной и вертикальной осей.

Подвижки используются при сборке и юстировке ВК, при периодической его поверке, при работе ВК подвижки блокируются.

Объективодержатель предназначен для установки, юстировки и крепления исследуемого объекта.

Фокальный узел предназначен для установки тест-объектов (мира, точка, полуплоскость).

Фокальный узел имеет три взаимно-перпендикулярные линейные подвижки для установки тест-объекта в фокусе внеосевого зеркала при юстировке коллиматора и блокируются при его работе.

Для расширения функций коллиматоры могут быть дополнены:

- интерферометром;
- оптическими эталонными компонентами.

Внеосевой коллиматор (ВК), оснащенный в зависимости от выполняемых функций той или иной оптико-электронной аппаратурой, используется для контроля и измерений:

- волнового фронта отдельных оптических компонентов, объективов, и оптико-электронных комплексов (ОЭК);
- концентрации энергии в кружке рассеяния;
- распределения энергии в кружке рассеяния;
- функции передачи модуляции.

Основным компонентом ВК является внеосевое асферическое зеркало [2]. Зеркала изготавливаются с применением комплексной технологии автоматизированного формообразования высокоточных оптических поверхностей, созданной акционерным обществом «Научно-производственное объединение «Оптика» (АО «НПО «Оптика») [3].

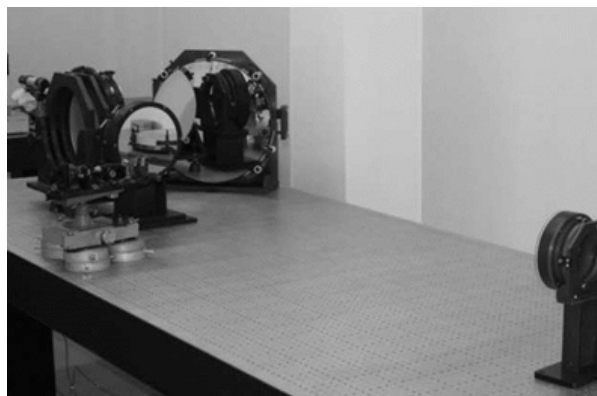
**Таблица 1. Технические характеристики внеосевых коллиматоров, изготовленных в АО «НПО «Оптика»**

Рабочее поле, Ø, мм	Среднеквадратическая ошибка формируемого волнового фронта СКО ( $\lambda = 0,6328$ мкм)*	Фокусное расстояние, мм	Внеосевой параметр, мм	Дополнительное оборудование
220	$\lambda/50$	4012,0	200,0	Корректор поля, интерферометр
400	$\lambda/40$	6663,0	577,0	Фотоприемное устройство с вычислительным комплексом
600	$\lambda/30$	5976,5	600,0	Эталонное зеркало
1000	$\lambda/55$	10009,5	1790,0	Эталонное зеркало

Примечание:

Дополнительное оборудование, входящее в комплект внеосевых коллиматоров:

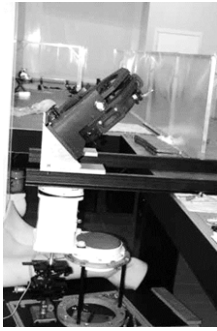
- интерферометр;
- дифракционная точка;
- полуплоскость;
- миры;
- источники излучения видимого и ИК диапазонов;
- фильтры для различных диапазонов спектра;
- эталонное плоское зеркало;
- корректор поля



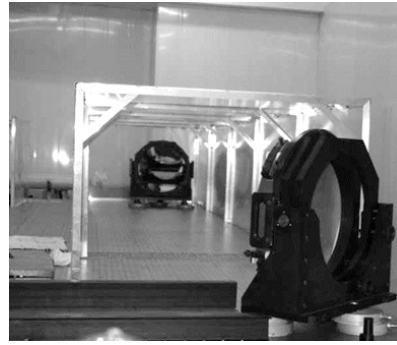
**Рисунок 1.**

**Общий вид изготовленного в АО «НПО «Оптика» коллиматора  $\Phi$  370 мм, используемого для измерения оптических характеристик ОЭК.**

ВК оснащен поворотными зеркалами для сокращения занимаемой им площади с целью встраивания его в технологическое оборудование заказчика.



*а)*

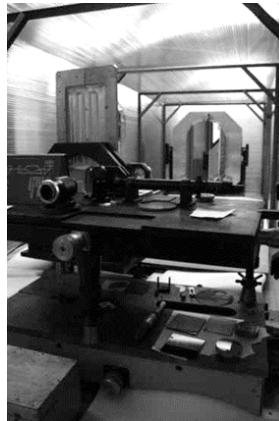


*б)*

**Рисунок 2.**

**Общий вид коллиматора  $\varnothing$  400 мм, изготовленного в АО «НПО «Оптика», в процессе юстировки объектива ОЭК:**

***а) – объектив ОЭК, б) – внеосевой коллиматор  $\varnothing$  400 мм***



**Рисунок 3.**

**Общий вид ВК с интерферометром в его фокальной плоскости при контроле плоского зеркала в технологическом цикле изготовления зеркала**

Широкий диапазон задач, решаемых с помощью ВК, и вышеперечисленные его преимущества дают возможность осуществлять юстировку объективов ОЭК в реальном масштабе времени с визуализацией качественной картины концентрации энергии в кружке рассеяния и количественной характеристикой функции передачи модуляции, позволяет повысить качество их юстировки.

ВК оснащен поворотными зеркалами для сокращения занимаемой им площади с целью встраивания его в технологическое оборудование заказчика.

Широкий диапазон задач, решаемых с помощью ВК, и вышеперечисленные его преимущества дают возможность осуществлять юстировку объективов ОЭК в реальном масштабе времени с визуализацией качественной картины концентрации энергии в кружке рассеяния и количественной характеристикой функции передачи модуляции, позволяет повысить качество их юстировки.

*Список литературы:*

1. Внеосевые зеркальные коллиматоры// РосприборРФ/catalog/lazer/collimator/html
2. Внеосевые параболические зеркала // [www.tydexoptics.com/ru/products/spectroscopy/oap-mirrors](http://www.tydexoptics.com/ru/products/spectroscopy/oap-mirrors)
3. Горшков В.А., Невров А.С., Савельев А.С. Технология автоматизированного формообразования асферических, в том числе внеосевых, поверхностей оптических элементов для оптико-электронных систем наземного и космического базирования// Тез. докл. конф. «Оптико-электронные комплексы наземного и космического базирования». Г.Лыткарино, ОАО «ЛЗСОС», 2014

# НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ, ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ В УФ, ВИДИМОМ И ИК ДИАПАЗОНАХ

АНДРЕЕВА Н.П., БАРАШКОВ М.С., ЕВСТИГНЕЕВ В.Л., КРЫМСКИЙ М.И.,  
\*МИТИН К.В., РОГАЛИН В.Е.

АО «НЦЛСК «Астрофизика», г. Москва

\*АО «Швабе-Исследования», г. Москва

E-mail: aphysica@aha.ru

Лазерные каналы, использующие перестраиваемое или мультиспектральное когерентное излучение ультрафиолетового (УФ), видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов могут решать актуальные задачи в различных областях науки и техники: мультиспектральное распознавание объектов, многоволновое зондирование атмосферы, оптоэлектронное противодействие; в медицине – как газоаналитический прибор для диагностики заболеваний путем анализа выдыхаемого воздуха; в биологии - при исследованиях специфических воздействий ИК излучения на биоткани и пр.

Решение задачи создания лазерного канала перестраиваемого или мультиспектрального когерентного излучения УФ, видимого и ИК диапазонов сможет обеспечить лазерная система на основе разрабатываемых на предприятии АО «НЦЛСК «Астрофизика» быстро-перестраиваемых параметрических генераторов света (ПГС) и лазеров на вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР).

## РЕАЛИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ НА ОСНОВЕ ПГС

В основе функционирования лазерной системы на основе ПГС заложены следующие принципиальные отличительные особенности: возможность генерации любой заранее заданной длины волны в спектральном диапазоне, определяемым типом ПГС; возможность быстрой перестройки длины волны генерации на любую длину волны, выбранную произвольно из рабочего диапазона, возможность генерации длины волны по «случайному» закону.

На предприятии реализован ПГС в диапазоне 0,47 – 1,5 мкм на монокристалле ВВО с перестройкой длины волны с помощью электродинамического привода (ЭДП), время перестройки в любую заданную точку внутри диапазона – 5 мс. (рис. 1).

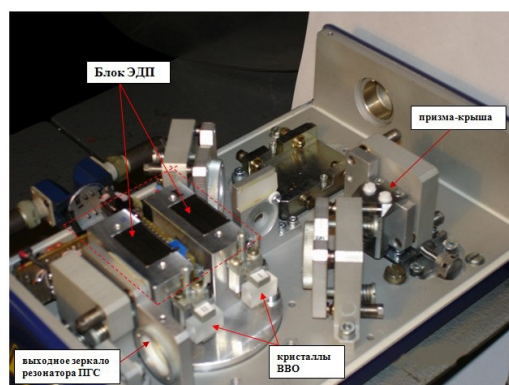
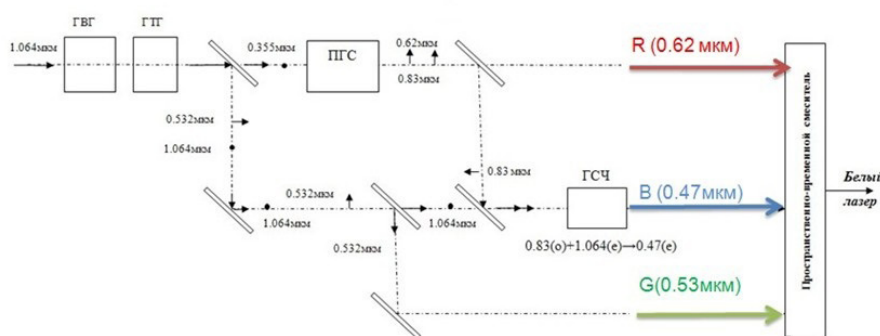


Рисунок 1.

**Блок ПГС с «быстрой» перестройкой длины волны излучения. Время переключения длин волн в пределах рабочего диапазона 470-1500 нм - 5 мс. Частота повторения 10 Гц. Длительность импульса 10 нс. Энергия в импульсе 0,1 Дж (в диапазоне 0,47 – 0,7 мкм)**

Разработан и запатентован т.н. «Белый лазер» повышенной яркости на основе ПГС (рис. 2) для проекционных экранов большого формата и систем специального назначения по подавлению (ослеплению) оптико-визуальных и оптико-электронных систем [1].



**Рисунок 2.**  
**Схема «Белого» RGB лазера на основе ПГС**

На основе кристалла  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$  создан и исследован ПГС с накачкой излучением YAG: Nd – лазера с принципиально новым видом плавной перестройки длины волны в среднем ИК диапазоне – изменением параметра концентрации  $x$ . Изменяя параметр  $x$  от 0,14 до 0,56 можно получить перестраиваемую генерацию ПГС в условиях некритичного фазового синхронизма в спектральном диапазоне 2,7 – 9 мкм [2]. Экспериментально реализованы и исследованы различные варианты схем ПГС на монокристаллах  $\text{AgGaS}_2$ ,  $\text{HgGa}_2\text{S}_4$ ,  $\text{LiNbO}_3$ , излучающих в диапазоне (1,5– 5,7) мкм, в том числе с «быстрой» перестройкой (за время порядка 1 мс) длины волны излучения ПГС с помощью акустооптического дефлектора (АОД) и обужением спектральной ширины линии излучения с помощью акустооптического фильтра (АОФ) [3]. Создан параметрический генератор света на основе кристалла  $\text{PPMgO:LN}$ . В качестве источника накачки использован Nd:YAG лазер, излучающий на длине волны 1,053 мкм с длительностью импульса, варьируемой в пределах 10 – 40 нс при изменении частоты повторения и энергии в импульсе. Максимальная энергия в импульсе – 500 мкДж. Средняя мощность излучения на длине волны 4,1 мкм с частотой повторения 10 кГц при длительности импульса 10 нс составила 70 мВт[4].

#### РЕАЛИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ НА ОСНОВЕ ВКР

Преобразование на основе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) представляется простым и надежным в техническом исполнении способом дискретной перестройки частоты, поскольку определяется только внутренней структурой ВКР - активной среды и не требует выполнения условий фазового синхронизма. Недавние исследования открыли новый класс соединений вольфраматов и молибдатов щелочноземельных металлов и свинца со структурой шеелита – перспективных ВКР - активных сред нового поколения. В Кубанском государственном университете на основе модификации метода Чохральского была разработана технология выращивания кристаллов  $\text{BaWO}_4$ ,  $\text{SrWO}_4$ ,  $\text{SrMoO}_4$ , а также активных элементов  $\text{SrWO}_4:\text{Nd}$  и  $\text{SrMoO}_4:\text{Nd}$ , которые были исследованы в АО «НЦЛСК «Астрофизика». Исследования показали, что данные материалы по своим характеристикам не уступают широко используемым в ВКР лазерах и преобразователях кристаллам KGW,  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  и др. Кроме того, рассматриваемые вольфраматы и молибдаты обладают широкой областью оптической прозрачности (0.3-5 мкм), что позволяет получать ВКР преобразование частоты лазерного излучения в ближнем и среднем ИК - диапазонах спектра.

В ходе исследований на всех представленных образцах кристаллов было получено ВКР-

преобразование. Построены зависимости выходной энергии преобразованного излучения (первой стоксовой компоненты) от энергии излучения накачки. На основании этих данных определялась пороговая интенсивность накачки и коэффициент ВКР усиления. Для кристалла  $BaWO_4$  значение коэффициента ВКР усиления составило 6,98 см/ГВт, для  $SrWO_4:Nd$  - 3,16 см/ГВт, для  $SrMoO_4:Nd$  - 7,94 см/ГВт.[5].

*Таблица 1.*

		$SrWO_4:Nd$	$SrMoO_4:Nd$
1	Стоксов сдвиг, см <sup>-1</sup>	921	888
2	Длина волны (основная частота), нм	1057	1058
3	Длина волны 1-й стоксовой компоненты, нм	1171	1168

Реализованы и исследованы ВКР - лазеры с активными элементами из  $SrWO_4:Nd$  и  $SrMoO_4:Nd$ . Полученные результаты показали возможности их использования в различных приложениях, в частности, применения в лазерных приборах, безопасных для глаз человека.

В настоящее время в АО «НЦЛСК «Астрофизика» разрабатывается и создается «Комплексный стенд отработки твердотельных лазерных источников и их составных частей с быстроперестраиваемым по случайному закону нелинейно-оптическим преобразованием длины волны излучения во всем оптическом диапазоне и возможностью управления шириной спектра генерируемого излучения» с целью отработки и модернизации оптико-электронных приборов на основе нелинейной оптики.

*Список литературы:*

1. *Барашков М.С., Андреева Н.П.*, «Устройство формирования когерентного излучения частотно-импульсного «белого» лазера», Патент РФ № 107597 от 13.04.2011 г.
2. *Андреева Н.П., Барашков М.С., Крымский М.И.* и др. Исследование способов перестройки параметрических генераторов света видимого и ИК диапазонов, Квантовая электроника, т. 40, № 4, стр.286, 2010 г.
3. *Андреева Н.П., Барашков М.С.* и др. ПГС на монокристалле  $LiNbO_3$  с резонатором на «длинной» волне и применение электронно-перестраиваемого акустооптического фильтра в управлении спектром параметрической генерации, Акустооптические, акустические и рентгено-спектральные методы и средства измерений в науке и технике, ВНИИФТРИ, Труды, Выпуск 48 (140), 2005, стр. 35-41.
4. *N.P. Andreeva, M. S. Barashkov, K. V. Mitin, N. I. Shchebetova, M. I. Krymskii, V. E. Rogalin, V. Ya. Shur* et al, Optical parametric oscillator based on the periodically poled  $MgO:LN$  crystal with 4.1  $\mu m$  wavelength and varied pulse duration Article in *Ferroelectrics* 496(1):128-133 · May 2016.
5. *Исаев В.А., Андреева Н.П., Евстигнеев В.Л., Митин К.В.* и др. «Получение крупных монокристаллов со структурой шеелита и их оптические свойства» Международный симпозиум «ФИЗИКА КРИСТАЛЛОВ-2013», 28 октября – 2 ноября 2013 г. Москва.

# ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНО-ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ИНФРАКРАСНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА В ОПТИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ АО «НПО ГИПО»

ЛУКИН А.В., БЕРДЕННИКОВ А.В., КОЗЛОВ С.Д., МЕЛЬНИКОВ А.Н., НАСЫРОВ А.Р.

АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт  
прикладной оптики», г. Казань

E-mail: gipo@telebit.ru

*Рассмотрены опыт и особенности применения лазерно-голографического инфракрасного интерферометра в оптическом производстве АО «НПО ГИПО» для контроля оптических параметров элементов и систем гражданского и двойного назначения. Приведены примеры полученных интерферограмм и результаты их расшифровки.*

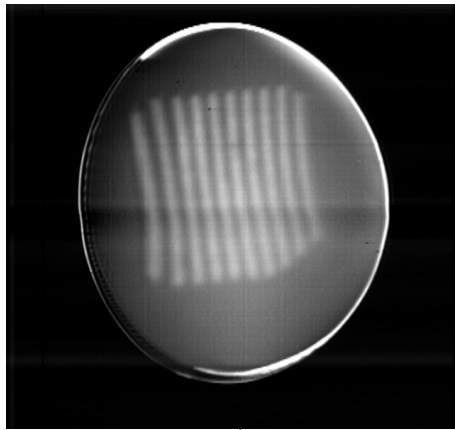
В АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики» разработан и с 2006 года функционирует лазерно-голографический инфракрасный интерферометр, обеспечивающий контроль оптических параметров объективов и их компонентов в инфракрасном диапазоне спектра на лазерных длинах волн 3,39 и 10,6 мкм, реализуя интерферометрический метод контроля как наиболее информативный из известных и применяемых в современных оптических технологиях на практике.

Функциональная схема и принцип работы этого интерферометра представлены в работе [1]. Следует отметить его важную и полезную особенность: в его конструкции предусмотрено применение отражательных и пропускающих в инфракрасном диапазоне спектра осевых синтезированных голограммных оптических элементов, что существенно расширяет диапазон функциональных возможностей. В частности, он обеспечивает возможность поэтапного контроля процессов сборки многокомпонентных центрированных оптических систем (объективов, телескопов типа Кассегрена и Ричи-Кретьена) [2].

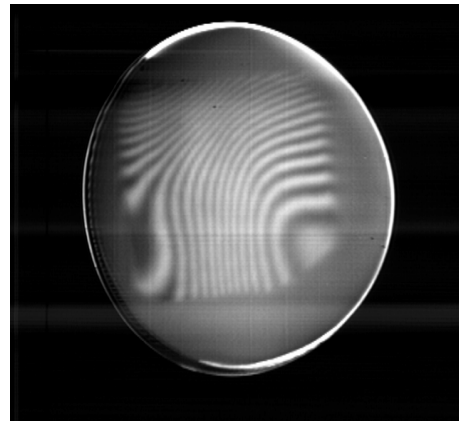
В первоначальном варианте исполнения в качестве системы регистрации инфракрасного изображения в интерферометре на длине волны 3,39 мкм был использован оптико-электронный модуль на основе применения охлаждаемого матричного фотоприемника ID MM067, на длине волны 10,6 мкм – пировидиконная камера. Опыт дальнейшей эксплуатации интерферометра показал целесообразность использования неохлаждаемых микроболометрических модулей в качестве системы регистрации интерферограмм. В настоящее время в опытной эксплуатации находится неохлаждаемый микроболометрический модуль типа «АСТРОН-640», разработанный и изготовленный в АО «ОКБ «АСТРОН» [3].

В докладе приводятся результаты практического использования лазерно-голографического инфракрасного интерферометра на лазерных длинах волн 3,39 и 10,6 мкм. В частности, демонстрируются интерферограммы и результаты их расшифровки, полученные при контроле оптического качества инфракрасных объективов, образцов высокомодульного цианат-эфирного углепластика (в отраженном свете), выбранного для изготовления главного зеркала космического телескопа «Миллиметрон» [4], а также образцов пластин из германия и кремния при исследовании их оптической однородности. В качестве иллюстрации на рисунке показаны интерферограммы:

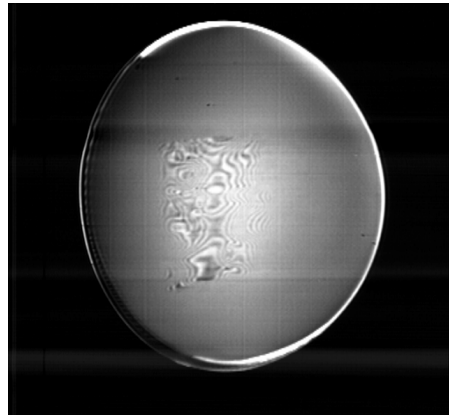
- эталонного зеркала (эта интерферограмма характеризует оптическое качество самой схемы инфракрасного интерферометра);
- образца низкого оптического качества как элемента сравнения;
- образца из высокомодульного цианат-эфирного углепластика.



*а)*



*б)*



*в)*

**Рисунок 1.**

**Интерферограммы образцов различного оптического качества, полученные на лазерно-голографическом инфракрасном интерферометре АО «НПО ГИПО» (длина волны  $\lambda = 10,6$  мкм):**

- а) – интерферограмма эталонного зеркала, среднеквадратичное отклонение (СКО) 0,4 мкм;***
- б) – интерферограмма образца низкого оптического качества (оконного стекла), СКО 6,6 мкм;***
- в) – интерферограмма образца из углепластика***

*Список литературы:*

1. *Duchitskiy A.S., Lukin A.V., Mavrin S.V., Melnikov A.N.* Laser-and-Holographic Complex for Technological and Certification Control of Optical Elements and Objectives in Infrared Spectral Region of 3 – 12 mm // Proc. SPIE. 2007. V. 6636. Pp. 663618-1–663618-4.
2. *Белозёров А.Ф., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мельников А.Н.* Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения. Часть I // Фотоника. 2014. № 4. С. 12–32.
3. Сайт [http://astrohn.ru/files/Catalogue\\_Detector.pdf](http://astrohn.ru/files/Catalogue_Detector.pdf) (каталог продукции ОКБ «АСТРОН», г. Лыткарино, Московская обл.).
4. *Пышинов В.Н.* Создание размерностабильных панелей из высокомодульного цианат-эфирного углепластика для рефлектора обсерватории «Миллиметрон» // Тез. докл. научно-техн. конф. «Оптико-электронные комплексы наземного и космического базирования». Лыткарино, 2014. С. 159–160.



# ПРАКТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ДОСТИЖЕНИЯ ТРЕБУЕМОЙ ЧИСТОТЫ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПЕРЕД НАНЕСЕНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

СМИРНОВ А.М.

Научно-техническая компания «Солтек», г. Москва

E-mail: a.smirnov@stc-soltec.ru

Практически невозможно переоценить роль процесса очистки перед напылением оптических покрытий в технологическом процессе производства современных оптических деталей. Тончайшие пленки загрязнений, микроскопические частицы пыли, остатки солей и другие, труднодиагностируемые загрязнения оптических деталей, могут оказаться причиной отслоения оптических покрытий, проявления неравномерности характеристик изделий или возникновения иных дефектов. И, если в случае напыления зеркальных поверхностей, не все дефекты промывки могут проявиться после напыления, то, в случае напыления просветляющих покрытий, практически все дефекты становятся заметными сразу после напыления. В ряде случаев дефект можно устранить повторной полировкой изделий, в ряде случаев геометрические размеры деталей не позволяют осуществить повторную полировку без нарушения требований к оптическим характеристикам изготавливаемых приборов. В любом случае, загрязнения поверхности оптических деталей, не выявленные перед процессом напыления покрытий, приводят к дополнительным производственным издержкам и затратам.

Ранее, в публикациях, посвященных вопросам подбора технологии очистки оптических деталей, много говорилось об особенностях выбора технологической схемы очистки для различных марок стекол: налетоопасных, пятнающихся, стекол с высоким значением коэффициента теплового расширения и т.д. [1], [2]. В рамках данной статьи будут рассмотрены практические вопросы обеспечения требуемой степени чистоты оптических деталей перед технологической операцией нанесения покрытий, а именно:

- создание и поддержание необходимого класса чистоты помещения;
- проектирование системы водоподготовки;
- проектирование технологической оснастки;
- работа с моющими средствами, организация системы фильтрации жидкостей.

Наибольшее распространение в технологии финишной промывки оптических деталей получили модульные системы ультразвуковой промывки. Их применение позволяет уйти от необходимости обязательной ручной протирки оптических деталей, тем самым, нивелировав влияние человеческого фактора на результат процесса очистки и повысив производительность процесса.

Современные системы промывки позволяют осуществить очистку оптических деталей до состояния поверхности, пригодного к нанесению покрытий. Однако, все усилия технологов, направленные на подбор оптимальных режимов промывки и сушки деталей могут быть тщетными, если изделия извлекаются из моечного оборудования и попадают в помещение с недостаточной чистотой окружающей среды. В большинстве случаев, моечные установки, предназначенные для финишной промывки оптических деталей, располагаются на участках нанесения покрытий, либо на смежных с ним участках. Такие участки должны отвечать требованиям к чистоте помещений не ниже класса ИСО5 по ГОСТ Р ИСО 14644-1-2002. В случае использования технологии ручной очистки требования к классу чистоты помещения аналогичны.

При использовании автоматизированных водных процессов промывки, как альтернативы ручной протирке растворителями, необходимо особое внимание уделять качеству используемой воды. На последних этапах может использоваться только ультрачистая деионизованная вода со значением удельного сопротивления не менее 18 МОм\*см. В случае применения для ополаскивания воды, не отвечающей указанным требованиям, может понадобиться последующая ручная протирка оптических деталей с применением растворителей, что сводит на нет целесообразность использования автоматизированных систем промывки с применением водных процессов. Стоит учитывать, что системы водоподготовки, используемые для подачи воды в установки очистки должны обеспечивать возможность работы с нагретой деионизованной водой, а, в ряде случаев, обеспечивать подачу как холодной, так и горячей воды одновременно разным потребителям. Учитывая тот факт, что сами системы водоподготовки располагаются вне чистых производственных участков финишной промывки и напыления покрытий, необходимо предусмотреть возможность обеспечения необходимого качества воды на входе в оборудование, минимизацию потерь характеристик воды при ее транспортировке на участок.

Стоит также учитывать, что максимальное количество соединений труб, используемых в контурах циркуляции жидкостей, должно быть выполнено с применением бесшовных технологий, предотвращающих скапливание частиц загрязнений.

Как показывает практика, даже в случае применения деионизованной воды марки А на этапах финишного ополаскивания оптических деталей, на изделиях могут оставаться следы загрязнений при неправильном проектировании технологической оснастки для крепления деталей в процессе промывки. Технологическая оснастка должна обеспечивать возможность беспрепятственного стекания с поверхности деталей деионизованной воды без образования капель. Естественным требованием, предъявляемым к технологической оснастке является химическая стойкость к используемым в процессе промывки средам. Кроме того, оснастка должна быть удобной в эксплуатации и исключать возможность соударения деталей в процессе работы, загрузки/выгрузки оснастки. Использование центрифугирования на этапе сушки позволяет обеспечить отсутствие разводов на поверхности деталей, но, учитывая низкую производительность процесса, может практически применяться не в каждом случае.

Организация фильтрации моющих средств в процессе работы с ними является также немаловажным фактором обеспечения чистоты оптических деталей на этапе финишной промывки перед нанесением покрытий. Основная задача финишной промывки заключается в удалении различных солей, отпечатков пальцев и частиц с поверхности деталей, большинство органических загрязнений удаляются на более ранних этапах технологического процесса. В этой связи, при работе с моющими средствами, необходимо обеспечить не только качественную фильтрацию всего их объема, но и предотвратить повторное осаждение загрязнений на поверхность уже чистых деталей. Для этого, в случае использования ультразвуковых ванн, проектируются системы фильтрации, обеспечивающие удаление частиц из всего объема жидкости, системы автоматического ополаскивания дна ванн, удаления частиц с поверхности растворов.

Осуществление комплекса вышеобозначенных мер, вкуче с обеспечением качественной финишной промывки оптических деталей и соблюдением культуры производства в отношении обращения с уже чистыми деталями позволяет должным образом подготовить оптические детали к нанесению оптических покрытий.

#### *Список литературы*

1. Смирнов А.М., Козлова Н.А. Очистка поверхности оптических деталей перед нанесением покрытий // Журнал «Фотоника», 2014, № 3/45 – С. 50-53.
2. Смирнов А.М., Козлова Н.А. Особенности современной очистки оптических деталей // Научно-технический журнал «Контенант», 2013 Том 12, №4 – С. 85-88.

# МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВОГО РАССОГЛАСОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ОСЕЙ ПРИЁМНОГО И ПЕРЕДАЮЩЕГО КАНАЛОВ ВЫСОКОТОЧНЫХ ЛЛС

ПISКУНОВ Т.С., БАРЫШНИКОВ Н.В., ЖИВОТОВСКИЙ И.В., \*ЧИБИСОВ П.В.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,

\*ПАО «НПО «Алмаз»

E-mail: thedistorted@yandex.ru

Известно, что для работы таких лазерных оптико-электронных систем (ЛОЭС), как лазерные локационные станции (ЛЛС), лидары и дальномеры, требуется согласованность угловых положений оптических осей приёмного и передающего каналов. Как правило, она обеспечивается юстировкой при сборке конструкции на заводе-изготовителе. Требования по точности юстировки в таких случаях не превышают нескольких угловых минут [1].

Перед современными ЛОЭС стоит задача дистанционного мониторинга объектов на значительных расстояниях в условиях случайных изменений угловых положений оптических осей приёмного и передающего каналов под воздействием температуры и внешних механических вибраций. В этих условиях погрешность наведения ЛЛС на объект исследования не должна превышать единицы угловых секунд, что обеспечивается согласованностью угловых положений оптических осей каналов с помощью механизма автоюстировки, который позволяет контролировать угловое положение оптических осей каналов ЛЛС, вырабатывать сигналы корректировки углового положения и отрабатывать угловое рассогласование осей с помощью специального устройства [2].

В качестве универсального решения для систем, рассчитанных на работу на значительных расстояниях, наряду с основным рабочим лазером, используется маркерный лазер, положение оси пучка излучения которого жёстко связано с оптической осью передающего канала. Пучок излучения маркерного лазера отводится в приёмный канал с помощью инвариантной оптической системы, осуществляющей параллельное смещение. Такие системы получили название устройств параллельного переноса (УПП) [2]. Здесь под инвариантностью оптической системы понимается неизменность угловой погрешности параллельного смещения при изменении пространственного положения одного или нескольких её элементов. В приёмном канале установлен оптико-электронный блок, измеряющий угловые координаты пучка излучения маркерного лазера для определения углового рассогласования осей, которое компенсируется оптическими элементами приёмного или передающего каналов.

Таким образом, контур обратной связи системы автоюстировки обеспечивается информацией об относительном положении оптических осей приёмного и передающего каналов с помощью системы измерения углового рассогласования (СИР), которая должна осуществлять параллельное смещение пучка излучения маркерного лазера и измерять угловые координаты смещённого пучка относительно приёмного канала. При этом вся система в целом должна обладать пространственной инвариантностью и высокой точностью измерений, поскольку от неё зависит точность работы ЛОЭС в целом.

Для обеспечения измерения углового рассогласования оптических осей приёмного и передающего каналов ЛОЭС с малой погрешностью в условиях воздействия внешних механических вибраций необходимо разработать методику теоретического анализа погрешности СИР.

Погрешность СИР – это погрешность измерения углового рассогласования оптических осей каналов  $\Delta\theta$  – разница между угловыми координатами оси входного пучка лазерного излучения и угловыми координатами, измеренными на выходе зеркально-призменного блока. Основной вклад в погрешность СИР вносят следующие составляющие:

$\Delta\theta_{met}$  - методическая – возникает в случае косвенных измерений;

$\Delta\theta_{tech}$  - технологическая – возникает вследствие ошибок в изготовлении оптических деталей;

$\Delta\theta_{just}$  - юстировочная – возникает при проведении юстировочных работ;

$\Delta\theta_{vib}$  - вибрационная – возникает при наличии разъюстировок компонентов блока вследствие воздействия внешних механических вибраций.

Нами был проведён анализ методической составляющей погрешности  $\Delta\theta_{met}$  для системы на основе пентапризм. Получена зависимость методической погрешности рассчитанных координат на входе в зеркально-призменный блок от погрешностей регистрации координат на выходе [3,4].

Разработана методика теоретического анализа технологической составляющей погрешности  $\Delta\theta_{tech}$ . Проведён анализ этой составляющей для СИР на основе пентапризм.

На первом этапе анализа технологической составляющей погрешности  $\Delta\theta_{tech}$  была разработана математическая модель хода лучей в одной призме, грани которой установлены с ошибками. С помощью компьютерных расчётов, эта модель позволяет определить зависимость ошибки угловых координат оси пучка, прошедшего пентапризму  $\delta\theta_{y,П1}$ ,  $\delta\theta_{z,П1}$  от углов отклонения граней от номинального положения, которые легко преобразовать в ошибки углов, получившиеся в результате реализации технологических допусков. В данном случае вероятностная величина допуска  $\delta 45$  используется в качестве детерминированной величины – максимального значения отклонения граней призмы от идеального положения. При  $n = 1,51$ , ошибки равны:  $\delta\theta_{y,П1} = \delta\theta_{z,П1} \approx 6 \cdot \delta 45$ . Например, при  $\delta 45 = 3$  угл.сек.  $\delta\theta_{y,П1} = \delta\theta_{z,П1} = 18$  угл.сек.

На втором этапе определяется зависимость ошибки угловых координат оси пучка, прошедшего пару пентапризм от наилучшей реализации технологических погрешностей. Полученные выражения позволяют оценить ошибку отклонения пучка лазерного излучения двумя парами пентапризм и рассчитать  $\Delta\theta_{tech}$ . Показано, что эта технологическая составляющая погрешности  $\Delta\theta_{tech}$  значительно превышает единицы угловых минут даже при самых жёстких допусках. Однако,  $\Delta\theta_{tech}$  является систематической ошибкой и поэтому может быть компенсирована введением в оптическую схему юстировочных оптических клиньев.

Анализ влияния внешних механических воздействий предполагает определение множества различных характеристик, однако, для геометро-оптического анализа системы, достаточно знать зависимость амплитуды и частоты колебаний пентапризм от внешних условий. Для этого необходимо провести компьютерное исследование конструкции, на которую будет устанавливаться СИР и вычислить амплитуды и частоты колебаний точек крепления пентапризм в зависимости от внешних и внутренних воздействий.

Достаточно большие амплитуды колебаний пентапризм могут привести к выходу пучка лазерного излучения из поля зрения приёмного устройства, что приведёт к временной потере сигнала. Проведённое исследование воздействия вибраций на вероятность временной потери сигнала, показало, что в СИР необходимо учитывать вибрации призм, частоты которых значительно ниже частоты кадров МФПУ, т.к. это приводит к увеличению средней погрешности за определённый промежуток времени. При частотах вибраций превышающих частоту кадров МФПУ происходит смазывание изображения, но его энергетический центр остаётся на месте и это не приводит к увеличению погрешности. В результате исследования получены зависимости, позволяющие согласовать конструктивные параметры приёмника излучения и объектива для обеспечения требуемых характеристик системы [5].

Вибрации конструкции также приводят и к появлению вибрационной составляющей погрешности, вносимой зеркально-призменным блоком  $\Delta\theta_{vib}$ . Разработана методика анализа этой составляющей на основе разработанной математической модели. В данном случае, матрицы действия пентапризм имеют общий вид, а углы разворота призм являются случайными величинами [6]. Задавая координаты оси пучка лазерного излучения на входе модели, можно получить координаты осей пучков на выходе и рассчитать вибрационную составляющую погрешности СИР.

Разработанная методика позволяет с помощью компьютерного моделирования определить предельный уровень амплитуды вибраций пентапризм для обеспечения заданной погрешности параллельного смещения. Показано, в частности, что при амплитуде вибраций до 5 угл.мин., вибрационная составляющая погрешности  $\Delta\theta_{vib}$  не превышает 1 угл.сек.

Эта методика позволяет исследовать и юстировочную составляющую погрешности  $\Delta\theta_{just}$ , которая возникает при наличии ошибки угла разворота пар пентапризм  $\Delta\varphi$ . Например, при  $\Delta\varphi = 5$  угл.мин.  $\Delta\theta_{just} \approx 2$  угл.сек. Получены соотношения, позволяющие полностью компенсировать эту ошибку.

В результате обобщения разработанных методик и проведённых исследований сформулирована методика точностного анализа СИР, состоящая из пяти основных этапов:

первый этап – определение исходных данных:

- допустимая погрешность СИР  $\Delta\theta_{ТЗ}$ ;

- расстояние параллельного смещения  $a$ , световые диаметры входного  $d_{ex}$  и выходного  $d_{вых}$  окон, диаметр пучка излучения  $d$ ;

- допустимые коэффициенты перекрытия входного и выходного окон ЛОЭС –  $k_{пер.вх.}$  и  $k_{пер.вых.}$ ;

второй этап – выбор функциональной схемы на основе введённых критериев оптимальности;

третий этап – теоретическая оценка погрешности блока измерения координат;

четвёртый этап – теоретическая оценка погрешности зеркально-призменного блока. Зеркально-призменный блок может вносить следующие составляющие в угловую погрешность СИР:

- методическую  $\Delta\theta_{мет}$ ;

- технологическую  $\Delta\theta_{тех}$ ;

- юстировочную  $\Delta\theta_{just}$ ;

- вибрационную  $\Delta\theta_{vib}$ ;

пятый этап – экспериментальная оценка погрешности зеркально-призменного блока.

Проведённые теоретические исследования обосновали возможность создания СИР на основе пентапризм, обеспечивающих параллельное смещение пучков лазерного излучения на расстояние 500-2000 мм и измерение углового рассогласования оптических осей каналов ЛОЭС с погрешностью на уровне единиц угловых секунд в условиях воздействия внешних механических вибраций.

#### Список литературы:

1. В.М. Орлов, В.Е. Карасик. Лазерные системы видения. - Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000.

2. Барышников Н.В. Разработка и исследование устройств параллельного переноса пучка излучения для систем автоюстировки каналов лазерных локационных станций. - Измерительная техника. - 2011. - № 4. - стр. 65-70.

3. Барышников Н. В., Животовский И. В., Пискунов Т. С. Исследование влияния угловых aberrаций объектива оптико-электронного координатора на погрешности измерения взаимного углового рассогласования осей лазерных пучков. - Наука и образование: электронное научно-техническое издание. - 2012. - № 11. - С. 23.

4. Барышников Н.В., Животовский И.В., Пискунов Т.С., Платонов П.В. Исследование

устойчивости работы системы автоюстировки с устройством параллельного переноса, построенным на основе пентапризм. - Метрология – приложение к журналу «Измерительная техника». - 2012. - №12.

5. *Пискунов Т.С., Чибисов П.В.* Особенности проектирования оптических систем устройств параллельного переноса оси лазерного пучка. – Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО. Сборник докладов четвертой научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Научные чтения к 105-летию со дня рождения академика А.А. Расплетина». – стр.425-432. – Москва. 26-28 сентября 2013

6. *Пискунов Т.С., Барышников Н.В., Животовский И.В.* Исследование точностных характеристик устройства параллельного переноса пучка лазерного излучения, построенного на основе пентапризм. – Журнал «Измерительная техника». - №1, 2015

# СОВРЕМЕННАЯ ОТЕЧЕСТВЕННАЯ УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ГОНЧАРОВ Н.В.

ООО «Научно-производственный комплекс «Диагностика», г. Санкт-Петербург

E-mail: info@diagnostika-spb.ru

Высокий уровень современного оборудования и измерительных приборов достижим только в том случае, когда разработчик и изготовитель строго соблюдают конструкторские требования и технологию. Без соответствующего метрологического обеспечения, как угловых измерений, так и аттестации эта задача не имеет решения. Повышение точности угловых измерений вскрыло серьезную потребность промышленности в высокоточных цифровых приборах и надежном испытательном оборудовании. В статье дан обзор отечественных моделей гониометров, автоколлиматоров и поворотных столов, представленных на российском рынке.

В настоящее время, когда предъявляются высокие требования к выпускаемой продукции, как гражданского, так и специального назначения, возникает очень серьезный вопрос о погрешности различных видов измерений и применения современных приборов, без которых невозможно проводить качественную техническую приемку и контроль изделий. Для ряда изделий не менее актуальным является проведение приемо-сдаточных испытаний по соответствующим методикам с помощью испытательного оборудования.

Таким образом, в оптико-механической промышленности для решения измерительных задач сформировалась актуальная потребность в высокоточных цифровых измерителях угла, а в ВПК для проведения контроля - потребность в испытательном оборудовании на базе цифровых контроллеров с обратной связью.

Для измерения различных оптических деталей и поверки угловых мер (рисунок 1) предназначены гониометры 1, 2 и 3 разряда. На российском рынке на сегодняшний день широким спросом пользуются современные цифровые гониометры производства «НПК «Диагностика» (модели СГ-1Ц и СГ-3Ц), а также ряд импортных аналогов. Современный уровень развития техники предполагает широкое использование компьютера для проведения и обработки различных измерений, поэтому предприятие НПК «Диагностика» разработало серию гониометров, осуществляющих угловые измерения в автоматическом режиме. Это современные цифровые гониометры серии СГ-Ц. Гониометры СГ-Ц (рисунок 2) внесены в ГосРеестр СИ, имеют Знак Качества СИ.

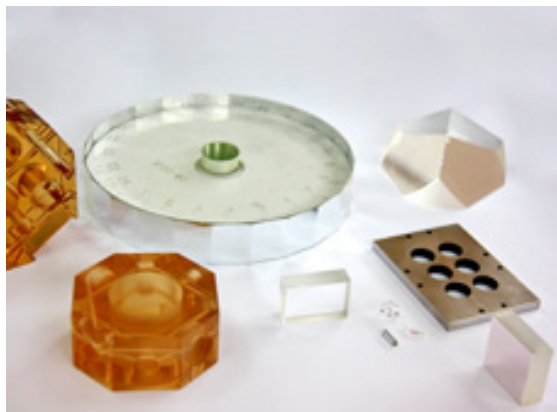


Рисунок 1.

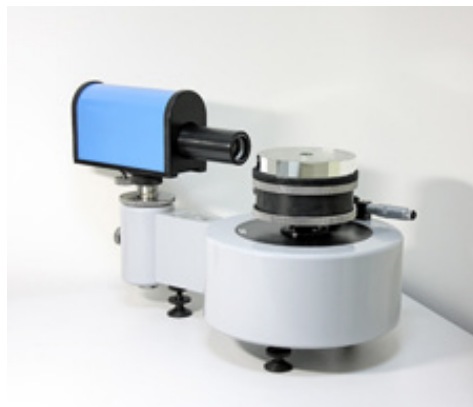


Рисунок 2.

Гониометры, выпускаемые НПК «Диагностика» с успехом используют, например, такие профильные оптические предприятия, как ОАО «ЛОМО», ОАО «НИИ «ПОЛЮС», ОАО «РПЗ», ОАО «ПО «УОМЗ», АО «ИСС», а также целый ряд предприятий атомной и космической отрасли, а также ряд коммерческих организаций. Гониометрами серии СГ-Ц также оснащены центры стандартизации и метрологии: ФБУ Ростест-Москва, ФБУ Тест-СПб, ФБУ Кировский ЦСМ, ФБУ Пензенский ЦСМ, ФБУ Пермский ЦСМ и многие другие метрологические центры.

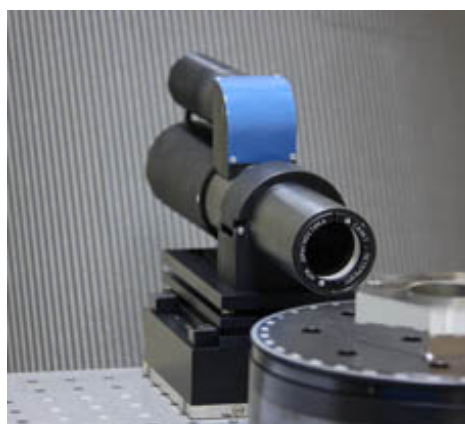
Выпускаемые гониометры СГ-Ц обеспечивают автоматический режим угловых измерений объекта в статическом положении. При этом в основе измерений прибора лежит работа двухкоординатного цифрового автоколлиматора и высокоточного цифрового углового преобразователя.

На оптическом рынке известны и цифровые гониометры, выпускаемые немецкими фирмами: Moeller-Wedel GmbH и Trioptics GmbH.

Для контроля склеек плоской оптики, поверочных плит и направляющих станков, а также углов поворота отражающей поверхности, используются автоколлиматоры. На сегодняшний день на российском рынке большинство лабораторий и оптических предприятий до сих пор применяют визуальные автоколлиматоры производства (например, модели АУ-0.2, АКУ-0.5 и АКУ-1). Такая популярность этих приборов связана в основном, с их относительно невысокой стоимостью и исторически сложившейся известностью. Данные модели обладают типичными для визуальных приборов недостатками: низкая эффективность (обусловлена трудоемкостью юстировки и использованием визуального метода считывания); большая вероятность субъективных ошибок оператора (утомляемость); визуальный метод считывания негативно влияет на зрение оператора; невысокая точность измерений.

Очевидно, что все недостатки работы с визуальными приборами тесно связаны с их зависимостью от физиологических свойств оператора. Принимая во внимание эти факты, предприятие НПК «Диагностика» разработало серию цифровых автоколлиматоров. Таким образом, несколько лет назад рынок цифровых автоколлиматоров потеснили относительно недорогие отечественные цифровые автоколлиматоры АК-03Ц, АК-05Ц, АК-1Ц и АК-3Ц.

Автоколлиматоры серии АК-Ц (рисунок 3) внесены в ГосРеестр СИ (1, 2 и 3 разряд СИ), имеют Знак Качества СИ. Автоколлиматоры, выпускаемые НПК «Диагностика», с успехом используют, например, такие профильные оптические предприятия, как ОАО «ГОИ», ОАО «НИИ ОЭП», ОАО «НПК СПП», ОАО «КНПЗ», АО «ИЭМЗ «Купол», АО «Швабе – Исследования», а также целый ряд коммерческих организаций. Автоколлиматоры позволяют проводить угловые измерения в автоматическом режиме не только статических, но и динамических объектов. При этом отражающая поверхность объекта измерения может быть различного размера и коэффициента отражения.



*Рисунок 3.*



В настоящее время все большее распространение получает использование вычислительных систем для навигационных комплексов различного класса, соответственно, растет потребность в точных и быстродействующих инерциальных датчиках для обеспечения работы этих систем. Одним из основных устройств для испытаний современных инерциальных датчиков являются поворотные столы и симуляторы движения. Значительная часть испытательного оборудования, используемого для тестирования и калибровки инерциальных датчиков, технически устарело и не отвечает современным требованиям, поэтому назрела необходимость в их замене.

Для решения вопросов испытаний различных гиросприборов на современном оборудовании, в НПК «Диагностика» разработаны и выпускаются: одноосевые стенды СИО-1 (рисунок 4), одноосный стенд СИО-1С, симулятор движения СД-1 (рисунок 5). Одноосевые испытательные стенды СИО-1 внесены в ГосРеестр СИ и проходят периодическую поверку, стенды СИО-1С имеют Знак Качества СИ. Симуляторы движения СД-1 относятся к испытательному оборудованию и в зависимости от требований, проходят аттестацию по ГОСТ Р 8.568-97 или ГОСТ РВ 0008-002-2013. Испытательное оборудование, выпускаемое НПК «Диагностика», с успехом используют, например, такие предприятия, как АО «АПЗ», АО «ВОМЗ», ОАО «ОАО «ЭЛАРА», АО ЦКБА и многие другие.



*Рисунок 4.*



*Рисунок 5.*

Преимуществами данного типа оборудования являются стабильные и высокоточные ТТХ, надежность и удобство эксплуатации. По сравнению и импортным оборудованием, выпускаемые НПК «Диагностика» поворотные стенды отличает более низкая стоимость и сокращенный срок поставки.

В заключение краткого обзора хочется отметить, что празднуя 10-летний юбилей нашей компании, мы благодарим всех наших заказчиков и партнеров за плодотворное сотрудничество и осознанный выбор НПК «Диагностика» в качестве поставщика отечественного оборудования! Прогресс и качество – вот наш девиз.

# **МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЁМНЫХ КАНАЛОВ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ СИГНАЛОВ ОТ НАБЛЮДАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ**

**КОЛИНЬКО В.И., \*КОЛОМИЙЦЕВ Е.Г., ЛЯХОВ А.Ю., САУТКИН В.А.**

**ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»**

**\*ОАО «РусБИТех»**

**E-mail: [sautkin@zenit-kmz.ru](mailto:sautkin@zenit-kmz.ru)**

Чувствительность приёмного канала (ПК) оптико-электронных средств (ОЭС) определяется величиной порогового сигнала – минимального сигнала, который ещё может быть обнаружен приёмным каналом с заданными величинами условных вероятностей: правильного обнаружения и ложной тревоги.

Пороговому сигналу соответствует величина пороговой освещённости входного зрачка оптической системы ОЭС.

Для ОЭС, осуществляющих наблюдение за космическими объектами (КО), величина пороговой освещённости пересчитывается в величину блеска КО, выражаемого в звёздных величинах, и определяет величину проникающей способности приёмного канала ОЭС.

Чем меньше величина пороговой освещённости, которую может принять и обработать ПК ОЭС с целью обнаружения сигнала от КО с требуемыми характеристиками обнаружения, тем выше проникающая способность ОЭС.

Сущность метода состоит в том, что на основе спектрального разложения сигнала от наблюдаемого объекта, который имеет различные значения спектральной зависимости альbedo, представляется возможным для фотопреобразователя со спектральной зависимостью чувствительности осуществить приём сигнала на длине волны, которая обеспечит повышение чувствительности приёмного канала ОЭС в сравнении с интегральным приёмом сигналов.

Этот вывод подтверждается результатами проведенных теоретических исследований и экспериментальных проверок.

# КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ СВЕТОСИЛЬНЫХ ДВУХЗЕРКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВОВ

ЗАВАРЗИН В.И., БЕЛОКУРОВ Е.А.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: zavarzin@bmstu.ru, evgen\_belokurov@yandex.ru

В практике расчета светосильных зеркально-линзовых объективов одним из важнейших вопросов является выбор оптимальной исходной схемы объектива, позволяющей при минимальном количестве компонентов достигнуть приемлемого качества изображения. При этом критериями качества изображения помимо теоретически достижимого дифракционного предела обычно являются результаты, достигнутые в известных, например по литературным и патентным данным, объективах, имеющих аналогичные оптические характеристики и схожие по числу компонентов схемы. Такой подход к установлению критерия качества изображения рассчитываемого объектива «от достигнутого» при простоте и доступности имеет недостаток неопределенности, связанный с субъективными моментами привлечения для анализа ограниченного количества известных объективов. Более объективным критерием в этом случае могла служить эмпирическая формула, связывающая оптические характеристики объектива с достигнутым качеством изображения, например, известная зависимость Д.С. Волосова для фотографических объективов [1]:  $\varepsilon \cdot g \cdot \omega \cdot \sqrt{\frac{f'}{100}} = C_m$ , где:  $\varepsilon$  - относительное отверстие,  $2\omega$  - угловое поле,  $f'$  - фокусное расстояние.

Однако в случае светосильных зеркально-линзовых объективов с угловыми полями на порядок меньше фотообъективов эта формула не может быть использована, хотя необходимость применения новой эмпирической формулы для рассматриваемого класса объективов не ставится под сомнение.

Предлагается в качестве практического критерия качества изображения зеркально-линзовых объективов использовать данные по расчету двухзеркальных апланатических систем. Такой подход возможен по следующим причинам:

1. Качество изображения, достигнутое в апланатической системе, может служить практическим критерием для оценки абберационной коррекции систем с одинаковыми относительным отверстием и угловым полем;

2. Сходство габаритных параметров и коэффициентов экранирования сравниваемых систем; Квaziтождественность оптических схем двухзеркального и зеркально-линзовых объективов с двумя линзовыми компенсаторами, так как использование каждой из двух асферических поверхностей в двухзеркальной системе эквивалентно применению одной линзы.

3. Двухзеркальные светосильные системы по схеме Кассегрена находят применение в качестве объективов в оптико-электронных устройствах различного назначения. Кроме того, такие системы используются как основная часть объективов, содержащих линзовые компенсаторы. Поэтому задача расчета двухзеркальных систем представляет практический интерес.

Исходными параметрами при проектировании двухзеркальных оптических систем в этом случае являются: фокусное расстояние, диаметр входного зрачка, расстояние между зеркалами и положение изображения относительно вершины вторичного зеркала, требуемые значения сферической абберации и изопланатизма [2].

Выявление оптимального числа последовательных членов уравнений апланатических двухзеркальных систем позволило рассчитать и исследовать коррекционные возможности объективов с относительными отверстиями 1:0,8; 1:1; 1:1,5; 1:2 и угловым полем в пространстве предметов до  $6^\circ$ . Рассчитаны 40 вариантов систем с различными комбинациями величин расстояния между зеркалами –  $d/f' = 0,3 \dots 0,6$  и заднего фокального отрезка  $S'_F/f' = 0,1 \dots 0,4$ .

У большинства существующих двухзеркальных объективов параметр  $d$  находится в диапазоне  $-0,3 \dots -0,6f'$ . Для исследования взяты системы с расстоянием между зеркалами в указанных пределах, имеющие коэффициент линейного экранирования не более 0,5.

В системах с относительными отверстиями более 1:2 для всех исследуемых значений параметров первое зеркало представляет поверхность деформированного гиперboloида, а второе зеркало имеет выпуклую поверхность деформированного гиперboloида или вогнутую поверхность деформированного сплюснутого эллипсоида, причем в области перехода от выпуклой к вогнутой поверхности второе зеркало имеет форму, близкую к planoидной.

Аберрационный расчет вариантов систем показал, что поперечная сферическая аберрация в системах с относительными отверстиями 1:0,82...1:0,8 не превышает  $0,04 \dots 0,15$  мрад., а у большинства систем с относительными отверстиями 1:1...1:2 не превосходит 0,05 мрад.

Существенное уменьшение размеров аберрационных пятен рассеяния в изображениях внеосевых точек достигается при условии получения равных размеров аберрационных пятен рассеяния на оси и на краю поля, получаемых при смещении плоскости изображения относительно плоскости Гаусса. Приведены размеры равных аберрационных пятен рассеяния на оси  $2\Delta u'0$  (мм) и вне оси  $\Delta u'\omega$  (мм) при угловых полях  $2\omega = 4^\circ; 6^\circ$  для всех рассматриваемых относительных отверстий исследуемых систем с  $f' = 100$  мм.

Анализ данных показал, что для двухзеркальных объективов с относительными отверстиями от 1:2 до 1:0,8 возможно уменьшение размера внеосевого аберрационного пятна рассеяния примерно на 40...50% при условии получения равных пятен в изображениях осевой и внеосевой точек предмета. При этом существенно увеличивается предельное угловое поле, при котором размеры пятен рассеяния не превышают определенной величины. Для всех рассматриваемых относительных отверстий систем увеличение заднего фокального отрезка на  $0,1f'$  при постоянном расстоянии между зеркалами приводит к уменьшению аберрационных пятен рассеяния для внеосевых точек примерно в 1,5...2 раза. При постоянном заднем фокальном отрезке увеличение расстояния между зеркалами на  $0,1f'$  ведет к уменьшению размера внеосевых аберрационных пятен рассеяния на 10...20%. Такая закономерность проявляется при всех исследуемых относительных отверстиях систем. Например, при двукратном увеличении расстояния  $-d/f'$  между зеркалами с 0,3 до 0,6 размеры внеосевых пятен рассеяния уменьшаются в системе с относительным отверстием 1:0,8 в 1,4...1,5 раза.

Приведены предельные угловые поля, достигаемые в исследованных системах с относительными отверстиями 1:2...1:0,8, при определенном (1 мрад) размере аберрационных пятен рассеяния  $\Delta u'$  вне оси в плоскости Гаусса (ПГ) и в плоскости наименьших пятен рассеяния (ПНПР), где пятна рассеяния на оси и вне оси равны и минимальны. Из анализа этих данных видно, что например, для системы с относительным отверстием 1:1, размер пятен рассеяния, равный 1 мрад в центре и на краю поля достигается при полях до  $4^\circ 12'$ , то есть предельное угловое поле возрастает примерно в 1,5 раза по сравнению с полем системы, в которой исправлено изображение точки на оси.

Уточненная формула, связывающая оптические характеристики объектива с достигнутым качеством изображения для рассматриваемых нами систем будет иметь вид:

$$\varepsilon \cdot B_{an} \cdot \operatorname{tg} \omega \cdot \sqrt{\frac{f'}{100}} = C_m \quad ,$$

где:  $B_{an}$  – коэффициент учета асферических поверхностей, (для двух асферических поверхностей  $B_{an} = 0,9$ ). Сопоставление оптических характеристик показало, что значение  $St$  колеблется вблизи значений 0,016-0,059, если фокусные расстояния  $f'$  выразить в миллиметрах.

**Заключение:** Расчет 40 вариантов двухзеркальных оптических систем с различными комбинациями расстояний между зеркалами и заднего фокального отрезка и результаты исследования позволяют выбирать оптимальные габаритные параметры светосильных двухзеркальных систем, исходя из заданных относительного отверстия, поля и допустимых размеров абберационных пятен рассеяния.

*Список литературы:*

1. *Волосов Д.С.* Фотографическая оптика: (Теория, основы проектирования, оптич. характеристики). Учеб-пособие для киновузов. - 2-е изд. - М.: Искусство, 1978. - С.295-301.
2. *Заварзин В.И.* Двухзеркальные оптические системы с заданным значением сферической абберации и требуемым изопланатизмом. / Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». -2003. №3. С. 29-43.

# РАЗРАБОТКА АВТОНОМНОГО ВИДЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДУЛЯ ИНДИКАЦИИ И ПРИЦЕЛИВАНИЯ НА ОСНОВЕ ГОЛОГРАММНОЙ ОПТИКИ

ПАВЛОВ В.Ю., ШИРАНКОВ А.Ф., СОЛОМАШЕНКО А.Б.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: ashirankov@mail.ru

В настоящее время весьма актуальна задача повышения эффективности систем индикации и прицеливания лётчиков летальных аппаратов (ЛА) типа традиционных широкоугольных коллиматорных головок (ШКГ) или индикаторов на лобовое стекло (ИЛС) за счёт разработки и использования автономного видеоинформационного модуля индикации и прицеливания с более высокими оптическими и эксплуатационными параметрами.

В качестве такого видеоинформационного модуля предлагаем нашлемную систему индикации (НСИ) нового поколения на базе волноводной пластины с голограммными элементами.

Главной задачей НСИ является совмещение изображений, наблюдаемых человеком с поднятой головой через каналы прямого видения и индикации. Информация индикаторного канала представляется в виде цифровой, текстовой, графической информации, интуитивно понятных мнемонических символов, а также изображений. Это позволяет дополнить видимую окружающую обстановку необходимой оперативной информацией: отметкой целей, перекрестием, показаниями приборов, служебными и навигационными данными о состоянии оборудования и всех его подсистем. Дополнительная видеоинформация воспринимается пилотом с поднятой головой и без переаккомодации. При этом минимизируется зрительная нагрузка на глаза, разгружается шея, повышается мобильность человека, сокращается время обнаружения, прицеливания и принятия решения.

Совмещение изображений каналов прямого видения и индикации осуществляется с помощью элемента совмещения каналов. Этот элемент в канале прямого видения не имеет оптической силы и не мешает видению окружающего пространства, а в канале индикации – является частью его оптической системы и формирует удалённое изображение, наблюдаемое пилотом без аккомодации.

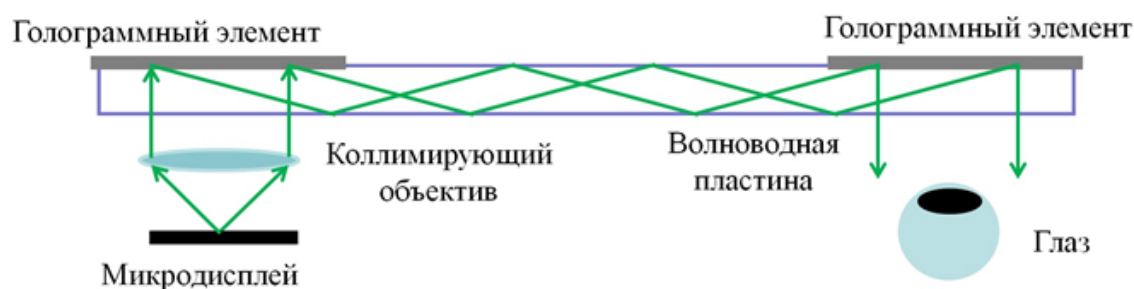
К настоящему времени элемент совмещения каналов НСИ обычно представляет собой селективную плоскопараллельную пластинку или голограммный элемент, которые в канале индикации работают только на отражение, а в канале прямого видения – на пропускание. Голограммный элемент в канале индикации может встраиваться в защитный козырек шлема в соответствующем месте и имеет оптическую силу. В любом случае элемент совмещения является частью оптической системы канала индикации и ошибки его линейного и углового расположения на шлеме приводят к ухудшению качества изображения этого канала, т.е. элемент НСИ конструктивно неразрывно связан с конструкцией защитного козырька шлема.

Элементы конструкции оптической системы канала индикации komponуются на шлеме и также тесно связаны с его размерами и типом. Таким образом, существующие НСИ конструктивно интегрированы в конструкцию шлема и защитного козырька данного типоразмера и не могут быть использованы на шлеме другого размера. Кроме того сложная компоновка и наличие наклонных оптических элементов канала индикации приводит к сложности абберационной коррекции и невозможности достижения требуемого качества изображения в широком поле зре-

ния и при большом диаметре выходного зрачка. Появление в ИЛС голограммных элементов совмещения с угловой селекцией падающего на них излучения, работающих на отражение и пропускание в канале индикации, не устраняет этих недостатков.

Использование в качестве элемента совмещения волноводной пластины с голограммными элементами, которая не имеет оптической силы и работает перпендикулярно осям каналов индикации и прямого видения снимает указанные проблемы.

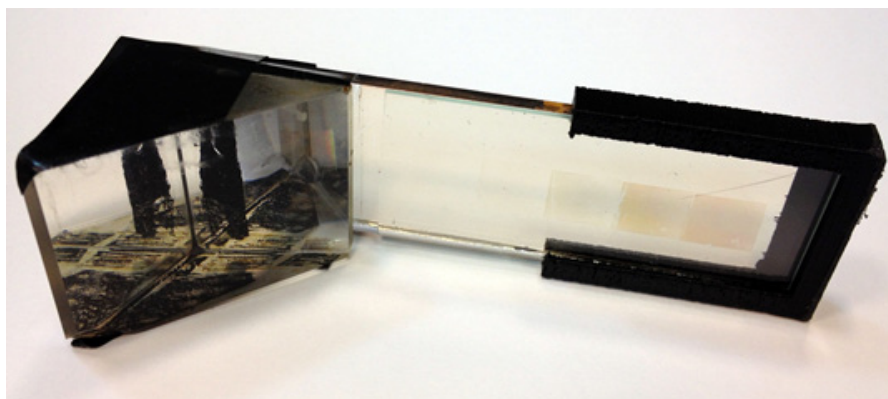
Разработана схмотехника и создан макет такого НСИ, имеющего более высокие оптические параметры и характеристики и представляющего собой компактный, конструктивно автономный и более удобный в эксплуатации модуль. Принцип работы и состав НСИ на базе волноводной пластины с голограммными элементами приведён на рисунке 1.



**Рисунок 1.**  
**Состав и схема работы НСИ на базе волноводной пластины с голограммными элементами**

Главное достоинство такого решения – возможности абберационной коррекции не сдерживаются наличием наклонных оптических элементов (их нет!), и поэтому требуемое высокое качество изображения канала индикации при той же сложности (количестве линз) достигается в большем поле зрения, при большем диаметре выходного зрачка. Возможные ошибки линейного и углового положения волноводной пластины относительно каналов индикации и прямого видения не влияют на качество их изображения. Это позволяет НСИ работать (выдавать высокое качество изображения пилоту в большем поле зрения) при наличии вибраций. Автономный модуль НСИ легко настраивается, а при ремонте возможна независимая замена блока микродисплея, объектива и волноводной пластины или всего модуля НСИ.

На рисунке 2 приведено фото макета волноводной пластины с голограммными элементами. Для удобства ввода видеoinформации индикаторного канала волноводная пластинка снабжена призмой AP-90.



**Рисунок 2.**  
**Макет волноводной пластины с голограммными элементами**

Для разработки модуля НСИ на базе волноводной пластины с голограммными элементами необходимо решить ряд технических и технологических задач в области оптики, голографии, конструирования и системного использования новых технологий. Данный модуль, несомненно, найдёт широкое применение в гражданской и военной областях.

Конструкция НСИ на базе волноводной пластины не зависит от типа и размера шлема и может быть выполнена в виде самостоятельного модуля (например, в виде очков, см. рисунок 3).



**Рисунок 3.**

***Модуль НСИ с волноводной пластиной в виде очков с оправой***

Основные характеристики НСИ с волноводной пластиной:

- рабочее угловое поле, град: до 50 (в перспективе до 70);
- диаметр выходного зрачка, мм – более 18;
- несущая пространственная частота голограмм, лин/мм – до 2000;
- дифракционная эффективность – до 75 %;
- компактность и независимость от типа шлема и размера головы;
- виброустойчивость;
- автономность в работе, программная совместимость с комплексом авиационного вооружения ЛА.

Создание модуля с более высокими оптическими и эксплуатационными параметрами позволит резко повысить эффективность использования обзорно-поисковых систем видеоинформации летчиков ЛА.



# ОСОБЕННОСТИ ОБУЧЕНИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ СРЕДНЕГО ЗВЕНА ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

ПАСТУХОВ В.В.

«Красногорский колледж», г. Красногорск Московской обл.

E-mail: p1602@mail.ru

Рассмотрены отличия точностных требований к оптическим поверхностям от общих требований к механическим деталям. Показаны особенности технологического оборудования и технологии изготовления оптических деталей. Предложен подход к стимулированию студентов по обучению профессии рабочий-оптик и техник-технолог оптического производства.

Ключевые слова: оптическая деталь; учебная оптическая поверхность, Worldskills.

Прежде чем обсуждать особенности обучения рабочих-оптиков и техников-технологов оптического производства, которые обязательно должны иметь практические навыки рабочего-оптика, необходимо рассмотреть требования к оптическим деталям и характеристики существующего технологического оборудования оптического производства.

Оптические детали значительно отличаются от механических деталей тем, что не несут никаких механических нагрузок, а работают формой своих рабочих поверхностей и всей массой материала, преобразуя, проходящее через них, электромагнитное излучение весьма коротких длин волн в видимом и инфракрасном диапазоне. За качественные показатели материала (оптического стекла) ответственность несут специалисты технологи стекловаренных предприятий. «Зона ответственности» рабочего-оптика – изготовление поверхностей оптической детали с требованиями, обеспечивающими нормальную работу оптической детали в оптической системе прибора. Сложность работы оптика определяется высокими требованиями к изготовлению одной или нескольких оптических поверхностей и их взаимному положению. Требования к отдельной оптической поверхности включают в себя три параметра:

Радиус поверхности, допустимые отклонения, которого составляет менее одного микрона;

Допустимое отклонение формы сферической поверхности, которое составляет десятые доли микрона,

Шероховатость поверхности, которая не должна превышать сотых долей микрона, при отсутствии отдельных дефектов поверхности в виде царапин и точек.

При наличии у оптической детали двух и более рабочих поверхностей, накладываются ещё и требования по взаимному их расположению: по линейным размерам, (до нескольких сотых долей миллиметра), и угловым - (до нескольких угловых секунд), которые достигаются на последнем этапе обработки оптической поверхности – полировании. Одновременное достижение такого набора параметров возможно только на конструктивно простом шлифовально-полировальном оборудовании, которое представляет собой два действующих элемента: - вращающийся вертикальный шпиндель, и качающийся в горизонтальной плоскости рычаг. Такая простая схема станка просто заменила руки человека при перемещении верхнего звена, и ноги человека, обеспечивающие относительно вращение нижнего звена относительно верхнего, хождением вокруг неподвижной опоры, на которой закреплено нижнее звено. В прошлом это был тяжелый физический и интеллектуальный труд. Современное оборудование, построенное по этой схеме, просто облегчило работу в физическом плане, но нисколько не облегчила её в плане управления процессом формообразования и обеспечения указанных высоких параметров оптической поверхности. Это оборудование только помогает человеку в достижении описанных требований,

но никак не может заменить его знания и опыт в управлении процессом. При этом практически невозможно предложить точные рекомендации по технологическим режимам обработки: скорости вращения нижнего звена (шпинделя), скорости качания и длины штриха верхнего звена (рычага), а также нагрузки верхнего звена на нижнее звено. Рабочий-оптик определяет эти параметры настройки станка и инструментов на основе весьма общих рекомендаций и, в основном, по опыту предыдущей работы, сначала под руководством более опытного рабочего-оптика, а потом и своего накопленного производственного опыта. В обработке механических деталей существует два способа замыкания системы звеньев участвующих в процессе работы – станок, приспособление, инструмент, деталь, (СПИД): силовой и геометрический. В технологии производства подавляющего числа механических деталей силовой способ замыкания системы СПИД не применяется, а применяется геометрический способ замыкания системы СПИД, при котором точность исполнения заданных чертежом параметров механических деталей, напрямую зависит от точности геометрических параметров оборудования. Проще говоря – даже при высокой квалификации рабочего-механика, точность детали от него не зависит, высококвалифицированный рабочий просто не станет работать на оборудовании, которое не обеспечит требуемые параметры детали. Другое дело в оптическом производстве, где геометрическое замыкание системы СПИД используется только на грубых заготовительных операциях: - распиливания, сверления и сферофрезерования, которые составляют очень небольшую (около 10%) часть трудоёмкости изготовления оптических деталей. Операции шлифования и полирования оптических поверхностей выполняются с применением силового способа замыкания системы СПИД на шлифовально-полировальном оборудовании. Эти операции составляют остальную, - значительную часть трудоёмкости изготовления оптических деталей. Высококвалифицированный рабочий-оптик может изготовить очень точные оптические поверхности на очень простом оборудовании, обеспечивающем уже описанные рабочие движения, и, даже, вообще без специального оборудования, как это делают любители-оптики, изготавливающие первоклассные оптические поверхности в домашних условиях. Необходимо отметить, что самые точные оптические поверхности, так называемые эталоны (основные пробные стёкла), используемые для контроля полированных сферических поверхностей, изготавливаются только вручную на примитивнейшем педальном станке рабочими-оптиками высшей квалификации.

Итак, как же нужно обучать специалистов среднего звена оптического производства требуемой квалификации?

На основании своего, почти полувекового опыта работы в оптическом производстве, могу сказать: без длительного и целенаправленного практического обучения в учебной мастерской, с многократным повторением операций шлифования и полирования, с контролем радиуса и формы поверхности интерференционным методом, цель не может быть достигнута.

Любым количеством времени теоретических занятий, практику заменить невозможно!

Весьма проблематично использование в обучении молодых рабочих высококвалифицированных рабочих-оптиков, работающих в действующем производстве. Они, как правило, не заинтересованы в обучении молодых рабочих, отвлекающих их от производственной деятельности, и не горят желанием готовить себе конкурентов на этом, довольно узком, рынке труда. Такие рабочие-оптики, осознавая свою незаменимость в изготовлении высокоточных деталей, ведут себя довольно обособлено и независимо с руководством цехов, и, даже, с руководством заводов. В своей жизни я встречал и учился у нескольких таких рабочих-оптиков, это настоящие асы своего дела и никакое современное оборудование не может их заменить.

Кто же может обучить студентов этой специальности, входящей в список «топ 50» профессий?

Мой ответ на этот вопрос может показаться неожиданным – только они сами, при личной заинтересованности и создании необходимых для этого условий. Личная заинтересованность

в изучении этой, действительно сложной профессии, проявляется, к сожалению, очень редко. Стимулирующие примеры высоких заработков и неофициального высокого статуса таких рабочих, не эффективны в сравнении с тем, длительным временем (5 – 10 лет) достижения требуемого уровня мастерства, что отпугивает современных молодых людей, желающих получать подобные блага при небольших затратах энергии и времени. Какой же здесь выход? На мой взгляд, нужно использовать ресурс создания необходимых условий при стимулировании здорового соперничества между студентами по достижению высокого качества изготовления учебной оптической поверхности. В настоящее время большой популярностью в мире пользуются соревнования молодых специалистов различных профессий – Worldskills. Этот стимул необходимо использовать в обучении молодых рабочих-оптиков с перспективой выхода на Российский, и, даже, на международный уровень. Создание необходимых условий означает организацию небольшой учебной мастерской с шлифовально-полировальными станками и инструментами; интерферометром или рабочими пробными стёклами, а также, обеспечением основными и вспомогательными материалами: стеклянными заготовками, шлифовальными и полировальными абразивами, блокировочными и полировочными смолами. Такую мастерскую несложно организовать на ПАО «Красногорский завод имени С.А. Зверева», тем более что завод сам заинтересован в обучении рабочих-оптиков. Теоретическую часть обучения могут обеспечить преподаватели колледжа, а и практическую - мастера отдела обучения завода. Такой подход к обучению поможет выявить способных молодых людей среди студентов, которые смогут быстрее других освоить получение высококачественных оптических поверхностей и избрать профессию рабочего-оптика или технолога-оптика осознано и успешно.

## ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

### А

Абдулкадыров М.А.	37,174,178
Азербайбаева Е.И.	37
Алехнович В.И.	96,167
Алешко Е.И.	112
Алещев А.А.	129
Андреева Н.П.	196
Архипов С.А.	34,55,102,105 135

### Б

Баев С.Г.	155
Барашков М.С.	196
Байков А.В.	132
Бакланов А.И.	19
Барабанов А.Б.	52
Базров Б.М.	167
Барышников Н.В.	10,144,203
Бессмельцев В.П.	155
Белов М.Л.	97
Белокуров Е.А.	211
Берденников А.В.	199
Беляев К.С.	34,105
Бездидько С.Н.	17
Беловолов М.И.	164
Богатова Г.А.	89
Бугороков К.Н.	151
Блинов В.Д.	114
Белоусов С.П.	174

### В

Вельтищева В.В.	56
Васильев А.С.	81
Васильева Е.Ю.	186
Васильев Д.Ю.	112
Валейский Д.В.	163
Волков П.В.	164
Володин Е.Б.	62
Воронин Е.Г.	121
Владимиров Н.М.	174,178

### Г

Генжаев Ш.А.	34,105
Герасименко В.В.	186
Гончаров Н.В.	207
Гладышева Я.В.	144

Голошевский Н.В.	155
Горяев Н.Е.П.	155
Городничев В.А.	97
Головин Ю.М.	55
Гречухин И.А.	89
Гришин Е.А.	89
Горшков В.А.	186,189,193

### Д

Димедович Т.И.	163
Добриков Н.С.	37,174,178
Долгих А.Е.	108
Дорошкевич А.Г.	163
Дубов В.В.	183

### Е

Евстигнеев В.Л.	196
Егошин Д.А.	112

### Ж

Жердев А.Ю.	158
Животовский И.В.	203
Жидков П.М.	108

### З

Заварзин В.И.	70,72,74,211
Запрягаев С.В.	52
Завелевич Ф.С.	55
Зубко А.В.	135

### И

Иванов С.Е.	97
Ивлев О.А.	89
Игнатов А.Н.	37,174

### К

Кабанов А.С.	32
Калюгин В.С.	8
Квитка В.Е.	114
Карев П.В.	44, 66
Кастеров В.В.	155
Казанцев А.О.	189
Коломийцев Е.Г.	129,210
Коротаев В.В.	81
Ковалев М.С.	77,151
Корнеев С.Л.	100

Корнеев Н.Г.	189,193	Никаноров Ю.Н.	155
Кобылин А.В.	52	Никулин А.Г.	55
Колинько В.И.	129,210	Нонин А.С.	76
Коваль Ю.И.	89		
Клюшников М.В.	58,114	<b>О</b>	
Козлов С.Д.	199	Одинокоев С.Б.	77,151,158
Козлов Д.А.	55, 56		
Козлов И.А.	55,56	<b>П</b>	
Красовский С.Н.	163	Павлов В.Ю.	92,214
Красин Г.К.	77	Пастухов В.В.	217
Кравцов Д.А.	97	Патрикеев В.Е.	37,144,174,178
Кравченко С.О.	34	Папаев А.Ю.	37
Крымский М.И.	196	Пискунов Т.С.	203
Курлов В.Н.	164	Пискунов Д.Е.	92,203
Курт В.И.	112	Питик С.Д.	89
Кувшинов А.В.	97	Пономарев В.А.	32
Кузнецов А.Н.	183	Поздняков Ю.И.	186
Куликов В.Б.	52	Полунадеждин В.В.	89
		Польских С.Д.	89
<b>Л</b>		Пономарева О.А.	89, 189
Лаврухин В.П.	112	Пухтеев А.И.	52
Леун Е.В.	164	Перебейнос В.В.	183
Лукин А.В.	30, 199	Прилепский Б.В.	89
Лушников Д.С.	158	Пышнов В.Н.	30
Лузганова М.Ю.	34,105	Придня В.В.	174
Ляхов А.Ю.	129,210	Полянщиков	174,178
<b>М</b>		<b>Р</b>	
Малыгин М.С.	85	Рогалин В.Е.	196
Максимов М.В.	155	Романовский А.С.	55
Маркин В.В.	158	Рыжков А.А.	183
Мазавин С.М.	42		
Маслов Д.В.	52	<b>С</b>	
Мельников А.Н.	30, 199	Сальникова М.А.	34,102,105
Митрофанова Ю.С.	8	Сальникова Л.Ю.	189
Митин К.В.	89, 196	Сабиров А.Р.	52
Морозов С.А.	34,105	Сауткин В.А.	127,129,210
Морозов А.Б.	37	Сагателян Г.Ф.	151
Монахов Д.О.	55	Самбаров Г.Е.	127
Мирохин А.В.	126	Семенов А.П.	37,174,178
		Сеник Б.Н.	8
<b>Н</b>		Соловьев Д.Е.	105
Насыров А.Р.	199	Солодков А.А.	52
Невров А.С.	186,189	Соломашенко А.Б.	214
Нечипоренко К.А.	52	Скляров С.Н.	186
Неклюдов М.Ю.	52	Смирнов А.М.	201
Новикова О.Ю.	89	Скочиллов А.Ф.	30
Новиков В.П.	42,169		

Стратилатов Н.Р.	76
Сцепуро Н.Г.	77
Сысоев В.К.	164

## **Т**

Тарасов В.В.	52
Тимофеев О.В.	42,169,171
Ткаченко А.С.	76
Тышкунов Н.В.	55,56
Тер-Нерсисянц Е.В.	150

## **Ф**

Федотов Ю.В.	97
Филимонов П.А.	97

## **Х**

Хайлов А.В.	52
Хорохоров А.М.	92

## **Ч**

Чекалин В.Ф.	100
Чекмарев В.А.	52
Четвернин М.Ю.	167
Черпакова А.А.	97
Чибилов П.В.	203
Чурилин В.А.	193

## **Ш**

Шалай В.В.	164
Шайда А.Н.	76
Шеваренков Д.Н.	42
Ширанков А.Ф.	92,96,167,214
Шишова М.В.	158
Шлычков В.И.	85
Шушканова Т.Г.	163
Шулепов А.В.	164
Шаров Ю.А.	174

## **Щ**

Щетинникова Т.И.	186
------------------	-----

## **Я**

Яковчук Е.А.	126
Якушенков П.О.	140
Якушенков Ю.Г.	12
Яшнова Н.А.	171

## ДЛЯ ЗАМЕТОК

Сборник тезисов докладов  
на научно-практической конференции  
«Оптико-электронные приборы и комплексы»

Материалы представлены в авторской редакции.

ПАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева»  
октябрь 2017 года

Заказ 2017.10-1483