КОНТЕНАНТ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ISSN: 2307-5767
Том 17, № 1, 2018

Журнал включен в Российский Индекс Научного Цитирования
Зарегистрирован в Научной Электронной Библиотеке
Лицензионный договор № 727-11/2014

Учредитель и издатель – Общественная научно-техническая академия «Контенант»
Издается с 2002 г.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПТИКЕ

Воронин Е.Г.
Изгиб строк оптико-электронных космических снимков 7

Калюта А.Н., Давыдов О.И. Акимов Е.В.
Проблемы применения малых космических аппаратов ДЗЗ 12

Губанов Ю.В.
Повышение массовой эффективности конструкций летательных аппаратов, за счет применения трехслойных сотовых элементов из композиционных материалов 18

Клюшников М.В.
Высоко или низкоорбитальные? сравнительный анализ возможных перспективных группировок ДЗЗ 30

Ширчков Д.А.
Развитие метода анализа матричной диаграммы инфологической модели предметной задачи 34

Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Моисеев Е.А, Сенник Б.Н.
Методы совмещения изображений различных каналов комбинированной системы визуализации изображений в единую картину 39

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Сальникова М.А., Архипов С.А., Морозов С.А.
Математические модели применяемые при проектировании оптических прецизионных конструкций 43

Логинова М.П.
Методы проектирования атермализированных объективов для дальнего ИК-диапазона спектра 47

Насибуллин Р.А.
Формирование требуемой спектральной характеристики оптического излучателя с помощью цветных светодиодов 53

Квитка В.Е., Клюшников М.В., Блинов В.Д.
Алгоритмы шумоподавления, реализуемые в бортовой аппаратуре 56

Борбенчук А.С., Чернышев А.О.
Оценка твердости материалов современными методами 63

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

Одиноков С.Б., Сагателян Г.Р, Бугорков К.Н., Ковалев М.С.
Возможности плазмохимического травления стекла с применением высокочастотной диодной системы 67

КОНТЕНАНТ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ISSN: 2307-5767
Том 16, № 4, 2017

Журнал включен в Российский Индекс Научного Цитирования
Зарегистрирован в Научной Электронной Библиотеке
Лицензионный договор № 727-11/2014

Учредитель и издатель – Общественная научно-техническая академия «Контенант»
Издается с 2002 г.

СОДЕРЖАНИЕ
(продолжение)

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.
Выполнение комплекса работ по восстановлению и улучшению оптических характеристик главного зеркала телескопа БТА 71

Семенов А.П., Абдулкадыров М.А., Добриков Н.С., Игнатов А.Н., Патрикеев В.Е., Морозов А.Б., Азербаева Е.И., Папаев А.Ю.
Изготовление внеосевых матриц из астроситалла с асферичностью до 20 мм для производства сегментов зеркала космического телескопа 77

Сарайкин Д.С.
Анализ и сравнение способов питания RFID датчиков давления 84

Андреева Н.П., Барашков М.С., Евстигнеев В.Л., Крымский М.И., Митин К.В., Рогалин В.Е., Щебетова Н.И.
Нелинейно-оптические технологии создания источников излучения, перестраиваемых в УФ, видимом и ИК диапазонах 88

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 бесконтакных координатных измерений размеров изделий ракетно-космической промышленности ... 106

ИСТОРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Баженов И.А.
Управление качеством военно-промышленного комплекса российской федерации – одна из основ национальной безопасности 111

Пелих С.А.
Автаркия – возможная стратегия развития союзного государства 115

Уважаемые коллеги!

Оргкомитет и Организаторы

XV МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

ГолоЭкспо 2018 (HoloExpo 2018)

приглашают Вас принять участие в Международной научно-технической конференции

«Голография. Наука и практика»,

которая состоится 11-13 сентября 2018 г., в г. Нижний Новгород, в отеле COURTYARD Marriott, ул. Ильинская, 46 (www.marriott.com.ru)

Целью конференции является обсуждения новейших научно-технических достижений и технологий в области голографии в России, Республике Беларусь и в других странах СНГ и за рубежом, а также оценки состояния рынка голографических технологий и продукции и направлений их развития.

Организаторы конференции:

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия); АО НПО «Криптен» (г. Дубна, Россия), ООО «ХолоГрэйт» (г. Санкт-Петербург, Россия), ЗАО «Голографическая индустрия» (г. Минск, Республика Беларусь), ФГУП «НТЦ «Атлас»» (г. Москва, Россия), ООО «Регула» (г. Минск, Республика Беларусь), ООО «Микро и наноголографические системы» (г. Москва, Россия), АО «НПО Государственный институт прикладной оптики» (г. Казань, Россия), ООО «Дотрикс» (г. Москва, Россия).

Генеральный спонсор:

АО Научно-производственное объединение «Криптен» (г. Дубна, Россия).

Спонсоры конференции:

ЗАО «Голографическая индустрия» (г. Минск, Республика Беларусь)
ООО «ХолоГрэйт» (г. Санкт-Петербург, Россия)
ФГУП «НТЦ «Атлас»» (г. Москва, Россия)
АО «НПО Государственный институт прикладной оптики» (г. Казань, Россия)
ООО «Дотрикс» (г. Москва, Россия)
Общественная научно-техническая академия «КОНТЕНАНТ» (г. Красногорск, Россия)

Устроитель конференции:

ООО «Микро и наноголографические системы» (г. Москва, Россия).

Информационные спонсоры:

Журнал «Мир Голографии» (г. Москва, Россия)
Журнал «Мир техники кино»(г. Москва, Россия)
Журнал «Фотоника» (г. Москва, Россия)
Журнал «КОНТЕНАНТ» (г. Красногорск, Россия)

Конференция проводится при поддержке:

- Министерства образования и науки РФ в лице департамента науки и технологий;
- ведущих университетов и научно-исследовательских институтов России:
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), Санкт-Петербургский государственный национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (СПб ИТМО), Санкт-Петербургский Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ им. М.В. Ломоносова), Российский Университет Дружбы Народов (РУДН, г. Москва, Россия), Самарский государственный Аэрокосмический университета имени С.П. Королева (СГАУ имени С.П. Королева), Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,

Томский государственный университет, Оптическое общество им. Д.С. Рождественского (г. Санкт-Петербург); Самарский институт систем обработки изображения РАН, Институт Автоматики и Электрометрии (ИАиЭ, г. Новосибирск) и др.

- ведущих научно-производственных предприятий России:

АО «НПО ГИПО», АО «НПО «Криптен»», ФГУП «НТЦ АТЛАС», ООО «ХолоГрэйт», ООО «Микро и наноголографические системы», ООО «Дотрикс», АО «Государственный оптический институт имени С.И. Вавилова» (ГОИ имени С.И. Вавилова), АО «Славич» (г. Переславль-Залесский, Россия) и др.;

- ведущих университетов и предприятий Республики Беларусь:

ЗАО «Голографическая индустрия», ООО «Магия света», ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова» Национальной академии наук Беларуси, Белорусского государственного университета, Белорусского оптико-механического объединения и др.

- зарубежных компаний и фирм в области голографии:

OpSec Security (England), Компания «Демакс-Голография» (Болгария), ADL Optica Gmbh (Germany), Process Color, Ignetta Ernakulam, (Kerala, India), «Geola digital UAB» (г. Вильнюс, Литва), Институт голографии (г. Афины, Греция) и др.;

- Международной ассоциации производителей голограмм (IHMA) в лице Микаэла Сидорова.

На научно-практической конференции будут работать следующие секции:

Секция №1 - «Технологии получения защитных голограмм»

Секция №2 - «Формирование изображений и отображение информации с помощью голограммной оптики и оптико-голографических систем»

Секция №3 - «Голограммные и дифракционные оптические элементы, методы компьютерного синтеза и технологии их изготовления, метаматериалы, нанотехнологии и плазмонные структуры для голографии»

Секция №4 - «Объемная голография и фоточувствительные материалы для голографии»

Секция №5 - «Голографическая интерферометрия, голографическая память, оптико-голографическая обработка информации»

Регламент и тематика научно-практической конференции:

- 10 сентября (понедельник) 2018 г. заезд и регистрация участников 14^{00}- 18^{00} в холле отеля COURTYARD Marriott, ул. Ильинская, 46, г. Нижний Новгород;
- 11 сентября (вторник) 2018 г. – регистрация участников конференции 8^{30}- 9^{30}; торжественное открытие конференции 9^{30}- 10^{00};
- 11 сентября (вторник) 2018 г. - время заседаний 10^{00}- 19^{00};
- 12 сентября (среда) 2018 г. - время заседаний 10^{00}- 19^{00}, закрытие конференции.
- 13 сентября (четверг) 2018 г. – экскурсионная программа по г. Нижнему Новгороду.

Рабочие языки конференции – русский и английский. Во время работы конференции будет обеспечен синхронный перевод с русского на английский и с английского на русский языки.

Участие в конференции с докладом:

Для выступления на конференции с докладом следует прислать

- до **30 апреля 2018 г.** заявку с названием доклада, фамилиями авторов и названием организации на русском и английском языках по адресу e-mail: odinokov@bmstu.ru;
- **до 31 мая 2018 г. (deadline)** тезисы доклада объемом от 2-х и до 10-ти страниц на русском языке и от 1-ой и до 3-х страниц на английском языке по адресу e-mail: odinokov@bmstu.ru. Тезисы докладов оформляются в электронном виде на формате А4 с полями 25 мм-слева, 20 мм-сверху и снизу, 15 мм-справа, шрифт Times New Roman, размер 14, **только расширением .DOC**. Программным комитетом будет осуществлен отбор докладов на конференцию **до 01 июля 2018 г.** В программе конференции предусмотрены пленарные, секционные и стендовые доклады. Приглашения для выступлений будут высланы **не позднее 13 июля 2018 г**. Подробную информацию можно найти на сайте www.holoexpo.ru.

Участие в конференции без доклада:

Для регистрации в качестве участника конференции без доклада следует до **31 мая 2018 г.** прислать заявку по электронной почте odinokov@bmstu.ru. Форму заявки и подробную информацию о прошедших ранее конференциях можно найти на сайте www.holoexpo.ru.
Программа конференции постепенно (по мере поступления докладов) будет публиковаться на сайте www.holoexpo.ru и в конечном виде будет представлена и разослана всем участникам конференции **16 июля 2018 г**.

Организационные взносы:

1) с докладчиков, представивших доклады на пленарных, секционных заседаниях, стендовых докладах из государственных институтов РАН, университетов и высших учебных заведений, отраслевых институтов и ФГУП, коммерческих организаций организационный взнос **не взимается**;
2) со студентов и аспирантов, как слушателей конференции, из любых организаций и всех стран организационный взнос **не взимается**;
3) с участников конференции без доклада взимается организационный взнос в размере 5000 рублей (включая НДС) с юридических лиц и 1500 рублей с физических лиц.

Способы оплаты:

Форму заявки и форму для оплаты оргвзноса можно найти на сайте www.holoexpo.ru.
Возможна оплата оргвзноса наличными деньгами в момент регистрации участника на конференции 11-12 сентября 2018 г. в г. Нижний Новгород.
Все участники конференции обеспечиваются сборником докладов конференции в электронном виде, сувенирами, кофе-брейками и участием в банкете.
Рекомендуем заранее бронировать номера в отеле COURTYARD Marriott www.marriott.com.ru, отеле «Ирис» iwww.iris-nn.ru
По вопросам конференции обращаться:
Алпаткина Виктория
тел. +7(495)263-63-44
e-mail: alpatkina.victoria@yandex.ru, odinokov@bmstu.ru

Председатель Организационного комитета
XV Международной конференции ГолоЭкспо 2018,
доктор технических наук, профессор ***С.Б. Одиноков***

ИЗГИБ СТРОК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

ВОРОНИН Е.Г.

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

E-mail: optecs@mail.ru

Аннотация: *Рассмотрено явление деформации съёмочного маршрута оптико-электронной космической съёмки при трансформировании в картографическую проекцию, которое проявляется в виде параболического изгиба строк от середины к краям вдоль всего съёмочного маршрута, образуя подобие жёлоба. Показано, что основной причиной возникновения такой деформации является несоответствие оптической (теоретической) и электронной (фактической) скоростей движения изображения в фокальной плоскости съёмочной аппаратуры вследствие изменения масштаба изображения центральной проекции вдоль оптико-электронного преобразователя (поперёк линии направления съёмки). Получены подтверждающие эту гипотезу экспериментальные измерения реальных снимков. Выполнен анализ влияния основных факторов на величину деформации. Предложены пути противодействия этому явлению.*

Ключевые слова: оптико-электронные космические снимки, геометрическая деформация снимков, математическая (геометрическая) модель съёмки, смещения точек снимков, скорость движения изображения.

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.

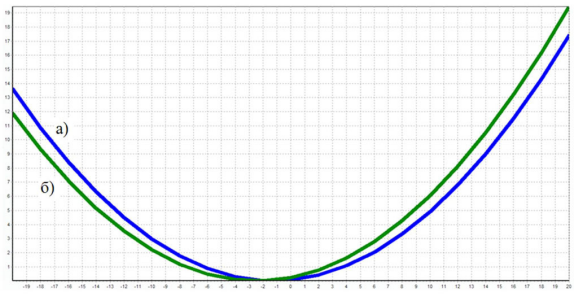


Рисунок 1.
Графики зависимости абсолютной величины продольного смещения на одноимённых точках (в пикселях) от угла тангажа (в градусах): а) - для смежных ПЗС-матриц, расположенных в середине ОЭП; б) - для ПЗС-матриц, расположенных на краю ОЭП

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.

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-электронны-

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)	–

ми 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 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»;

γ – 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 рис. 1, построены именно для функции Δp.

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 смещениям Δp 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.

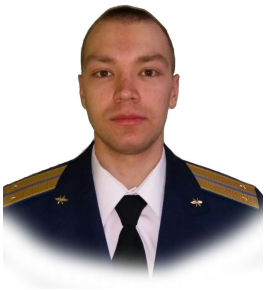
УДК 629.785

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЗЗ

КАЛЮТА А.Н. - полковник, заместитель командующего 15-й армии Воздушно-космических сил
ДАВЫДОВ О.И. - оператор 3 научной роты КВ ВКС РФ, лейтенант
АКИМОВ Е.В. - оператор 3 научной роты КВ ВКС РФ

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

E-mail: vanya.bazhenov.94@mail.ru



Давыдов О.И.

Акимов Е.В.

Аннотация: *В данной работе рассматриваются современные космические системы дистанционного зондирования Земли. Приводятся различные проблемы в применении малых космических аппаратов ДЗЗ. Дается оценка перспектив развития подобных систем.*

Ключевые слова: малый космический аппарат, дистанционное зондирование Земли.

PROBLEMS OF APPLICATION OF SMALL SPACE VEHICLES OF REMOTE SENSING

KALYUTA A.N., DAVYDOV O.I., AKIMOV E.V.

PJSC «Krasnogorsky plant him S.A. Zvereva», Krasnogorsk

E-mail: vanya.bazhenov.94@mail.ru

Abstract: *This paper discusses the modern space system for remote sensing of the Earth. Describes various issues in the use of small satellites for remote sensing. Assesses the prospects for the development of such systems.*

Keywords: small spacecraft, Earth remote sensing.

ВВЕДЕНИЕ

В наше время космонавтика развивается очень интенсивно так, как освоение космоса стало доступно для многих развивающихся стран. Однако не все они могут выводить на орбиту большие космические аппараты, это связано с большой стоимостью аппарата и трудностью доставки его на расчетную высоту, поэтому им приходится искать замену – более дешевые и малогабаритные аналоги, возможности которых соизмеримы с их большими собратьями. Так в последнее десятилетие в космических отраслях многих ведущих космических держав наметилась тенденция к созданию малых космических аппаратов, в частности для дистанционного зондирования Земли.

Следует отметить некоторые неоспоримые преимуществ МКА:

• Сравнительно невысокая стоимость запуска — вывод аппаратов малой массы осуществляется на низкие орбиты с помощью более дешевых средств легкого или среднего класса, в том числе российских конверсионных ракет, предназначенных для утилизации путем запуска с полезной нагрузкой. Кроме того, малые спутники запускаются не поодиночке, а целой группой — «кластерный запуск», что удешевляет себестоимость запуска одного аппарата. Также возможен «попутный запуск» в качестве сопутствующей нагрузки к большому спутнику.

• Сжатые сроки создания (1-3 года вместо 5-10 лет). Сокращение производственного цикла связано с узкой специализацией спутника, использованием серийных компонентов, унифицированных платформ, традиционных конструкторских и технологических требований к разработке, созданию, запуску и эксплуатации. Сжатые сроки создания способствуют скорейшему возврату инвестиций.[1]

В настоящее время наблюдаются два направления развития МКА: запуск одиночных аппаратов, способных выполнять почти все задачи больших космических аппаратов, в том числе и съемку земной поверхности, и создание группировок спутников для повышения их функциональных возможностей, а также частоты повторного просмотра.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ СИСТЕМЫ

В число перспективных технологий, которые будут направлены на повышение функциональных характеристик системы ДЗЗ, относится организация полета нескольких космических аппаратов (КА) группой или «роем» — космические аппараты движутся на относительно малом расстоянии друг от друга. При этом каждый аппарат выполняет отдельные функции, но все аппараты действуют сообща, распределяя между собой задачи. Например, передача целевой и/или телеметрической информации на Землю может осуществляться через специальный спутник, оборудованный телеметрической системой с большой пропускной способностью для передачи данных, собранных другими аппаратами. Такое распределение задач сильно снижает ограничения на состав полезной нагрузки, однако при выходе из строя хотя бы одного ключевого спутника приведет к сильному ограничению функциональных возможностей всей системы в целом.

Из существующих на сегодняшний день группировок МКА можно выделить некоторые:

DMC (Disaster Monitoring Constellation) – первая специализированная международная многоспутниковая система для мониторинга земной поверхности. DMC создана путем объединения ресурсов нескольких малых КА, разработанных компанией SSTL для Алжира, Великобритании, Нигерии, Турции, Испании и Китая. Спутники первого поколения DMC имели спектральные каналы (G, R, NIR) и разрешение (32 м). Разрешение спутников второго поколения улучшилось до 22 м. Спутник второго поколения UK-DMC 2 имеет массу 120 килограммов и срок службы 5 лет. Он оснащен мультиспектральным тепловизором с разрешением 22 м и шириной полосы съёмки 660 км, работающим в G, R и ближних инфракрасных спектрах.

RapidEye – группировка из пяти миниспутников, предназначенная для решения наблюдательных задач во многих отраслях. Ниже в таблице 2 приведены основные характеристики аппаратуры спутников.

Съёмка выполняется сеансами с максимальной длиной полосы в 3 000 км. В пределах одного сеанса спутник может снять участок поверхности Земли шириной 77 км и длиной до 1 500 км, что обеспечивает ежедневную съёмку площадью в 4 млн км².

SSCEDMF (Small Satellite Constellation for Environment and Disaster Monitoring and Forecasting) – китайская национальная группировка, начавшая работу в сентябре 2008 года и предназначенная для целей оперативной съёмки районов катастроф, мониторинга окружающей среды и прогнозирования ЧС. Пока она состоит из 2-х спутников ДЗЗ и одного радарного спутника. В перспективе группировка дорастет до 4 оптических и 4 радарных спутников (поэтому ее еще называют «**4+4**»).

SkySat – серия спутников дистанционного зондирования Земли, разработанная американской компанией Terra Bella. Первый спутник SkySat-1 был доставлен на орбиту с космодрома Ясный в России 21 ноября 2013 года с помощью ракеты-носителя «Днепр». SkySat-1 и -2 имели размер около 60 × 60 × 80 см и вес 83 кг. Данные изображения передаются в формате X-band в формате JPEG-2000 со скоростью передачи данных 470 Мбит/с. Управление спутниками происходит в S-диапазоне с 16 кбит/с. Внутренняя емкость составляет 768 ГБ, солнечные элементы электропитания мощностью 120 Вт.

Сравнение характеристик существующих малых космических аппаратов приведено в табл 1.

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЗЗ

Однако все вышеперечисленные системы хоть и имеют характеристики, близкие к большим космическим аппаратам, они не являются полной их альтернативой по ряду причин.

На сегодняшний день не выработан отлаженный механизм вывода МКА на орбиту: аппараты запускаются либо попутно (т.е. вместе с основным КА), но только при условии неполного использования возможностей ракеты-носителя, либо при помощи адаптеров-диспенсеров, но данная технология применима для нано- и пикоспутников формата CubeSat.

Следует отметить также, что объекты на низкой околоземной орбите испытывают влияние верхних слоев атмосферы и, как следствие, происходит снижение их скорости, обусловленное трением спутника о разреженные, но всё же присутствующие газы. Среда низкой околоземной орбиты (НОО) сильно загрязнена космическим мусором. В журнале Orbital Debris Quarterly News (NASA) за апрель 2010 г опубликованы тезисы доклада [4] «Синдром Кесслера: значение для будущих операций в космосе». Авторы делают вывод: «…результаты всех новейших исследований подтверждают, что сейчас мы вступаем в период, когда возрастающий при столкновениях уровень техногенного загрязнения околоземного пространства (ОКП) будет контролируемым. При отсутствии возможностей уклонения от столкновений, управление будущей обстановкой требует, чтобы мы полностью применяли все текущие меры по предотвращению загрязнения ОКП ко всем отслужившим срок КА и ракетоносителей. Дополнительно, вероятно, потребуется постоянно удалять некоторые объекты с орбиты». Программы ведущих космических держав на сегодняшний день не могут предложить осуществимого плана по очистке космического пространства от мусора. Методы уборки и уничтожения космического мусора хоть и разрабатываются, но далеки от осуществимых проектов. Поэтому для обеспечения безопасности в космическом пространстве международное сообщество работает в направлении контроля и каталогизации информации о наиболее крупных объектах в околоземном пространстве.

Так как в современных условиях приоритетной является задача осуществления непрерывного обновления данных о заданном локальном районе, то невысокие мощности бортовых систем электроснабжения, хранения и передачи информации МКА резко ограничивают возможности по обработке,

Таблица 1.

Основные характеристики малых оптико-электронных спутников ДЗ, с разрешением от 32 м и лучше

Основные характеристики малых оптико-электронных спутников ДЗ, с разрешением от 32 м и лучше														
Название	**Страна**	**Разработчик**[К 1]	**Дата запуска**	**Носитель**	**Масса, кг**	**Режимы съемки**		**Разрешение**		**Высота орбиты, км**	**Тип орбиты**	**Ширина полосы съемки, км**	**Периодичность, сутки**	**Производит-ть, млн кв. км/сутки**
						пан.	**мультисп.**	**пан.**	**мультисп.**					
DMC (*Disaster Monitoring Constellation*)														
Alsat-1	1-ое поколение	Алжир	SSTL	01.11.2002	Космос-3М	90	-	G,R,NIR	-	32	686	ССО	600	5 (один спутник); 1 (группировка)	н/д
UK-DMC		Великобр.		27.09.2003	Космос-3М	100	-	G,R,NIR	-	32	686	ССО	600		
Nigeriasat-1		Нигерия		27.09.2003	Космос-3М	100	-	G,R,NIR	-	32	686	ССО	600		
BilSat		Турция		27.09.2003	Космос-3М	130	+	G,R,NIR	12,6	26	686	ССО	24/52		
Bejing-1		Китай		27.10.2005	Космос-3М	166	+	G,R,NIR	4	32	686	ССО	24/600		
Deimos-1	2-ое поколение	Испания		29.07.2009	Днепр	91	-	G,R,NIR	-	22	686	ССО	660		
UK-DMC-2		Великобр.		29.07.2009	Днепр	120	-	G,R,NIR	-	22	686	ССО	660		
Nigeriasat-X		Нигерия		17.08.2011	Днепр	100	-	G,R,NIR	-	22	686	ССО	660	4-6 — VHRI, 1-2 — MRI	
Nigeriasat- 2	3-е поколение	Нигерия		17.06.2011	Днепр	300	+	B,G,R,NIR	1	4	630	ССО	20-80/330	4-6 — VHRI, 1-2 — MRI	
UK-DMC-3 (3 шт.)	1-е поколение VHR	Китай		2014		350	+	B,G,R,NIR	1	4	630	ССО	22	1 (для трех спутников)	>0,1 каждый
Группировка **RapidEye**, Германия															
RapidEye (5 шт.)		Германия	MDA, SSTL, JOP	29.08.2008	Днепр	150	-	B,G,R,NIR, Red Edge	-	6,5	630	ССО	77	1 (для пяти спутников)	4
Группировка **SSCEDMF,** Китай															
HJ-1A	Система 1-го этапа: «2+1» (2 оптич. + 1 радарн.)	Китай	CAST	06.09.2008	Long March 2C	473	-	B,G,R,NIR	-	30	649	ССО	720	4 (каждый), 2 (оба)	н/д
HJ-1B						496									
Одиночные малые спутники ДЗЗ разных стран, предназначенные для мониторинга народного хозяйства и ЧС — прототипы последующих национальных спутников малого класса															
EgyptSat-1		Египет	ГКБ «Южное»	14.07.2007	Днепр	150	+	G,R,NIR	Аналог Сич-2						
RasakSAT		Малайзия	ATSB, SI	14.07.2009	Falkon	180	+	G,R,NIR	2,5	5	685	Ок. экват.	20/685	н/д	н/д
DubaiSat-1		ОАЭ	EIAST, SI	29.07.2009	Днепр	190	+	B,G,R,NIR	2,5	5	680	ССО	20	н/д	12000 м/день
Rasat		Турция	TUBITAK	17.06.2011	Днепр	93	+	B,G,R	7,5	15	689	ССО	30	4	н/д
Сич-2		Украина	ГКБ «Южное»	17.08.2011	Днепр	176	+	G,R,NIR	7,8	7,8	668	ССО	55 в надире	5	н/д
Канопус-В		Россия	ФГУП «НПП ВНИИЭМ»	22.07.2012	Рокот	400	+	G,R,NIR	2,1	10,5	510—540	ССО	20 (510)	5	>2
БКА		Белоруссия													

хранению и передаче на Землю больших объёмов данных со съемочной аппаратуры с высоким разрешением.

Анализ показывает[5] , что одной из главных проблем создания полномасштабных космических систем на базе МКА является разработка систем управления. Ввиду усложнения перспективных космических систем задачи управления ими должны быть ориентированы главным образом на достижение общесистемного эффекта путём управления ресурсами системы в целом, а не отдельных КА.

Другой альтернативой МКА, находящимся над локальным районом лишь несколько минут, могут стать так называемые псевдокосмические аппараты (ПКА), представляющие собой стратосферные беспилотные летательные аппараты на солнечной энергии с большой длительностью беспосадочного полёта. ПКА обеспечивают наблюдение заданных районов, сопоставимых по площади с территорией таких стран, как Афганистан, Сирия, в режиме «неморгающего глаза» за счёт многосуточного барражирования по замкнутому маршруту с аппаратурой для высокодетальной съёмки.

За рубежом – прежде всего в США – концепция создания и применения МКА формируется уже четверть века, начиная с 1991 года, с событий в зоне Персидского залива. Результаты разработки МКА по программам TACSAT, ORS, System F6 не в полной мере оправдали ожидания военных заказчиков.

Текущий период характеризуется стремлением обеспечить максимально возможный темп обновления информации по локальным районам в особые периоды военно-политической обстановки. Ориентиром может быть проект SeeMe, в рамках которого непрерывность наблюдения и предоставление видовой информации по требованию мобильным пользователям реализуется орбитальной группировкой в составе 24 МКА стоимостью всего 500 тысяч долларов, весом до 20 кг, с небольшим (45 суток с доведением до 60-90 суток) сроком активного существования на нетрадиционных орбитах высотой 200-300 километров.

При этом оптическая система обеспечивает разрешение около 1 метра при диаметре апертуры всего 25 см. Для недорогостоящего запуска таких МКА планируется использовать авиационный носитель, создаваемый по проекту ALAS. Проект SeeMe предполагает поточное производство недорогих МКА для наращивания орбитальной группировки в особые периоды политической обстановки. Это делает проект привлекательным для предприятий ОПК, несмотря на невысокую стоимость отдельного МКА.

За рубежом также ведутся интенсивные работы по созданию ПКА. Перспективный проект VULTURE предусматривает разработку ПКА SolarEagle для пятилетнего беспосадочного полёта на высотах до 30 тысячи метров с полезной нагрузкой до 400 кг. Принятый на вооружение ПКА Zephyr способен находиться на «атмосферной орбите» до 14 суток на высотах до 21 тысячи метров. При этом его стоимость не превышает 1/10 стоимости традиционного БПЛА типа Global Hawk и 1/1000 стоимости традиционных КА типа WorldView.

В НПО имени С. А. Лавочкина создан первый в стране опытный образец – псевдокосмический аппарат ЛА-251 «Аист». В настоящее время разрабатывается экспериментальный ПКА ЛА-252 «Аист». Сформирована концепция их применения для решения задач, связанных с непрерывным наблюдением локальных районов. Проведены испытания опытного образца, получены положительные отзывы заинтересованных потребителей. Конечно, существуют и проблемные вопросы, но они, как показывает зарубежный опыт, имеют реальное решение[6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Не смотря на значительное совершенствование характеристик малых спутников, остается проблема обеспечения приемлемого пространственного разрешения, для решения задач военной разведки. Это связано с физическими ограничениями габаритов оптических систем.

На данный момент не решенной является задача обеспечения эффективного управ-

ления группировками спутников. Исследования в данной области проводятся, но реализация таких решений затруднена из-за несовершенства существующих на данный момент алгоритмов управления и децентрализованности наземной инфраструктуры.

Также эксплуатация группировок малых космических аппаратов сопряжена с большими экономическими затратами на выведение в космос и содержание их в рабочем состоянии. А своевременное выведение МКА на орбиту, в замен утративших работоспособность, осложнено тем, что запуск малых спутников привязан к запуску больших космических аппаратов.

На данном этапе развития космических отраслей ведущих стран создание полноценных группировок малых космических аппаратов сопряжено со сложными инженерными и техническими задачами и в ближайшие десятилетия такие группировки не смогут вытеснить или полностью заменить большие космические аппараты дистанционного зондирования Земли.

Стоит отметить, что многие конструкторские бюро ведут поиск альтернатив малым космическим аппаратам. На данный момент существуют разработки псевдокосмических аппаратов, которые могут составить серьезную конкуренцию группировкам малых космических аппаратов.

Список литературы:

1. http://www.racurs.ru/wiki/index.php/Малые_оптические_спутники_ДЗЗ

2. *А.В. Горбунов.* «Малые космические аппараты – новые средства дистанционного зондирования земли из космоса». Труды НПП ВНИИЭМ», №3, 2009.

3. *Л.А. Макриденко, С.Н. Волков, А.В. Горбунов, Р.С. Салихов, В.П. Ходненко.* «КА «Канопус-В» № 1 – первый российский малый космический аппарат высокодетального дистанционного зондирования земли нового поколения» Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, №1, 2017.

4. *D.J. Kessler, N.L. Johnson, J.-C. Liou, M. Matney*. The Kessler Syndrome: Implications to Future Space Operations. 33rd Annual American Astronautical Society, Rocky Mountain Section, Guidance and Control Conference 6-10 February 2010, Breckinridge, Colorado.

5. *Л.А. Макриденко, И.В. Минаев, А.Ю. Потюпкин.* «Концептуальные особенности повышения целевой эффективности малых космических аппаратов дистанционного зондирования земли». Труды ВНИИЭМ. Том 141. №4 2014

6. *Клименко Н.Н*. «Малые космические аппараты: ожидания и реальность» журнал ВКС, №3/4 (88/89), 2016

УДК 620.22

российский индекс научного цитирования Science Index

ПОВЫШЕНИЕ МАССОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ СОТОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

ГУБАНОВ Ю.В. - старший оператор 3 научной роты КВ ВКС РФ

АО «Корпорация «Комета»

Губанов Ю.В.

Аннотация: *Данная работа посвящена поиску путей повышения массовой эффективности конструкций каркасов космических аппаратов с целью выведения на орбиту систем с максимальным полезным грузом. Одним из путей решения данной проблемы является применение клееных сотовых каркасов из композиционных материалов, а именно углепластиков.*

В рамках данной работы рассматриваются трехслойные конструкции, применяемые в производстве летательных аппаратов и ракетно-космической техники, их преимущества и недостатки. Описана технология изготовления деталей из углепластика, на основе экспериментальных данных обоснован выбор материала.

Ключевые слова: трехслойные конструкции, композиционный материал, углепластик, сотовый заполнитель.

INCREASE IN MASS EFFICIENCY OF DESIGNS OF AIRCRAFT, DUE TO APPLICATION OF THREE-LAYER CELLULAR ELEMENTS FROM COMPOSITE MATERIALS

GUBANOV Y.V.

JSC «Corporation «Kometa»», Moscow

Abstract: *This work is devoted to search of ways of increase in mass efficiency of designs of frameworks of spacecraft's for the purpose of removal into an orbit of systems with the maximum payload. One of solutions of this problem is application of glued cellular frameworks from composite materials, namely coal plastics. Within this work the three-layer designs applied in production of aircraft and the missile and space equipment, their advantage and shortcomings are considered. The manufacturing techniques of details from a coal plastic are described; on the basis of experimental data the material choice is reasonable.*

Keywords: sandwich structures, composite material, carbon fiber, honeycomb.

ВВЕДЕНИЕ

Среди различных материалов, используемых в производстве ЛА и РКТ, углепластики имеют наилучшие показатели удельной прочности, жесткости и термической стабильности (геометрических размеров). Анализ различных типов конструкций показывает, что наибольшую эффективность по массе позволяют получить панельные трехслойные сотовые конструкции, без использования стержневых металлических элементов Существенное повышение массовой эффективности таких конструкций позволяет получать применение в клееных сотовых каркасах из композиционных материалов, в частности углепластиков.

Дальнейшее освоение космического пространства и исследование атмосферы Земли невозможно без космических систем и комплексов, имеющих на борту научное и исследовательское оборудование для проведения многофункциональных экспериментов. Для возможности выведения на орбиту таких систем с максимальным полезным грузом необходимо стремиться увеличивать их массовое совершенство путем поиска новых конструкторско-технологических решений, именно этой проблеме посвящена данная работа.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДУЕМОЙ ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время на орбите Земли выполняет задачи международная космическая станция. Также ранее выполняла миссию орбитальная станция «МИР». По своей структуре данные орбитальные станции состояли из модулей. Основным элементом модулей, воспринимающим нагрузки, возникающие в процессе эксплуатации, является несущий каркас. Существует несколько конструктивно-компоновочных схем исполнения каркасов модулей, так, например, на спутнике связи «Ямал-100» разработки РКК «Энергия» имени С.П. Королева корпусные панели выполнены в виде трехслойных конструкций с несущими слоями из алюминиевого сплава Д-16АТ, а каркасы солнечных батарей, кронштейны антенной системы и балки усиления корпусных панелей также выполнены в виде трехслойных конструкций с [1]несущими слоями из композиционного материала углепластика. В качестве заполнителя в вышеперечисленных конструкциях использован сотовый запол-нитель из алюминиевой фольги.

2. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

Применение высокопрочных сталей, титановых и алюминиевых сплавов, а также полимерных композиционных материалов в традиционных подкрепленных конструкциях, работающих в условиях изгиба и сжатия, часто не приводит к снижению массы изделия. Это объясняется тем, что по условию прочности конструкции из этих материалов должны иметь очень малую толщину, однако при этом резко снижается момент инерции сечения пластины или оболочки, и конструкция имеет низкие критические напряжения потери устойчивости, значительно отличающиеся от предельно допустимых напряжений используемого материала. Этого недостатка не имеют трехслойные пластины и оболочки. В табл. 1 представлены характеристики основных конструкционных материалов, используемых для изготовления каркасов модулей.

Выбор углепластика для несущих слоев трехслойных панелей, обусловлен жест-

Таблица 1.
Характеристики основных конструкционных материалов

Материал	Модуль упругости, ГПа	КЛТР, 1/ К	Удельная прочность, км	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Титановые сплавы	110	$8{,}9\cdot10^{-6}$	7-10	16,76
Сталь	200	$15\cdot10^{-6}$	3,1	47
Стеклопластик	55	11-13	89-94	0,75
Углепластик	120-130	2,5	53-112	0,75

кими ограничениями по массе и термостабильности геометрии каркаса. Углепластик обладает уникальными удельными механическими характеристиками и знакопеременным околонулевым КЛТР. Именно эти показатели и послужили критериями к выбору материалов.

3. СВЕДЕНИЯ ОБ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЪЕКТАХ

3.1. Трехслойные конструкции

Впервые трехслойные конструкции были применены в 1845 году английским инженером Р. Стефенсоном при строительстве железнодорожного моста. В СССР конструкция такого типа впервые была предложена в 1928 году и разработана в Московском авиационном институте Зоншайном С.И. [1].

Принцип работы трехслойной конструкции при изгибе аналогичен принципу работы двутавровой балки. Один несущий слой воспринимает сжимающее усилие, другой растягивающее, как полки двутавра. Заполнитель соответствует стенке двутавровой балки, он воспринимает сдвигающие усилия, увеличивает прочность и жесткость конструкции за счет разнесения несущих слоев, но в отличие от стенки двутавра, обеспечивает сплошное опирание НС. Благодаря сплошному опиранию НС на заполнитель, значительно увеличивается их местная жесткость, вследствие чего нужная аэродинамическая поверхность конструкции сохраняется даже при значительных нагрузках. Эта особенность трехслойных конструкций позволяет применять НС малой толщины порядка 0,3 - 0,6 мм, что очень важно для снижения массы конструкции.

Изменяя высоту заполнителя при постоянной толщине несущих слоев, можно практически без изменения массы конструкции в широких пределах изменять ее жесткость (табл. 2) [2].

Несущие слои с заполнителем и элементами каркаса соединяют склеиванием, пайкой или сваркой. В зависимости от применяемых материалов трехслойные конструкции делятся на металлические, неметаллические и комбинированные. По структуре сечения трехслойные конструкции делятся на симметричные и несимметричные. Применение несимметричных конструкций связано не только с получением массовой эффективности, но и с функциональными свойствами.

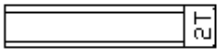
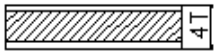
Наибольшее распространение в изделиях авиационно-космической техники получили клееные сотовые конструкции (КСК). Применение этого типа трехслойных конструкций обусловлено простотой технологии склеивания, и возможностью практически полностью автоматизировать процесс изготовления сотовых заполнителей. Кроме технологических преимуществ, КСК имеют наибольшую удельную жесткость и прочность в сравнении с другими типами трехслойных конструкций.

Сотовый заполнитель – это конструкция с регулярно повторяющимися ячейками правильной геометрической формы. Сущест-вует множество типов сотового заполнителя отличающихся формой ячеек или материалом, из которого они изготовлены.

В отечественной промышленности наиболее широкое распространение получил сотовый заполнитель с шестигранной ячейкой. В шестигранных сотах материал расположен наиболее экономично.

Таблица 2.

Увеличение жесткости конструкции без увеличения массы

Характеристика	Конструкция		
			
Относительное увеличение жесткости	1,0	7,4	39,0
Относительное увеличение массы	1,00	1,03	1,06

Такой заполнитель обладает более высоким пределом прочности по сравнению с другими типами сотовых заполнителей [3,4].

Конструкции с сотовым заполнителем воспринимают все виды нагрузок: растяжение, сжатие, изгиб, кручение. В большей степени эффективность таких конструкций проявляется при нагружении их двуосной или поперечной нагрузкой. Поэтому они могут быть использованы при изготовлении панелей, балок, стенок, оболочек различной формы. При этом следует учитывать, что эффективность применения КСК зависит от величины площади, которую они занимают. Считается, что применение данных конструкций начинает давать массовую эффективность, если их площадь составляет 1,5 – 2,0 м^2 и более. Это объясняется относительным возрастанием массы концевых элементов сотовых конструкций при уменьшении их площади. Кроме этого существуют и другие критерии целесообразности применения сотовых конструкций: так, если для плоских панелей выполняется условие (1), а для криволинейных выполняется условие (2), то применение сотовых конструкций целесообразно [4].

$$B/H > 50, \quad (1)$$

где

B – наименьший размер панели

H – толщина панели

$$R/H > 10 \text{ и } L/H > 50, \quad (2)$$

где

R – радиус кривизны оболочки

L – длина оболочки

H – толщина оболочки

3.2. Преимущества и недостатки сотовых клееных конструкций

Созданию и применению сотовых конструкций предшествовало большое число теоретических и экспериментальных исследований. В результате которых, а также опытов эксплуатации выявлены основные преимущества сотовых конструкций:

1) Малая масса по сравнению с традиционным типом пластин и оболочек за счет рационального использования свойств материалов несущих слоев и сотового заполнителя. Массовая эффективность сотовых конструкций тем выше, чем больше удельная жесткость материала. На рис.1 представлена массовая эффективность различных типов конструкций при продольном сжатии.

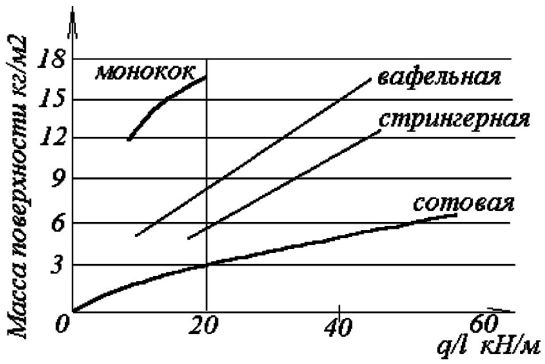


Рисунок 1.
Массовая эффективность различных типов конструкций при продольном сжатии

2) Оптимальная удельная прочность, за счет сплошного опирания несущих слоев на сотовый заполнитель, которое позволяет достичь при нагружении предела прочности материала на растяжение и сжатие без потери устойчивости.

3) Оптимальная удельная изгибная жесткость, из-за рационального использования упругих свойств материала несущих слоев, достигаемая путем их разнесения заполнителем на поверхности конструкции (таблица 3) [2].

4) Максимальная усталостная прочность при вибрации и акустических нагрузках, т.к. сплошное опирание несущих слоев на сотовый заполнитель посредством клея, имеющего относительно низкий модуль сдвига, устраняет проблему концентрации напряжений в соединении (рис. 2).

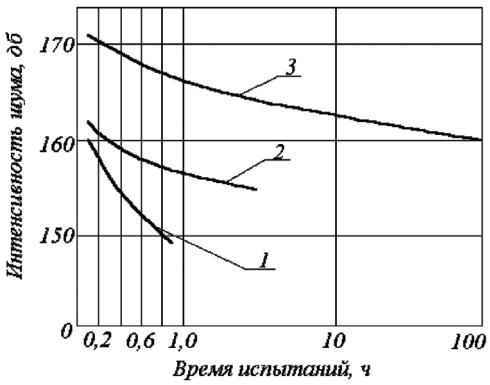


Рисунок 2.
Устойчивость различных типов конструкций акустической усталости: 1 - клепаная конструкция 2 - клееная дублированная конструкция 3 - клееная сотовая конструкция

Таблица 3.
Относительные изгибные жесткость и прочность различных вариантов конструкций одинаковой массы

№ п/п	Конструкция	Относительная прочность, %	Относительная жесткость, %
1	2	3	4
1	Трехслойная панель с сотовым заполнителем	100	100
2	Трехслойная панель, заполнитель - пенопласт	26	68
3	Трехслойная панель с коробчатым заполнителем	62	99
4	Панель, подкрепленная стрингерами	64	86
5	Сплошная клееная панель	3	17

5) Высокий коэффициент внутреннего поглощения энергии, а, следовательно, более высокие усталостные характеристики при циклических знакопеременных нагрузках, чем у подкрепленных конструкций, следствием чего является высокая сопротивляемость распространению усталостных трещин при циклических нагрузках. На рис. 3 показано сравнение скорости распространения усталостных трещин в листах сплошной клееной и конструкции с сотовым заполнителем.

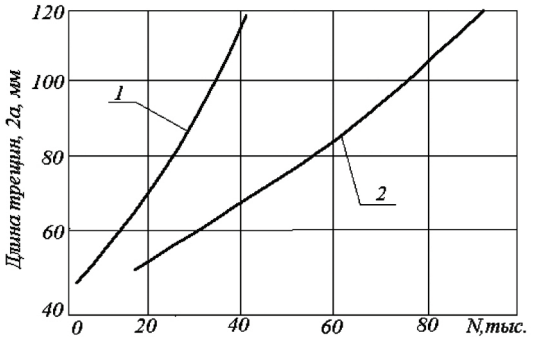


Рисунок 3.
Скорость распространения усталостных трещин:
1 - листовая клееная панель из сплава 7075-Т6 толщиной 0,97 мм, 610×1830 мм
2 - панель с сотовым заполнителем и обшивкой из сплава 7075-Т6 толщиной 0,51 мм, заполнитель высотой 12,7 мм, 305×915 мм.
Материалы имеют $\sigma_в$=635 МПа

6) Универсальные теплоизолирующие и звукоизолирующие свойства, благодаря тому, что для несущих слоев и заполнителя могут применяться материалы с различными тепло и звукоизолирующими свойствами.

7) Низкая деталеёмкость, что значительно упрощает разработку чертежно-конструкторской документации и снижает трудоемкость сборочных работ, например, в крыле управляемого снаряда «Метедор-61» при переходе на сотовую конструкцию число деталей уменьшилось с 1100 до 90 шт. [3].

8) Хорошая гладкая аэродинамическая поверхность за счет сплошного опирания на сотовый заполнитель.

Наряду с указанными преимуществами, клееные сотовые конструкции имеют и некоторые недостатки:

- снижение характеристик прочности в процессе эксплуатации клееных соединений за счет старения клея;
- жесткие требования к технологическому процессу и его стабильности;
- трудоемкость изготовления оснастки и ее низкая мобильность;
- отсутствие надежных методов нормирования допускаемых дефектов, особенно типа расслоений.

3.3. Перспектива применения современных ПКМ в КСК

Высокая массовая эффективность композиционных и особенно углепластиковых сотовых конструкций подтверждается результатами экспериментальных исследований. Несущая способность углепластиковых сотовых и подкрепленных конструкций на 30% выше по сравнению с эквивалентными металлическими вариантами равными по массе.

По массовой эффективности, конструкции различного типа можно расположить в такой последовательности:

- клееные сотовые конструкции с НС из углепластика;

- подкрепленные конструкции из углепластиков;

- клееные сотовые конструкции из алюминиевых сплавов и стеклопластиков;

- подкрепленные конструкции из алюминиевых сплавов.

Учитывая то, что выбор материалов для конструкции с заполнителем один из основных вопросов ее проектирования, то выбирают материалы для несущих слоев, заполнителя, элементов каркаса и их соединений с учетом условий эксплуатации изделия и факторов, действующих в процессе изготовления конструкции (нагрев конструкции, действие давления, термическая обработка и др.)

Поэтому для исследования была выбрана трехслойная конструкция с несущими слоями из углепластика КМ-4Э со схемой армирования $(0/90/0)_n$. В качестве заполнителя используются соты из алюминиевой фольги марки АМг-2Н толщиной 0,03 мм. Сторона ячейки 5мм.

3.4. Несущие слои трехслойных сотовых конструкций

Углепластик КМУ-4Э - полимерный композиционный материал на основе углеродной ленты ЭлурП-0.08 с активированной поверхностью и эпоксидного связующего марки ЭНФБ.

Формование НС производят при температуре 160±5 °С в течении 6 часов и давлении 80 – 100 кПа. Содержание наполнителя 60 – 68 % по объему и 65 – 70 % по массе.

Связующее ЭНФБ представляет собой смесь эпоксиноволачной смолы марки ЭН-6 ТУ 6-05-1585-77, фурфурилглицифилового эфира ТУ 6-09-08-409-75, анилино-фенолформальдегидной смолы СФ-341-А ГОСТ 18694-80, катализатора УП-605/3 ТУ 6-09-15-287-77 и спирто-ацетоновой смеси.

Физико-механические свойства полимера ЭНФБ:

- предел прочности при растяжении - 6,1 кгс/мм^2

- модуль упругости при растяжении - 360 кгс/мм^2

- относительное удлинение, % - 2,0

- предел прочности при сжатии - 16,5 кгс/мм^2

- предел прочности при сдвиге - 7,0 кгс/мм^2

- модуль сдвига - 130 кгс/мм^2.

Углеродная лента ЭЛУР-0.08 имеет следующие физико-механические характеристики:

- предел прочности при растяжении - 300 кгс/мм^2

- модуль упругости при растяжении - 20000 кгс/мм^2

- относительное удлинение - 1,5%

Углепластик КМУ-4Э предназначается для изготовления деталей конструкционного назначения, работающих при температуре до +150 °С. работа материала при температуре +150°С не более 500 часов.

По результатам испытаний и анализу действующих нагрузок и напряжений для изготовления несущих слоев выбрана схема армирования $(0/90/0)_n$. Свойства углепластика при нагружении вдоль слоя 0° КМУ-4Э с такой ориентацией слоев будут следующие:

$\sigma_в$ = 44 МПа

$E_в$ = 7300 МПа

ε_0 = 0,554%

Коэффициент линейного термического расширения КМУ-4Э со схемой армирования 0/90/0:

- вдоль направления 0° слоев: 1,0-1,5×10^{-6} 1/К;

- вдоль направления 90° слоев: 1,5-2,0×10^{-6} 1/К.

Кроме перечисленных свойств, особое значение при выборе материала для несущих слоев играет радиационная стойкость. При испытаниях углепластика КМУ-4Э установлено, что прочность материала после γ-облучения дозой до 6000 Мрад не изменяется [1,5].

Несущие слои углепластика облицованы тканью стеклянной Э2-62 ГОСТ 19907-74. Это необходимо по двум причинам: углепластиковый слой является очень чувствительным к различному рода механическим повреждениям, царапинам, выбоинам, и другим повреждениям, тем более при столь малой толщине обшивки (0,38 мм). Слой стеклоткани предохраняет от этих нежелательных воздействий. Кроме того, ткань Э2-62 выполняет защитную антикоррозионную функцию, так как при соединении алюминиевой фольги и углепластика возникает коррозион-

ная пара С – Al, которая создает условия для ухудшения качества клеевого шва в процессе эксплуатации.

3.5. Заполнитель сотовый

Конструкция с заполнителем представляет собой трехслойную панель, состоящую из двух несущих слоев из углепластика КМУ-4Э, заполнителя из алюминиевой фольги, расположенного между ними и элементов окантовок. Основная роль сотового заполнителя воспринимать поперечные силы при изгибе трехслойной конструкции и обеспечивать совместную работу и устойчивость несущих слоев. Способность заполнителя воспринимать нагрузку в плоскости несущих слоев зависит от конструкции заполнителя и его жесткостных характеристик. В данной конструкции трехслойных панелей используется сотовый заполнитель с ячейками шестигранной формы, которые обеспечивают высокую устойчивость и сравнительно простоту в изготовлении. Материалом для его изготовления служит алюминиевая фольга АМГ-2Н, ее применение обусловлено более высокой прочностью при повышенных и нормальных температурах эксплуатации, чем у других марок. Достаточно высокая термостойкость фольги АМГ-2Н позволяет применять ее для изготовления трехслойных конструкций, работающих при температуре до 200 °С.

Для изготовления трехслойных панелей и соединительных элементов был выбран заполнитель с малой удельной массой. Выбран заполнитель с высотой Н=20 мм и толщиной стенки d=0,03 мм, сторона ячейки а=5 мм. Такой заполнитель согласно ОСТ 100728-75 [6] имеет следующие прочностные параметры:

$$\sigma_{сж} = 7 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{отр} = 25 \text{ МПа}.$$

Сдвиговые характеристики:

$$\tau_{xz} = 4 \text{ МПа};$$

$$\tau_{yz} = 3 \text{ МПа}.$$

Модуль сдвига заполнителя:

$$G_{xz} = 13 \text{ МПа};$$

$$G_{yz} = 8 \text{ МПа}.$$

Плотность:

$$\gamma = 0{,}027 \times 10^{-3} \text{кг/см}^3.$$

Заполнитель поставляется в виде блоков или пакетов с габаритами 600×1500±8 мм.

Для изготовления способом вакуумного склеивания и обеспечения уравнивания давления в процессе эксплуатации в условиях космического пространства в заполнителе необходимо иметь перфорационные отверстия. Выбранный метод формования основан на применении вакуумной оснастки, и перфорация способствует созданию разряжения между несущими слоями и склеиванию их с заполнителем. Отсутствие перфорации привело бы к созданию так называемого противодавления со стороны воздуха находящегося в сотовом заполнителе, что не позволило бы достигнуть высокого качества склеивания при данном методе формования.

Кроме этого, дальнейшая сборка каркаса предусматривает вакуумирование всей конструкции через штуцеры, установленные на панелях.

В самолетостроении сотовый заполнитель выполняется без перфорации в связи с необходимостью защиты внутреннего пространства между обшивками от попадания влаги и других компонентов, чтобы избежать коррозионного разрушения клеевой прослойки. Конструкцию стараются выполнить по возможности герметичной.

Условия эксплуатации в космическом пространстве диктуют обратную закономерность. Необходимо осуществить «выравнивание» давления в конструкции и окружающем пространстве. Это необходимо из-за требований к конструкции во время работы, так как могут возникнуть дополнительные внутренние напряжения, стремящиеся нарушить равновесие склеенной панели и проводящие к искривлению и короблению конструкции.

3.6. Клеи для формования сотовых конструкций

Выбор клея при проектировании определенного вида клеевого соединения возможен только при подробном анализе конкретных условий работы соединения в конструкции и учете физико-механических и технологических свойств клея.

Существует много марок клеев для соединения сотовых конструкций. Клеи применяются в жидком состоянии (ВК-27, ВК-25), в виде пленок (ВК-24, ВК-36 РТ-140, ВК-41, ВК-31), а также в виде клеевых расплавов (ВК-31, ВК-36 РТ-140, ВК-41), наносимых на торцы сотового заполнителя. Пленочные клеи обладают высокой технологичностью и содержат минимальный процент выделяющихся при отверждении летучих веществ 0,5-2%. Для склеивания сотовых конструкций был выбран клей ВК-36 РТ-140, который по сравнению со всеми остальными имеет самую высокую рабочую температуру (Т= –60 +150°С) и максимальную прочность. К примеру клей ВК-31 имеет Т= –60 +80°С [7].

Прочность соединения несущих слоев и сотового заполнителя при соблюдении режима склеивания, в основном зависит от размера ячейки и толщины фольги заполнителя.

Блоки сотового заполнителя между собой и закладными элементами склеивают вспенивающимся пастообразными и пленочными клеями. Наибольшее применение благодаря высокой технологичности вспенивающиеся клеи и пастообразные применяют для местного усиления сотового заполнителя. Для склеивания сотового заполнителя между собой и элементами конструкции выбран вспенивающийся клей ВКВ-3. По сравнению с остальными вспенивающимися клеями он имеет наибольшую рабочую температуру ($Т_{ВКВ-3}$= –60 +150°С, $Т_{ВКВ-2}$= –60 +80°С). В таблице 4 представлены некоторые физико-механические и технологические характеристики некоторых клеев [7].

Таблица 4.
Физико-механические и технологические характеристики клеев

	ВК-36 РТ-140	ВКВ-3	ВК-9
Состав	неармированная композиция на основе эпоксидных смол (модифицированных)	на основе модифицированной эпоксидной смолы	ЭД-20 – 60%, ПО-300 – 40±0,6%
Внешний вид	светло-серый	светло-коричневый	вязкая масса
Назначение	склеивание сотовых конструкций с металлическими АМг-2Н и неметалл. заполнителями, алюминиевых сплавов и композитов	для склеивания СЗ между собой и элементами конструкции	Склеивание металлов, стеклопластиков, сотовых конструкций между собой и элементами конструкции
Область применения, Т,°С	- 60° … + 150°	- 60° … + 150°	до 150°
Условия отверждения Т,°С Р, (кгс/см^2) τ,ч	175±5°С 2±0,2 кг/см^2 3 ≤ 1 °/мин	175±5°С - 3 ≤ 1-2 °/мин	20°С 0,1 – 1,0 кг/см^2 24
Предел прочности при сдвиге, МПа	- 60 – 35МПа +150 – 25МПа	+20 – 2МПа	–
Предел прочности при неравномерном отрыве НС от СЗ, МПа	- 60 - 8 – 9 МПа +150 - 2 – 4,5МПа	20 – 3,5 МПа +150 – 1,5 МПа	–
Содержание летучих не более, %	1%	2%	0,1 – 0,5%
Условия хранения	1-5°С 6 мес. 15-25°С 3 мес. ρ ≤ 80%	0-15°С 6 мес. 20±2°С 4 мес.	–
Степень вспенивания	–	1,5 – 3,0	–

3.7. Технология изготовления деталей каркаса из углепластика

Выбор технологии изготовления деталей из углепластика зависит от требований, предъявляемых к конструкциям, технологической оснащенности производства экономической составляющей и т.д. Принято выделять технологии прямой выкладки, к которым относятся контактное формование, автоматизированная или ручная выкладка, формование с помощью пуансона (как разновидность – с помощью гибкого пуансона – вакуумная инфузия), намотка и некоторые другие.

Для изготовления крупногабаритной конструкции каркаса целесообразно использовать технологию вакуумной инфузии, которая сочетает в себе высокое качество изделий и относительно невысокую стоимость производства.

Суть метода заключается в использовании вакуумного мешка, в качестве гибкого пуансона. За счет вакуума внутри мешка атмосферное давление равномерно распределяет усилие на пакет, что приводит к низкому процентному содержанию смолы и, как следствие, высокому качеству изделия. Схема вакуумной инфузии представлена на рисунке 4.

4. ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ

4.1. Подготовка исходных данных

Целью исследования был выбор углепластикового материала для несущих слоев, типа сотового заполнителя для трехслойных конструкций каркаса летательного аппарата, обеспечивающих работоспособность конструкции при минимуме массы и газовыделений.

Для достижения этой цели были определены характеристики прочности и жесткости различных структур армирования углепластикового материала и оценена удельная масса.

Исследованиям подвергали углепластики на основе углеродных наполнителей:

- углеродная лента ЭлурП-0.08;
- углеродная ткань УТ-900-2.5А;

и связующего:

- ЭНФБ;
- пленочный клей ВК-36 РТ-140.

Для обеспечения минимальных уровней газовыделения и защиты от воздействия факторов космического пространства и разделения коррозионной поры Al-C на две поверхности углепластика наформовывали стеклоткань Э2-62.

Образцы для испытаний вырезали из листов углепластика размером 350×350мм отформованных за один режим термообработки.

Были испытаны углепластики со следующими структурами пакета:

1. Э2-62/ВК-36 РТ-140/УТ-900-2.5А/ВК-36 РТ-140/ЭЛУР(0) + ЭНФБ
2. Э2-62/ВК-36 РТ-140/УТ-900-2.5А/ВК-36 РТ-140/ УТ-900-2.5А/ВК-36 РТ-140
3. Э2-62/ВК-36РТ-140/УТ-900-2.5А/ ЭЛУР(0) + ЭНФБ
4. Э2-62/ВК-36 РТ-140/УТ-900-2.5А/ ВК-36 РТ-140
5. Э2-62/ ЭЛУР(0)/90/0 + ЭНФБ
6. ЭЛУР /(0/90)/ + ЭНФБ.

Образцы для испытания на растяжение вырезали в двух направлениях параллельно (//) и ортогонально (⊥) углу армирования «0°». Образцы изготавливались в соответствии с

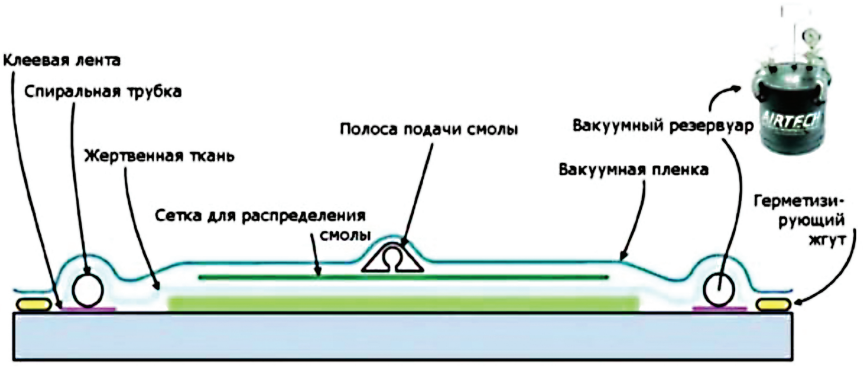


Рисунок 4.
Схема вакуумной инфузии

ГОСТ 25.601-80. Для исследования газовыделений были взяты трехслойные образцы размером 150×150 мм с обшивками из углепластика толщиной 1,2 мм и сотовым заполнителем из алюминиевой фольги АМг-2Н и полимерной бумаги ПСП-1 высотой 10 мм.

4.2. Испытания

Испытания на растяжение проводились в соответствии с ГОСТ 25.601-80 на испытательной машине FP-100/1 с гидравлическими захватами. Деформацию образцов при нагружении определяли при помощи тензосопротивлений и измерительного комплекта АИД-4М. Результаты испытаний представлены в таблице 5. Структура пакетов 2, 4, 6 симметричная, поэтому характеристики прочности и жесткости материалов даны в одном направлении.

Испытания на газовыделения проводились в климатической камере по следующему режиму:

- вакуум $1 \cdot 10^{-6}$ мм. рт.ст.
- температура +50 ± 1°С

Температурный режим обеспечивается при помощи нагревателей расположенных с двух сторон образца. Образец из климатической камеры с заданной относительной влажностью воздуха порядка 50 % взвешивали на аналитических весах и помещали на подвеске весоизмерительного устройства расположенного в вакуумной камере. Камеру вакуумировали до давления порядка $1 \cdot 10^{-2}$ мм. рт.ст., регистрировали начальное показание весоизмерительного устройства, после чего вакуум повышали до давления порядка $1 \cdot 10^{-6}$ мм. рт.ст. и в процессе вакуумирования непрерывно регистрировали изменения массы образца.

Результаты испытаний образцов на газовыделения представлены в таблице 6.

При испытаниях армированных углепластиков на одноосное растяжение определяется разрушающее напряжение σ_x и модуль упругости E_x (где x – продольная ось образца).

Напряжения в направлении продольной оси образца определяются по формуле:

$$\sigma_x = P_{разр}/F ,$$

где F – площадь поперечного сечения рабочей части образца перед испытанием

$P_{разр}$ – усилие, разрушающее образец

Модуль упругости определяется по формуле:

$$E_x^+ = \sigma_x^+/\varepsilon_x^+ = (\Delta P/F)\cdot(1/\varepsilon_x^+) , \text{ где}$$

ΔP – приращение нагрузки;

F – площадь поперечного сечения рабочей части образца;

ε_x^+ – относительная деформация, измеряемая тензодатчиками сопротивление в рабочей части образца при изменении нагрузки на ΔP.

$$\varepsilon_x^+ = \Delta l / l ,$$

где l – база тензорезистора;

Δl – деформация на базе l при изменении нагрузки на ΔP[8].

Таким образом, исходя из анализа физико-механических характеристик исходных материалов и результатов испытаний для несущих слоев трехслойных панелей каркаса конструкции, наиболее подходящая следующая схема армирования: Э2-62/ЭлурП(0)/90/0 + ЭНФБ, имеющая максимальное разрушающее напряжение $S_{ср}$=54,7кг/мм^2. Для несущих слоев трехслойных соединительных элементов каркаса – материал со схемой армирования: Э2-62/ВК-36 РТ-140/УТ-900-2.5А/ ВК-36 РТ-140/ УТ-900-2.5А/ВК-36 РТ-140 у которого разрушающее напряжение $S_{ср}$=53,8кг/мм^2. В качестве заполнителя выбран сотовый заполнитель из алюминиевой фольги АМг-2Н, у которого газовыделения составляет 0.9%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании литературных данных даны обзор и классификация трехслойных конструкций, применяемых в ЛА и их составляющих элементов: несущих слоев и заполнителей. Приведены основные требования к материалам и критерии их эффективности. Проанализирована и оценена весовая эффективность применения углепластиковых трехслойных панелей и обшивок из материала КМУ-4Э.

Экспериментальным путем обоснованы выборы материалов для несущих слоев и заполнителя. Представлены экспериментальные данные по определению характеристик несущих слоев из углепластика КМУ-4Э в зависимости от схемы армирования.

В результате экспериментальных исследо-

Таблица 5.

Результаты испытаний углепластиков с различной структурой пакета на растяжение

№ п/п	Структура	Напр. исп.	Толщина, мм	Ширина, мм	Разруш. нагр., кг	Разр. напр., кг/мм^2	Модуль Упр. кг/мм^2	Плотность кг/м^3
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Э2-62/ВК-/УТ/ВК/ ЭлурП(0) + ЭНФБ	//	0,72 0,73 0,73 0,72 0,74 0,72 0,74 0,72	20,35 20,40 20,50 20,45 20,30 20,40 20,40 20,50	725 700 712 637 675 660 670 670	49,5 47,0 47,6 43,3 44,9 44,9 44,3 45,4	7800	1550
		$\sigma_{ср}$=45,9						
		⊥	0,76 0,76 0,68 0,76 0,67 0,74 0,69 0,66	20,2 20,2 20,2 20,3 20,3 20,3 20,2 20,3	565 600 550 620 555 645 610 575	36,8 39,1 40,0 40,2 40,8 43,5 43,8 42,9	4600	
		$\sigma_{ср}$=40,9						
2	Э2-62 /ВК/УТ/ВК/ УТ/ВК		0,63 0,62 0,62 0,62 0,63 0,61 0,61 0,64 0,61	20,2 20,3 20,2 20,15 20,2 20,2 20,25 20,2 20,2	620 530 780 755 750 700 605 685 660	48,7 42,1 62,3 60,4 58,9 56,8 49,0 53,0 53,6	5650	1520
		$\sigma_{ср}$=53,8						
3	Э2-62 /ВК/УТ/ ЭлурП(0) + ЭНФБ	//	0,47 0,53 0,48 0,48 0,49 0,53 0,53 0,55	20,5 20,5 20,5 20,2 20,4 20,3 20,3 20,4	480 510 410 410 490 475 490 487	49,8 46,7 41,7 42,3 49,0 44,1 45,5 43,4	8100	1500
		$\sigma_{ср}$=45,3						
		⊥	0,48 0,51 0,55 0,51 0,55 0,45 0,49 0,54	20,1 20,0 20,2 20,25 20,25 20,2 20,3 20,2	285 300 340 270 350 297 330 390	29,5 29,4 34,9 24,3 31,4 32,7 33,2 35,8	3700	
		$\sigma_{ср}$=31,2						
4	Э2-62/ВК/ УТ/ ВК		0,37 0,42 0,40 0,42 0,44 0,37 0,41 0,40 0,40	20,2 20,15 20,1 20,4 20,3 20,4 20,45 20,1 20,5	235 280 305 305 280 290 275 280 230	31,4 33,1 37,9 35,6 31,3 38,4 32,8 34,8 28,1	4200	1470
		$\sigma_{ср}$=33,7						

Продолжение таблицы 5.
Результаты испытаний углепластиков с различной структурой пакета на растяжение

№ п/п	Структура	Напр. исп.	Толщина, мм	Ширина, мм	Разруш. нагр., кг	Разр. напр., кг/мм^2	Модуль Упр. кг/мм^2	Плотность кг/м^3
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	Э2-62/ ЭлурП(0)/90 /0 + ЭНФБ	//	0,46 0,45 0,43 0,44 0,42	20,2 20,15 20,15 20,2 20,2	480 450 520 520 460	51,66 49,60 58,70 59,10 54,20	10100	1470
		$\sigma_{ср}$=54,7						
		⊥	0,43 0,44 0,45 0,44 0,44 0,47	20,4 20,45 20,35 20,6 20,45 20,4	310 310 310 310 260 240	35,3 34,5 33,9 34,2 28,8 25,0	5300	
		$\sigma_{ср}$=31,8						
6	ЭлурП /(0/90)/ + ЭНФБ.		0,29 0,27 0,28 0,27 0,28	20,55 20,5 20,5 20,35 20,0	250 220 220 235 230	41,9 39,8 38,2 42,8 39,9	9000	1520
		$\sigma_{ср}$=40,5						

Таблица 6.
Результаты исследований трехслойных образцов на газовыделение

Тип сотового заполнителя	Температура испытаний, °С	Степень вакуума мм.рт.ст.	Длительность выдержки, ч	Газо-выделение, %
Алюминиевая фольга АМг-2Н	+50	$1 \cdot 10^{-6}$	8	0,9
ПСП-1	+50	$1 \cdot 10^{-6}$	8	3,5

ваний, выявлено, что несущая способность углепластиковых сотовых и подкрепленных конструкций на 30% выше по сравнению с эквивалентными металлическими вариантами равными по массе.

Повышение массового совершенства конструкций за счет широкого применения современных высокопрочных и высокомодульных композиционных материалов является одним из наиболее перспективных путей развития производства летательных аппаратов и ракетно-космической техники. В будущем, при изготовлении приборных каркасов, можно использовать гибридные композиционные материалы в качестве материала для несущих слоев, в качестве сотового заполнителя не алюминиевую фольгу, а заполнители на основе полимерных бумаг (типа Nomex).

Список литературы:

1. *Берсудский В.Е., Крысин В.Н.* Производство сотовых конструкций. – М.: Машиностроение, 1966. - 276 с.
2. *Берсудский В.Е., Крысин В.Н.* Технология изготовления сотовых авиационных конструкций. – М.: Машиностроение, 1968. – 325 с.
3. *Буланов И.М., Воробей В.В.* Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: Учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.
4. *Буланов И.М. Калиничев В.А.* Применение ГОСТов ЕСКД в курсовом и дипломном проектировании. – М.: МГТУ, 1986
5. Задачи и примеры по проектированию технологических процессов. Под ред. Делимбетовой Л.И. ,Фролова А.В. – М.: МГТУ, 1989. – 240 с.
6. Отраслевой стандарт «Заполнители сотовые клееные» ОСТ 100728-75, ОСТ 100729-75
7. *Крысин В.Н.* Слоистые клееные конструкции в самолетостроении. М.: Машиностроение, 1980. – 228 с.
8. *Тарнопольский Ю.В., Линцис Т.Я.* Методы статических испытаний армированных пластиков. – М.: Химия, 1981. – 347 с.

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@mail.ru

Аннотация: *Рассмотрена орбитальная группировка ДЗЗ различного назначения с различением концепций. Установлена предполагаемая классификация космических аппаратов и порядок их использования. Подтверждается совпадение с мировыми тенденциями.*

Ключевые слова: объективы КА и их классификация, сроки съемки, периодичность, назначение.

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^2 - 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 15х15 до 60х60 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».

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:

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

где Δ - разрешающая способность, D – диаметр объектива, H – высота орбиты.

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

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:

$$T \sim 1/(N \cdot H2), \quad (3)$$

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

Отсюда

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

где $Σ – 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.

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

Разделив эффективность на суммарную стоимость группировки, получаем:

$$E/\$\Sigma \sim 1/(\Delta \cdot T2) \cdot (T \cdot \Delta 3)/H = \Delta 2/(T \cdot H) \quad (6)$$

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 растет с ростом высоты орбиты) в данном случае нас интересует полоса захвата, которая также растет 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 съемочной 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.

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

Удельная эффективность группировки таким образом оказывается

$$E/\$\Sigma \sim 1/(\Delta 2 \cdot T) \cdot (T \cdot \Delta 3)/H2 = \Delta/H2 \quad (8)$$

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 обеспечи-

вают поле зрения не более 80, 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.

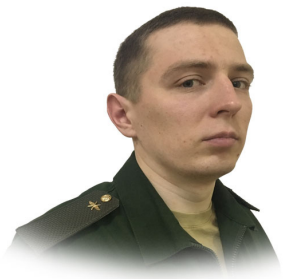
УДК 658.512.22

РАЗВИТИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА МАТРИЧНОЙ ДИАГРАММЫ ИНФОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРЕДМЕТНОЙ ЗАДАЧИ

ШИРЧКОВ Д.А. - оператор 3 научной роты КВ ВКС РФ

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

E-mail: dmitriy_shirchkov@mail.ru



Ширчков Д.А.

Аннотация: *В статье рассмотрен процесс формирования матричной диаграммы инфологической модели предметной задачи, исследован традиционный процесс её анализа. Выяснено, что метод анализа матричной диаграммы инфологической модели предметной задачи нуждается в развитии. Для улучшения качества проводимого анализа уточнено множество критериев, определяющих правильность построения матричной диаграммы.*

Ключевые слова: методология автоматизации интеллектуального труда (МАИТ), инфологическая модель предметной задачи (ИЛМ ПЗ), матричная диаграмма (МД), элементарный предметный доступ (ЭПД), элементарная предметная манипуляция (ЭПМ).

DEVELOPMENT OF A METHOD OF THE ANALYSIS OF THE MATRIX DIAGRAM OF INFOLOGICAL MODEL OF AN OBJECT TASK

SHIRCHKOV D.A.

PJSC «Krasnogorsky plant him S.A. Zvereva», Krasnogorsk

E-mail: dmitriy_shirchkov@mail.ru

Abstract: *In the article process of formation of the matrix chart of infological model of an object task is considered, traditional process of its analysis is investigated. It is found out that the method of the analysis of the matrix chart of infological model of an object task needs development. For improvement of quality of the carried-out analysis the set of the criteria defining a regularity of creation of matrix diagram is specified.*

Keywords: methodology of Automation of Intellectual Work (MAIW), infological model of an object task (ILM OT), matrix diagram (MD), partial object access (POA), partial object manipulation (POM).

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время практически любая организация в условиях рыночной экономики имеет систему управления интеллектуальными ресурсами. Качественное функционирование таких систем зависит от того насколько хорошо они спроектированы [1].

На кафедре «Информационные технологии и вычислительные системы» ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН» разработана методология автоматизации интеллектуального труда, которая учитывает промышленный способ создания прикладных автоматизированных систем. В соответствии с МАИТ этап проектирования рассматривается как комплексный и включает: концептуальное моделирование (моделирование системы знаний); инфологическое моделирование.

Инфологическое моделирование – это завершающий этап проектирования прикладной автоматизированной системы. Результатом процесса инфологического моделирования является комплекс инфологических моделей предметных задач, инвариантных к программно-техническим средствам [2]. На этапе инфологического моделирования предметной задачи (ПЗ) формируются различные диаграммы. Одной из них является матричная диаграмма инфологической модели ПЗ, которая увязывает между собой информационную структуру задачи и алгоритм решения задачи на данной структуре. После того как матричная диаграмма сформирована, необходимо проверить ее на правильность построения.

ОСОБЕННОСТИ ЭТАПОВ ФОРМИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА МАТРИЧНОЙ ДИАГРАММЫ ИНФОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРЕДМЕТНОЙ ЗАДАЧИ

Для того чтобы учесть все особенности анализа матричной диаграммы инфологической модели необходимо рассмотреть процесс ее формирования.

Исходной информацией для матричной диаграммы ИЛМ является матричная диаграмма концептуальной модели [3]. Фрагмент матричной диаграммы концептуальной модели приведен на рис. 1.

Из нее берётся содержание элементарных предметных манипуляций и структурные свойства промежуточных предметных манипуляций (таблица 1 и таблица 2).

Таблица 1.
Элементы элементарной предметной манипуляции

Обозначение	Роль ИСЕ-ИА
.	Аргумент по умолчанию
+	Аргумент
*	Функция

Таблица 2.
Структурные свойства промежуточных предметных манипуляций

Обозначение	Структурное свойство действия
[	Заголовок последовательности
]	Последнее действие последовательности
{	Заголовок цикла
!	Тело цикла
$	Функция цикла
}	Конец цикла
?	Заголовок альтернативы
/	Альтернатива
#	Функция альтернативы

Вертикальный заголовок дополняется заголовками элементарных предметных доступов, относящимися к определенной элементарной предметной манипуляции. Код заголовка элементарного предметного доступа (ЭПД) состоит из кода элементарной предметной манипуляции (ЭПМ), к которой он относится, и признака предметного досту-

	Узел		**Сборочная единица**				**Деталь**		
	R1.3	**R2.1**	**R1.1**	**R2.3**	**R3.1**	**R1.2**	**R2.2**	**R3.4**	**R5.1**
…									
сб.1	**.**	+	**.**	+		**.**	**.**	+	*
…									

Рисунок 1.
Фрагмент матричной диаграммы концептуальной модели

	A3.K1.7/M5.K1.7								
	C5.O7.1		C5.O7.2				C5.O7.4		
	A5.R1.3	A5.R2.1	A5.R1.1	A5.R2.3	A5.R3.1	A5.R1.2	A5.R2.2	A5.R3.4	A5.R5.1
…									
c61.2	@	r							
c61.2			@	r		r			
c61.2							@	r	
c61.1	.	+	.	+		.	.	+	*
c61.2							@		w
…									

Рисунок 2.
Фрагмент матричной диаграммы инфологической модели

па (ПД) – «.2». Горизонтальный заголовок МД ИЛМ должен быть сформирован в соответствии с инфологической структурой на именованных структурных единицах (ИСЕ). Для каждой именованной структурной единицы типа «информационный атрибут» (ИА) с ролями «аргумент по умолчанию» («.»), «аргумент» («+»), «функция» («*»), должна быть выставлена соответствующая ИСЕ-ИА с ролью «ключевой» («@»), «считываемый» («r») или «записываемый» («w»). Фрагмент матричной диаграммы инфологической модели представлен на рис. 2.

При анализе матричной диаграммы ИЛМ на правильность предполагается, что обозначение содержания элементарных предметных манипуляций и структурные свойства промежуточных манипуляций, взятые из концептуальной модели, заполнены корректно. Считается, что входная информация для построения инфологической модели заведомо верна.

На сегодняшний день традиционный процесс анализа матричной диаграммы инфологической модели содержит следующие проверки:

проверку выставления в соответствие именованным структурным единицам типа «информационный атрибут» с ролью «считываемый», именованных структурных единиц типа «информационный атрибут» с ролью «аргумент» [2];

проверку выставления в соответствие именованным структурным единицам типа «информационный атрибут» с ролью «записываемый», именованных структурных единиц типа «информационный атрибут» с ролью «функция» [2].

Таким образом, на данный момент анализ матричной диаграммы инфологической модели ПЗ заключается в проведении проверок двух типов. Для того чтобы утверждать о правильности построения всей матричной диаграммы ИЛМ ПЗ, положительных результатов данных проверок недостаточно. Поэтому метод анализа матричной диаграммы ИЛМ ПЗ нуждается в развитии. Для улучшения качества проводимого анализа необходимо уточнить множество критериев, определяющих правильность построения МД.

КРИТЕРИИ ДЛЯ АНАЛИЗА МАТРИЧНОЙ ДИАГРАММЫ ИНФОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРЕДМЕТНОЙ ЗАДАЧИ

Для анализа матричной диаграммы были выявлены следующие критерии проверки:

- корректность заполнения горизонтального заголовка – правильность формирования кодов на каждом уровне заголовка;
- корректность содержания элементарных предметных доступов - наличие и правильность обозначений ролей ИСЕ типа «информационный атрибут»;
- корректность вертикального заголовка – правильность формирования фрагментов заголовка в виде последовательностей кодов элементарных предметных доступов и элементарной предметной манипуляции.

При проверке матричной диаграммы на правильность в соответствии с выявленными критериями принимаются следующие допущения:

1) обозначение содержания элементарных предметных манипуляций и структурные свойства промежуточных манипуляций,

взятые из матричной диаграммы концептуальной модели, корректны;

2) доступ к именованной структурной единице типа информационная сущность (таблице) осуществляется по одному ключу (именованной структурной единице типа информационный атрибут). В будущем планируется рассматривать случаи, когда у таблицы может быть несколько ключей.

Горизонтальный заголовок должен быть сформирован в соответствии с инфологической структурой на ИСЕ. Поскольку инфологическая структура на ИСЕ – это многоуровневая конструкция, на каждом уровне которой находятся ИСЕ разного типа, то горизонтальный заголовок МД также является многоуровневым. Поэтому проверка корректности горизонтального заголовка заключается в проверке правильности обозначения кодов на каждом уровне.

Проверка по критерию корректности содержания элементарных предметных доступов заключается в проверке соблюдения следующих требований:

- если в строке, отражающей содержание элементарной предметной манипуляции встречается ИСЕ-«ИА» с ролью «аргумент» («+»), то в элементарных предметных доступах, относящихся к данной ЭПМ, для нее должна быть выставлена только одна ИСЕ-«ИА» с ролью «считываемый» («r»);

- если в строке, отражающей содержание элементарной предметной манипуляции встречается ИСЕ-«ИА» с ролью «аргумент по умолчанию» («.»), являющаяся кодом объекта, то в элементарных предметных доступах, относящихся к данной ЭПМ, для нее должна быть выставлена только одна ИСЕ-«ИА» с ролью «ключевой»(«@»);

- если в строке, отражающей содержание элементарной предметной манипуляции встречается ИСЕ-«ИА» с ролью «аргумент по умолчанию» («.»), не являющаяся кодом объекта, то в элементарных предметных доступах, относящихся к данной ЭПМ, для нее должна быть выставлена только одна ИСЕ-«ИА» с ролью «ключевой»(«r»);

- если в строке, отражающей содержание элементарной предметной манипуляции встречается ИСЕ-«ИА» с ролью «функция» («*»), то в элементарном предметном доступе, относящемся к данной ЭПМ, для нее должна быть выставлена ИСЕ-«ИА» с ролью «записываемый»(«w»);

- в элементарном предметном доступе не должно быть именованных структурных единиц типа информационный атрибут с ролями «ключевой», «считываемый», «записываемый», если в элементарной предметной манипуляции для них нет соответствующих ИСЕ-«ИА» с ролями «аргумент по умолчанию», «аргумент», «функция»;

- если строка отражает содержание элементарного ПД, то количество ИСЕ - «ИА» с ролью «ключевой» («@») в данной строке должно быть равно единице;

- для строки, отражающей содержание элементарного ПД, необходимо, чтобы для каждой структурной единицы типа «информационный атрибут» с ролью «считываемый» была обозначена ИСЕ-«ИА» с ролью «ключевой»;

- для строки, отражающей содержание элементарного ПД, необходимо, чтобы для каждой структурной единицы типа «информационный атрибут» с ролью «записываемый» была обозначена ИСЕ-«ИА» с ролью «ключевой»;

- в строке, отражающей содержание элементарного ПД, роль «ключевой» устанавливается только для ИСЕ-«ИА» с наименованием, начинающимся со слова «Код»;

Проверка по критерию корректности вертикального заголовка заключается в проверке соблюдения следующих требований:

- для элементарного предметного доступа код заголовка строки должен соответствовать шаблону $< al >< nd >< no >.1$, где *al* – буквенный идентификатор, *nd* – номер уровня разложения, *no* – порядковый номер действия на данном уровне разложения;

- для элементарной предметной манипуляции код заголовка строки должен соответствовать шаблону $< al >< nd >< no >.2$;

- количество заголовков, отражающих элементарные предметные доступы для опреде-

ленной элементарной предметной манипуляции складывается из количества ИСЕ-«ИА» с ролью «аргумент по умолчанию» и наименованием «Код» в этой ЭПМ и одного заголовка находящего на уровень ниже данной ЭПМ.

- фрагменты заголовков элементарных предметных доступов определенной элементарной предметной манипуляции должны совпадать с фрагментом заголовка данной ЭПМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен процесс формирования матричной диаграммы инфологической модели предметной задачи, исследован традиционный процесс её анализа. В ходе исследования было определено, что на данный момент анализ матричной диаграммы инфологической модели предметной задачи заключается в проведении проверок двух типов. Для того чтобы утверждать о правильности построения всей матричной диаграммы ИЛМ ПЗ, положительных результатов данных проверок было недостаточно. Поэтому метод анализа матричной диаграммы ИЛМ ПЗ нуждался в развитии.

Для улучшения качества проводимого анализа уточнено множество критериев, определяющих правильность построения МД. Применение углубленного анализа матричной диаграммы на этапе проектирования позволит повысить качество создаваемых инфологических моделей предметных задач.

Список литературы:

1.Волкова Г.Д. Методология автоматизации проектно-конструкторской деятельности в машиностроении. :Учеб. пос. -М.: МГТУ»СТАНКИН», 2000 - 81с.

2.Волкова Г.Д., Новоселова О.В., Семячкова Е.Г. Проектирование прикладных автоматизированных систем в машиностроении: Учебное пособие.-М:МГТУ»СТАНКИН»,2002.-162с

3.Волкова Г.Д. Концептуальное моделирование предметных задач в машиностроении: Уч.пос. -М.:МГТУ»СТАНКИН», 2000.-98 с.

УДК 622.232.8:621.384.3.01:531.714.2

российский индекс научного цитирования Science Index

МЕТОДЫ СОВМЕЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ КАНАЛОВ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЕДИНУЮ КАРТИНУ

ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д., КАРПОВ В.В., МОИСЕЕВ Е.А.*, СЕНИК Б.Н.*

АО «МЗ «Сапфир», г. Москва
***ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»**

E-mail: volkvik2009@yandex.ru, bogdan_senik@mail.ru

Аннотация: *В статье рассматриваются методы совмещения в единый образ изображений двух отдельных каналов под левый и правый глаза наблюдателя соответственно комбинированной системы визуализации изображений (СВИ). Сформулированы условия такого совмещения и определены возможности его реализации в визуальных СВИ, в системе ночной канал + канал теплообнаружения, ночной канал + тепловизионный канал.*

Ключевые слова: система визуализации изображений, интегрированное изображение, комбинированное изображение, визуальный канал, ночной канал, канал теплообнаружения, тепловизионный канал, электронно-оптический преобразователь, объектив, окуляр.

METHODS OF COMBINING IMAGES OF DIFFERENT CHANNELS OF THE COMBINED SYSTEM TO RENDER IMAGES INTO A SINGLE PICTURE

WOLKOV V.G., GINDIN P.D., KARPOV V.V., MOISEEV E.A.*, SENIK B.N.*

Joint Stock Company «Moskovskij Zavod «Sapphir»
***Public Joint Stock Company «Krasnogorskij Zavod named S.A. Zverev»**

E-mail: np_andreeva@mail.ru; v-rogalin@mail.ru; kmitin67@mail.ru

Abstract: *The article deals with methods of combining in a single image the images of two separate channels for the left and right eyes of the observer respectively of the combined system of imaging (SVI). The conditions of this combination and the possibilities of its implementation in visual SVI, in the system of the night the canal + channel teploenergiya, night channel + thermal imaging channel.*

Keywords: visualization system of images integrated image, the combined image, the visual channel, a night channel, teploenergiya channel, thermal imaging channel, an electron-optical Converter, lens, eyepiece.

В настоящее время широко используются комбинированные системы визуализации изображений (СВИ), состоящих из двух каналов [1, 2]. При этом каналы могут создавать одинаковые или же различные изображения, каждое из которых наблюдается соответственно левым и правым глазами оператора. Изучение теории функционирования зрительного анализатора (глаз + система нервных волокон + мозг), изложенной в работах [3 – 5], показывает, что для создания комбинированного изображения, объединяющего изображения под левый и правый глаз оператора, необходимо выполнение следующих условий:

1. Оба изображения совершенно одинаковы как с точки зрения содержания наблюдаемой сцены, так и по информационной емкости или же различаются весьма незначительно; при этом создается не только единый образ, но и стереоскопическое изображение;

2. Оба изображения приведены в единую предметную плоскость для наблюдения через окуляры;

3. Наблюдение изображений осуществляется только через окуляры, а не с конечного расстояния;

4. масштаб изображений обоих каналов должен различаться не более чем на 5%;

5. Различие в цветности не играет роли;

6. Если в каждом канале формируется свое изображение, отличное от изображения другого канала, то для их совмещения в единый образ необходимо, чтобы информационная емкость изображения в одном канале была бы пренебрежимо мала по сравнению с емкостью изображения в другом канале.

Рассмотрим, как реализуются эти условия в различных комбинированных СВИ. Для начала рассмотрим дневной полевой бинокль [1], где реализуются все указанные выше условия, и создается единое комбинированное стереоскопическое изображение. При этом в одном из идентичных визуальных каналов бинокля введена в его поле зрения шкала с центральным перекрестием и штрихами в малых делениях угломера для измерения дальности до объектов наблюдения методом «с базой на цели» [1]. Нетрудно видеть, что эта шкала, на которую сфокусирован один из окуляров бинокля, имеет пренебрежимо малую информационную емкость по сравнению с основным изображением, и не нарушает возможность создания единого комбинированного стереоскопического изображения. Таким образом, изображения, наблюдаемые в левый и правый окуляр, сливаются в одно изображение, на котором видна шкала.

Если рассмотреть бинокулярный прибор ночного видения (ПНВ) на основе электронно-оптических преобразователей (ЭОП) [1] с идентичными каналами, то и здесь формируется единое комбинированное стереоскопическое изображение с введением в него изображения сетки, установленной в один из каналов. То же самое происходит и в бинокулярной телевизионной (ТВ) СВИ [2].

Но если даже при одинаковой информационной емкости наблюдаются два совершенно различных по содержанию изображения (разных сцен), то никогда не создастся комбинированное изображение - каждый глаз будет видеть раздельно только свое изображение. Конкретный пример – создание бинокулярных очков ночного видения, в одном из каналов которых создается изображение сцены перед оператором, а в другом канале – сцены за ним. При включении обоих каналов один глаз видит только изображение передней сцены, а другой – только задней сцены. Оба изображения не сливаются в единую картину. Оператору приходится акцентировать свое внимание то на одно, то на другое изображение или попеременно закрывать то один глаз, то другой [2].

Однако при выполнении условия (5) создается комбинированное изображение. Конкретный пример – прибор «Изумруд» [1, 2]. Он состоит из ночного канала на базе ЭОП с окуляром под правый глаз оператора и кана-

ла теплообнаружения с окуляром под левый глаз оператора. В ночной канал правый глаз оператора наблюдает изображение сцены. Если в поле зрения прибора появится теплоизлучающий объект (например, пострадавший в стихийном бедствии, лежащий в высокой траве), то в канале теплообнаружения загорится светодиодный индикатор красного цвета свечения. Появится изображение красной точки, наблюдаемое левым глазом. В результате оба изображения сольются в единое изображение. Оператор будет видеть изображение красной точки индикатора на фоне изображения сцены желто-зеленого цвета в ночном канале. Это позволяет оператору определить по положению изображения индикатора в поле зрения прибора, где находится пострадавший.

Если СВИ состоит из ночного ТВ канала и тепловизионного (ТВП) канала, то в них формируются совершенно разнородные изображения объекта и окружающего его фона. При пониженном уровне естественной ночной освещенности в ночной канал будет видно изображение местности и линии горизонта, но сам объект виден не будет. В ТВП канал, как правило, видно изображение только теплоизлучающего объекта (например, фигуры человека или транспортного средства), а фон и линия горизонта видны плохо. Это не позволяет ориентироваться на местности. Фирма ATN (США) разработала очки ночного видения такого типа – модель DSNVG [2]. При этом изображение с выхода обоих каналов преобразуется в цифровую форму и подвергается микропроцессорной обработке в реальном масштабе времени, в результате чего формируется единое интегрированное изображение. Он воплощает в себе все лучшие информационные признаки обоих каналов. Такое техническое решение является весьма перспективным. Однако оно связано и с недостатками:

1. Стоимость такой СВИ очень высока;
2. В случае, если в одном или в двух каналах возникнет необходимость поменять матрицу фотодетекторов (например, в ТВП канале поменять матрицу микроболометров формата 320x240 пикселей на 640x420 пикселей), то придется менять весь алгоритм работы устройства и его электронного канала; это усложнит процесс внедрения СВИ в серийное производство.

В связи с этим может быть предложен комбинированный СВИ, содержащий ночной канал на базе ЭОП и ТВП канал. Правый глаз оператора наблюдает изображение ночного канала, а левый глаз – ТВП канала. Эти изображения разнородны, но, поскольку информационная емкость ТВП канала пренебрежимо мала по сравнению с информационной емкостью ночного канала, то оба изображения объединяются в единое комбинированное изображение. Оператор видит тепловое изображение объекта на фоне местности. Стоимость такого СВИ будет в 2,5 раза меньше, чем у СВИ с интегрированным изображением, а качество изображения ухудшится незначительно. Если теперь придется поменять какой-либо из элементов любого канала СВИ, то не нужно осуществлять ее дорогостоящую переработку, а нужно только поменять один канал на другой. Это позволяет реализовать модульный принцип построения СВИ, что значительно снизит его стоимость и облегчит внедрение в серийное производство. Таким образом, применение подобной СВИ вполне оправдано, по крайней мере до тех пор, пока СВИ с интегрированным изображением не избавится от указанных выше недостатков.

В активно-импульсном приборе ночного видения (АИ ПНВ) с импульсным лазерным подсветом [1, 2] при его работе в пассивном режиме видна местность и линия горизонта, но не распознается объект наблюдения. При работе в АИ режиме распознается только объект наблюдения, а изображение фона вместе с линией горизонта полностью отсекается задержкой [1, 2]. Поэтому представляется це-

лесообразным применение двухканального АИ ПНВ, имеющего в своем составе не один, а два приемных канала: пассивный и АИ каналы. В пассивном канале перед фотокатодом ЭОП установлен режекторный фильтр, полностью отсекающий излучение лазерного подсвета. В АИ канале перед фотокатодом ЭОП установлен узкополосный фильтр, пропускающий это излучение. При этом в пассивном каннеле, изображение которого вводится через окуляр в левый глаз оператора, наблюдается изображение местности и линии горизонта. В АИ канале, сопряженным через его окуляр с правым глазом оператора, распознается изображение объекта. В результате наблюдения двумя глазами создается единое комбинированное изображение, позволяющее распознать объект и одновременно ориентироваться на местности. Для еще большего увеличения контраста изображения объекта на окружающем его фоне экран ЭОП пассивного канала может быть выполнен с люминофором белого цвета свечения [6], а ЭОП АИ канала имеет при этом традиционный люминофор желто-зеленого цвета сечения. Благодаря этому наблюдается желто-зеленое изображение объекта на черно-белом фоне. Такой дополнительный цветовой контраст позволит в еще большей степени повысить вероятность распознавания объекта.

Таким образом, существуют реальные возможности создания эффективного комбинированного изображения путем объединения изображений под каждый глаз оператора.

Список литературы.

1. *Гейхман И.Л., Волков В.Г.* Видение и безопасность. М.: Новости. 2009. 840 с.

2. *Волков В.Г., Гиндин П.Д.* Техническое зрение. Инновации. М.: Техносфера. 2014. 840 с.

3. Особенности зрительного восприятия. [Электронный ресурс] www.ahmerov.com/book_637_chapter_24_2. (Дата обращения: 12.01.2018).

4. Курсовая психология. Наше восприятие мира. [Электронный ресурс] works.tarefer.ru/70/100383/index.html. (Дата обращения: 12.01.2018).

5. *Козлов В.Н.* К математической теории зрительного восприятия. [Электронный ресурс] intsys.msu.ru/magazine/archive/v10(1-4)/kozlov-141-166.pdf. (Дата обращения: 12.01.2018).

6. Image Intensifiers. Каталог фирмы Lahoux Optcs, Нидерланды, 2016.

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 51-74

российский индекс научного цитирования Science Index

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОПТИЧЕСКИХ ПРЕЦИЗИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

САЛЬНИКОВА М.А., АРХИПОВ С.А., МОРОЗОВ С.А.

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

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

Аннотация: *При создании и эксплуатации оптико-электронной аппаратуры предлагается различать три типа математических моделей: экспресс-оценки, имитационные модели, цифровой образец изделия. Даются определения каждого типа моделей. На примере проектирования астрономического зеркала демонстрируется процесс построения и использования экспресс-оценки, а также производится оценка точности вычислений. Применение данного типа математической модели позволяет сократить время на проектирование аппаратуры, проведение испытаний, дает возможность оперативно оценивать влияние отклонений параметров деталей и узлов на характеристики аппаратуры в целом при изготовлении, сборке и в процессе эксплуатации.*

Ключевые слова: математическое моделирование, экспресс-оценки, оптико-электронная аппаратура, астрономическое зеркало, оценка деформаций рабочей поверхности.

MATHEMATICAL MODELS USED IN THE DESIGN OF OPTICAL PRECISION STRUCTURE

SALNIKOVA M.A., ARKHIPOV S.A., MOROZOV S.A.

Public Joint Stock Company «Krasnogorskij Zavod named S.A. Zverev»

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

Abstract: *In this paper, an approach is formulated that divides the mathematical models created in the design of optoelectronic equipment into different classes, depending on its life cycle. Definitions of each type of model are given. The example of «rapid assessment» application in the astronomical mirror design is shown and the estimation of the accuracy of calculations is performed. The application of these estimates will reduce the time for designing equipment, conducting tests, assessing the influence of deviations in the parameters of the part from the required values on the equipment as a whole in the manufacture, assembly and operation.*

Keywords: mathematical modeling, rapid assessments, optoelectronic equipment, astronomical mirror, working surface deformations evaluation.

Создание современной оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) космического назначения немыслимо 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).

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, CAD 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 (рис. 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

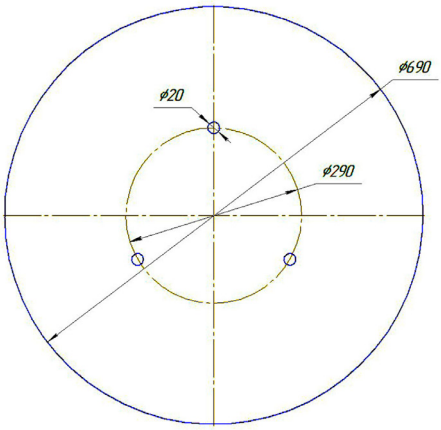


Рисунок 1.
Геометрические параметры зеркала

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 (рис. 1); W_2 – это максимальное перемещение рабочей поверхности кольцевой детали, габариты которой определяются следующим образом: внутренний диаметр равен диаметру расположения опор, показанных на рис. 1, а внешний диаметр соответствует максимальному габариту детали на рис. 1. 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 перед величинами W_1 и W_2 в формуле (1)), 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 использующиеся, 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 $\frac{l}{h}$.

Здесь r_1 - радиус, на котором располагаются опоры; r_2 - внешний радиус зеркала; h - толщина зеркала, $l = (r_2 - r_1)$.

Пользуясь формулой экспресс-оценки, конструктор вычисляет максимальные перемещения рабочей поверхности детали.

Погрешность между результатами, полученными с помощью экспресс-оценки, относительно численного решения, полученного, например, в программе ANSYS, не превышает 5%.

Представим пример вычисления коэффициентов для уравнения (1) со следующими исходными данными:

$r_1 = 0{,}145$ *м* – радиус, на котором располагаются элементы крепления;

$r_2 = 0{,}345$ *м* – внешний радиус зеркала;

$h = 0{,}02$ *м*– толщина зеркала;

параметры используемого материала Ситалл СО-115М® [3]: $E = 9{,}39 \cdot 10^{10} Па$ – модуль Юнга; $\nu = 0{,}236$ – коэффициент Пуассона.

Как было отмечено выше, максимальное перемещение рабочей поверхности зеркала B равно линейной комбинации максимальных перемещений круглых тонких пластин для следующих двух расчетных схем.

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%

В первой расчетной схеме (определение W_1) геометрические параметры равны r_1 = 0,145 *м* (закрепление по окружности этого радиуса), h = 0,02 *м* – толщина.

Во второй расчетной схеме (определение W_2) в детали имеется центральное отверстие радиуса r_1= 0,145 *м* (закрепление по окружности этого радиуса), r_2 = 0,345 *м* – внешний радиус и h = 0,02 *м* – толщина.

Точное значение максимального перемещения B рабочей поверхности зеркала рассчитывается в программе ANSYS.

В соответствии с [4,5] в результате расчета по аналитическим формулам имеем следующие значения максимальных перемещений W_1=$5 \cdot 10^{-8}$ м, W_2=$1{,}63 \cdot 10^{-6}$ м. Поскольку требуется определить два коэффициента, для составления системы уравнений нам, помимо прогиба W_2 на максимальном радиусе, потребуется прогиб W_2 на радиусе чуть меньшем чем, r_2 = 0,345 *м*, например, r_{22} = 0,345 *м*, тогда W_{22}=$1{,}56 \cdot 10^{-6}$ м. Составляем СЛАУ

$$\begin{cases} B_1 = A_1 \cdot W_{11} + A_2 \cdot W_{12} \\ B_2 = A_1 \cdot W_{21} + A_2 \cdot W_{22} \end{cases},$$

где $W_{11} = W_{21} = W_1$

$W_{12} = W_2$ – максимальное перемещение пластинки под собственным весом на внешнем радиусе r_2 = 0,345 *м*;

W_{22} – максимальное перемещение пластинки под собственным весом на радиусе r_{22} = 0,343 *м*

B_1 – максимальное перемещение пластинки под собственным весом на внешнем радиусе r_2 = 0,345 *м* полученное в ANSYS, B_1=$4{,}2 \cdot 10^{-6}$ м;

B_2 – перемещение пластинки под собственным весом на радиусе r_{22} = 0,343 *м* полученное в ANSYS, B_2=$4{,}072 \cdot 10^{-6}$ м;

Из решения системы линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} 4{,}2 \cdot 10^{-6} = A_1 \cdot 5 \cdot 10^{-8} + A_2 \cdot 1{,}63 \cdot 10^{-6} \\ 4{,}072 \cdot 10^{-6} = A_1 \cdot 5 \cdot 10^{-8} + A_2 \cdot 1{,}56 \cdot 10^{-6} \end{cases}$$

следуют значения коэффициентов A_1= 24,39, A_2 = 1,83.

Данные результаты найдены для соотношений $r_1/r_2 = 0{,}42$ и $\frac{(r_2-r_1)}{h} = \frac{l}{h} = 10$.

Используя предложенную выше формулу экспресс-оценки (1) вычисляем максимальные перемещения рабочей поверхности зеркала под воздействием гравитации. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

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. *С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер*. Теория упругости. Москва: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1975.

2. *С.П. Тимошенко.* Сопротивление материалов. Том 2 изд. Москва: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1965.

Ситалл СО115М (Астроситалл) // URL: http://lzos.ru/content/view/18/37/ (дата обращения: 12.02.2018).

3. *Г.С. Варданян, В.И. Андреев, Н.М. Атаров, А.А. Горшков*. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. Москва: Изд-во АСВ, 1995.

4. *Д.В. Вайнберг, Е.Д. Вайнберг*. Расчет пластин. Издание второе. Киев: Изд-во Будивельник, 1970.

УДК 535.317

российский индекс научного цитирования Science Index

МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АТЕРМАЛИЗИРОВАННЫХ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ ДАЛЬНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

ЛОГИНОВА М.П.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

E-mail: ashirankov@mail.ru

Аннотация: *Описаны методы расчета атермализированных объективов. Рассмотрены температурные характеритики оптических материалов для дальнего ИК-диапазона спектра и влияние изменения температуры на оптические характеристики объективов. Приведены результаты аберрационного расчета атермализированных систем, разработанных с применением халькогенидных стекол и использованием асферических дифракционных поверхностей.*

Ключевые слова: атермализация, аберрации, асферическая линза, дифракционный профиль, частотно-контрастная характеристика.

DESIGNING ATHERMAL LENSES FOR LONG-WAVE INFRARED SPECTRUM

MARINA LOGINOVA

Bauman Moscow State Technical University

E-mail: ashirankov@mail.ru

Abstract: *The article describes the principles of athermal lenses design. This investigation reviews typical infrared materials' thermal performance and the effects of temperature on the optical performance of lens systems manufactured from various optical materials. We present passively athermal systems that are designed with chalcogenide glasses and diffractive surfaces. The results of an aberrational calculation are presented.*

Keywords: atermalization, aberration, an aspherical lens, a diffraction profile, modulation transfer function.

При проектировании оптико-электронных инфракрасных приборов, работающих в переменных метеорологических и климатических условиях, важно обеспечить стабильность параметров оптической системы. Тепловые колебания вызывают изменение показателей преломления сред и линейных размеров системы (радиусы, кривизны поверхностей, толщины линз). Изменяются также размеры оправ линз, соединяющих оптические детали, что может привести к смещению плоскости изображения, измененииюфокусного расстояния или линейного увеличения, а так же аберраций системы. Это особенно заметно в ИК-диапазоне спектра, где оптические материалы имеют значительные величины коэффициента *dn/dT* [1].

Задача оптического расчета сводится к исключению смещения плоскости изображения (термооптическая аберрация положения $\Delta s'_t$, мм) и изменения размера изображения (термооптическая аберрация увеличения $\Delta y'_t$, мм) при изменении температуры («атермализация» системы)[2].

Рассматривая простейший случай одиночной тонкой линзы для предмета в бесконечности термооптическую аберрацию положения изображения можно приближенно вычислить по формуле:

$$\Delta s'_t = -f'\beta\Delta T = -\left(\frac{\frac{dn}{dT}}{n-1} - \alpha_L\right) f'\Delta T \qquad (1)$$

где

β - термооптическая постоянная, °C^{-1},

α_L - коэффициент теплового расширения материала, из которого изготовлена линза, °C^{-1},

n - показатель преломления материла,

dn/ - изменение показателя преломления, °C^{-1},

f' - фокусное расстояние линзы, мм,

ΔT - изменение температуры, °C [3].

Термооптическую аберрацию увеличения можно представить как

$$\Delta y'_t = y' a_p \Phi \beta \Delta T \qquad (2)$$

где

y' - размер изображения, мм, α_p - положение зрачка относительно линзы, мм,

Φ -оптическая сила линзы, мм$^{-1}$.

Температурное изменение воздушных промежутков между линзами системы зависит от коэффициента линейного расширения корпуса, в котором крепится оптическая система, от способа крепления линз в оправах и крепления самих оправ линз в корпусе. В наиболее простом случае, когда воздушный промежуток устанавливается с помощью кольца:

$$\Delta L = \alpha_h L \Delta T \qquad (3)$$

α_h - коэффициент линейного расширения материала кольца, °C^{-1},

L - длина кольца, мм.

У большинства материалов, прозрачных в ИК области, $\beta > 0$ и указывает на уменьшение фокусного расстояния с увеличением температуры, в то время как материал оправы расширяется, приводя к увеличению ее размеров, исходя из этого, величину дефокусировки линзы Δz, мм, в оправе при изменении температуры можно представить как[4]:

$$\Delta z = \Delta L - \Delta s'_t \qquad (4)$$

Для *j* тонких линз:

$$\Delta s'_t = -f' \cdot \left[f' \sum_{i=1}^{j} (\beta_i \Phi_i) + \alpha_h \right] \Delta T \qquad (5)$$

Исходя их теории аберраций, глубина резкости для дифракционно ограниченной изображающей системы может быть представлена как:

$$\Delta z = \pm 2\lambda (F\#)^2 \qquad (6)$$

где F#=f/D - фокальное число.

Комбинируя приведенные выражения (6) и (4) для Δz, получим допустимое изменение температуры для *j* тонких линз, при которой термокомпенсация не требуется:

$$\Delta T = \pm \frac{2\lambda F\#}{D\left[f' \sum_{i=1}^{j} (\beta_i \Phi_i) + \alpha_h\right]} \qquad (7)$$

В качестве примера рассмотрим германиевую линзу диаметром 100 мм в алюминиевой оправе, работающую на длине волны 10 мкм. Подставляя значения $\beta = 130 \cdot 10^{-6}$[°C^{-1}] и $\alpha_h = 23 \cdot 10^{-6}$[°C^{-1}], получим, что изменение температуры, при котором значение дефокусировки превышает допустимый передел, составляет всего 2,6°C[5]. Очевидно, данный

факт серьезно ограничивает возможность применения системы. На рис. 1 показаны значения допустимого изменения температуры для различных диаметров германиевых линз:

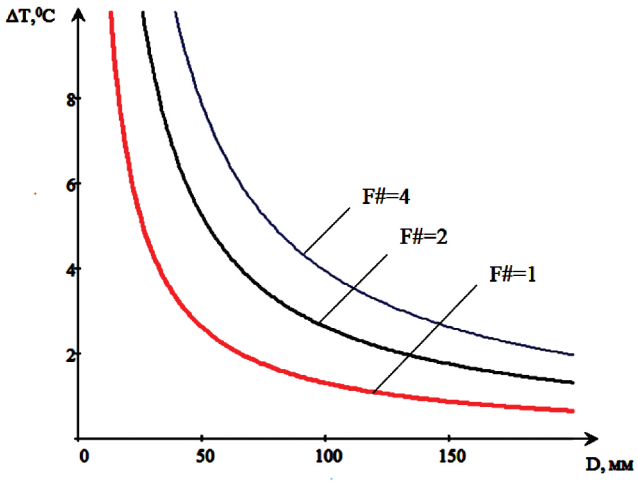


Рисунок 1.

Допустимое изменение температуры для одиночной германиевой линзы в алюминиевой оправе

Решение задачи атермализации можно осуществить, используя механические, электромеханические и чисто оптические методы. За счет использования материалов с различными коэффициентами линейного расширения (например, алюминий $\alpha_h = 23 \cdot 10^{-6}\,°C^{-1}$, сталь $\alpha_h = 13 \cdot 10^{-6}\,°C^{-1}$, инвар $\alpha_h = 1{,}2 \cdot 10^{-6}\,°C^{-1}$) добиваются разнонаправленного перемещения оптических компонентов при изменении температуры и, как следствие, компенсацию дефокусировки. Во втором случае осуществляется управление электромеханическим приводом, компенсирующим расфокусировку. Данные способы более сложны с точки зрения конструктивной реализации по сравнению с оптическими методами, заключающимися в подборе материалов с различными *dn/dT* и компонентов с разным знаком изменения оптической силы $\Phi = 1/f'$.

Наряду с атермализацией (8) в оптической системе должны быть обеспечены условия сохранения постоянной оптической силы (9) всей системы, состоящей из *j* компонентов, а также условие ахроматизации (10):

$$\sum_{i=1}^{j} \Phi_i \beta_i = -\Phi \alpha_h \qquad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{j} \Phi_i = \Phi \qquad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{j} \frac{\Phi_i}{\nu_i} = 0 \qquad (10)$$

где - коэффициент дисперсии (число Аббе).

Наличие трех условий влечет за собой необходимость использования комбинации трех различных материалов. Оптические силы трех тонких компонент для единичного фокусного расстояния определяются решением системы уравнений (6-8)[6].

Принимая:

$$a = \frac{\nu_1 \cdot \nu_2 - \nu_2 \cdot \nu_3}{\nu_1 \cdot \nu_3 - \nu_2 \cdot \nu_3} \qquad (11)$$

$$b = \frac{\nu_2}{\nu_2 - \nu_1} \qquad (12)$$

получим выражения

$$\Phi_3 = \frac{(1-b)\beta_1 + b\beta_2 + \alpha_h}{(1-a)\beta_1 + a\beta_2 - \beta_3} \qquad (13)$$

$$\Phi_2 = b - a\Phi_3 \qquad (14)$$

$$\Phi_1 = 1 - (\Phi_2 + \Phi_3) \qquad (15)$$

Таблица 1.

Комбинация материалов	Суммарная кривизна поля изображения	Сумма Петцваля
KRS5+ZnSe+Ge	+0,34/-0,15/+0,25	0,30
ZnSe+ZnS+Ge	+2,05/-0,92/-0,26	0,50
GaAs+ZnS+ KRS5	+0,38/-0,20/+0,26	0,31
AMTIR1+ZnS+Ge	+1,42/-0,35/-0,24	0,48
CdTe+ZnSe+KRS55	+0,72/-0,37/+0,22	0,37
GaAs+ ZnSe+KRS55	+0,68/-0,71/+0,33	0,25

В таблице 1 приведены комбинации из трех материалов для диапазона длин волн 8-12 мкм, обеспечивающие условия ахроматизации и атермализации оптической системы [7]. Как правило, выбор материала оптических систем является серьезной технико-экономической задачей, поэтому актуально создание ахроматизированных атермализированных объективов с использованием не более двух материалов. Аберрационная коррекция хроматизма возможна с помощью введения асферических поверхностей с дифракционнымпрофилем, воздействующим на фазу волнового фронта. Для изготовления таких поверхностей последнее десятилетие находит развитие и применение алмазное точение как метод обработки поверхностей алмазными монокристаллическими резцами. На поверхности создается рельеф, осуществляющий фазовую модуляцию излучения. Оптическая сила дифракционного элемента зависит от длины волны, причем эта зависимость обратно пропорциональна дисперсии материала подложки.

Наиболее эфективно применять бинарную оптику для ахроматизации оптических систем. Комбинируя оптические силы преломляющей и дифракционной поверхностей, можно добиться хорошего исправления хроматической аберрации.

Рассмотрим совместное использование германия и халькогенидного стекла GASIR1, термооптические параметры которых приведены в таблице 2 [8].

Как видно из таблицы 2 коэффициент приращения показателя преломления $\frac{dn}{dT}$ GASIR1 в несколько раз меньше, чем у германия, что делает его применение целесообразным для уменьшения расфокусировки при температурных перепадах. Возможности автоматизированной программы расчета оптических систем Zemax позволяют минимизировать термооптические аберрации системы [9].

На рис. 2 приведены оптические схемыи частотно-контрастные характеристики (ЧКХ) светосильного атермализированного объектива с F#=:0,8, рассчитанного для матричного фотоприемника форматом 640×480 и размером чувствительного элемента 17 мкм. Система включает в себя 4 компонента: асферическую линзу из германия (поз. 1), асферическую линзу из Gasir 1 с дифракционным профилем (поз. 2), асферическую линзу из германия с дифракционным профилем (поз. 3), асферическую линзу из германия (поз. 4) [10].

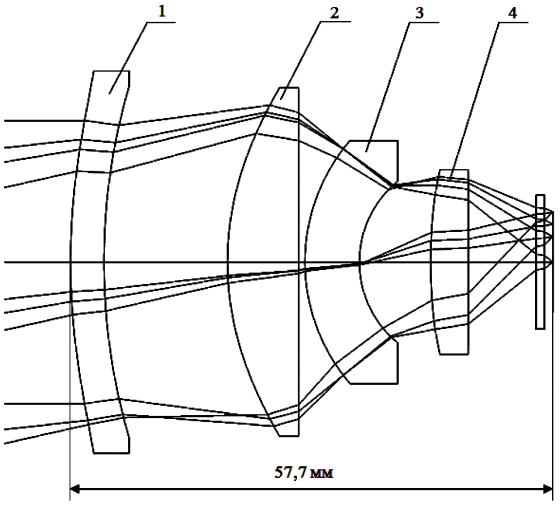


Рисунок 2.
Оптическая схема сверхсветосильного объектива с фокусным расстоянием f'=27 мм и F#=0,8

Таблица 2.

	Германий	GASIR1
Показатель преломления на длине волны 10 мкм	4,003	2,494
$\frac{dn}{dT}(\times 10^{-6\circ}C^{-1})$	396	55
$\alpha_L(\times 10^{-6\circ}C^{-1})$	5,7	17,0
$\beta(\times 10^{-6\circ}C^{-1})$	126	19,9

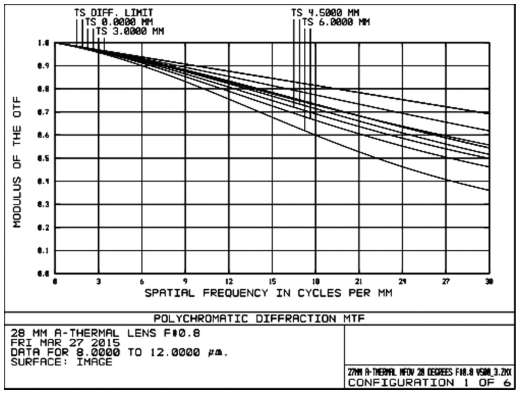


Рисунок 3.

ЧКХ, нормальные условия T = 20°C

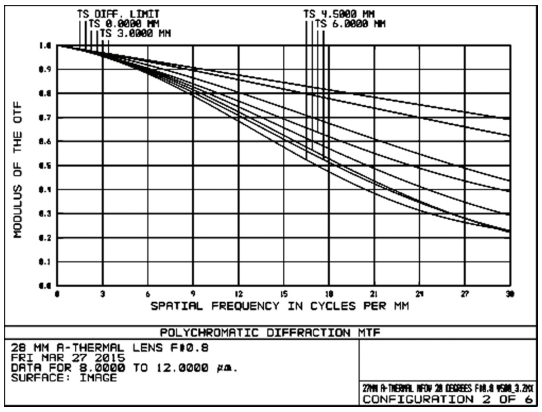


Рисунок 4.

ЧКХ, T = – 40°C

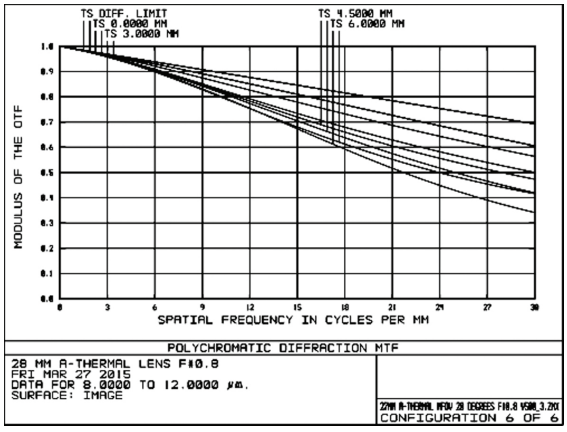


Рисунок 5.

ЧКХ, T = + 60°C

Как видно из рис. 3-5 частотно-контрастная характеристика объектива при перепадах температуры от -40 до +60^{0}C существенно не меняется.

На рис. 6-9 представлена оптическая схема и ЧКХ трехкомпонентного атермализированного объектива с F#=:1,2 и фокусными расстояниями 35 мм для матричного фотоприемника, имеющего формат 640×480 и размер чувствительного элемента 17 мкм. Системавключает в себя асферическую линзу из Gasir 1(поз.1), асферическую линзу из германия с дифракционным профилем (поз.2), асферическую линзу из германия (поз.3).

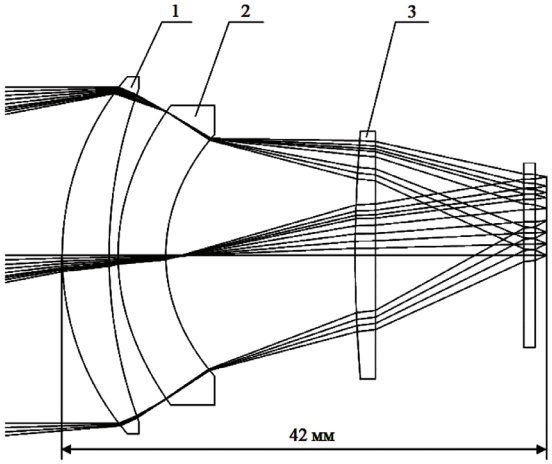


Рисунок 6.

Оптическая схема объектива с фокусным расстоянием f'=35мм и F#=1,2

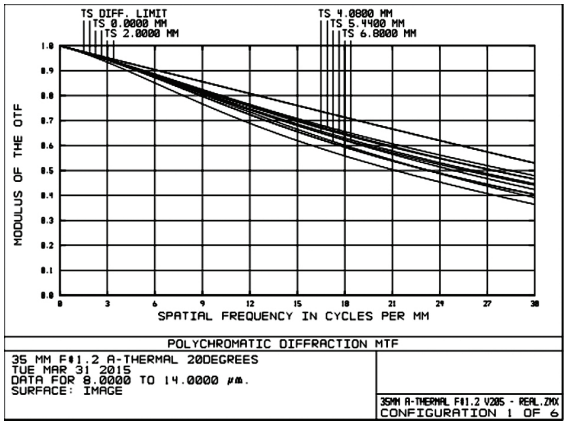


Рисунок 7.

ЧКХ, нормальные условия T = 20°C

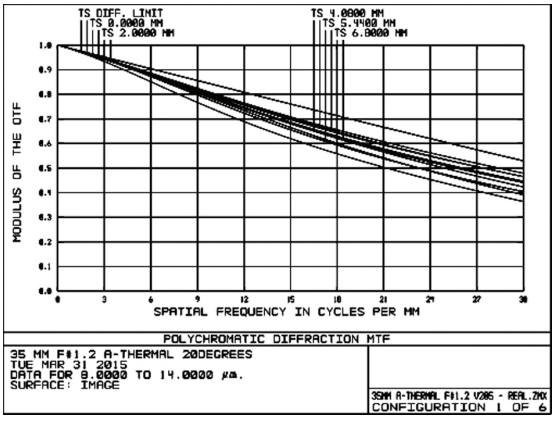


Рисунок 8.

ЧКХ, T = – 40°C

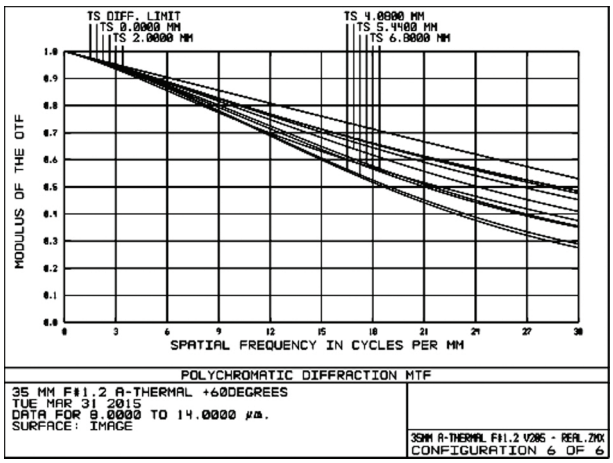


Рисунок 9.

ЧКХ, T = + 60°C

В заключение следует отметить, что выбранная комбинация материалов германий-GASIR1, а также использование дифракционных асферических элементов в оптических схемах обеспечивают выполнение условий атермализации и близкое к дифракционному качество изображения оптической системы для всего поля.

Список литературы

1. *Rogers, P.* Athermalization of IR Optical Systems // Critical Review Vol. CR38, Infrared Optical Design and Fabrication, ed. R. Hartmann, W.J. Smith (Apr 1991).

2. *Rayces, J.* Thermal compencation of infrared achromatic objectives with three optical materials //SPIE Vol.1354, International Lens Design Conference (1990).

3. *Rogers, P.* Thermal Compensation Techniques, Handbook of Optics, Volume I, Part 9, Chapter 39. McGraw-Hill, 1995.

4. *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.* Инфракрасные системы «смотрящего типа».-М.: Логос, 2004-443с.

5. *Апенко М.И., Дубовик А.С., Дурейко Г.В., Жилкин А.М.* Прикладная оптика.-М.:Машиностроение, 1992- 175с.

6. *Якушенков Ю.Г.* Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Машиностроение, 1989-130с.

7. *Geary J. M.,* Introduction to Lens Design with Practical ZEMAX Examples. Willmann-Bell , Richmond, Virginia (2002)-229 с.

8. *Jamieson T. H.,* Athermalization of optical instruments from the optomechanical viewpoint, Optomechanical Design. CR43, SPIE, Bellingham, WA (1992)-150с.

9. *Kudo J. I.* Diffractive lens in 8- to 10-μm forward-looking infrared system, (2002)-47 с

10. *Fischer R. E., Tadic-Galeb B.,* Optical System Design, McGraw-Hill , New York (2000)-223с.

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБУЕМОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЦВЕТНЫХ СВЕТОДИОДОВ

НАСИБУЛЛИН Р.А.

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

E-mail: nasrus@yandex.ru

Аннотация: *Предложен способ формирования произвольного спектра оптического излучения, предложена методика расчёта оптического излучателя с требуемой спектральной характеристикой, проведена оценка качества сформированной спектральной характеристики.*

Ключевые слова: спектральная характеристика, интеллектуальный светильник, цветные светодиоды, индекс цветопередачи.

ВВЕДЕНИЕ

По данным последних исследований [1], [2], основной причиной ухудшения зрения человека является низкое качество освещения рабочего места. Высокая яркость (блёсткость) светильников, низкая освещённость в поле зрения глаза, высокая контрастность и спектр излучения отличный от спектра естественного света современных светильников, так или иначе, способствуют ухудшению зрения. Кроме того, искусственное освещение сбивает циркадные ритмы, нарушая циклы сна и бодрствования.

Яркость светильников, величину освещённости и контрастности несложно привести к приемлемым величинам путём грамотного проектирования светильника и освещения помещения. В то же время, обеспечение освещения гармоничного с точки зрения соответствия времени суток требует введения в светильник функции изменения спектрального состава в зависимости от времени.

Таким образом, для получения изменяемой спектральной характеристики светильника требуется создание качественно нового излучателя. Создание интеллектуальных светильников на базе таких излучателей, которые автоматически меняют световой поток и спектр света в зависимости от времени суток, представляется одним из актуальных направлений работ в светотехнике.

Для реализации источника света с изменяемой спектральной характеристикой предлагается использовать несколько узкоспектральных источников излучения с частично перекрывающимися спектрами излучения. Для этой цели удобно использовать цветные светодиоды излучающие на различных длинах волн. Подобный подход применяется, например, для создания освещения картин в музеях [3].

СПОСОБ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Промышленность предоставляет достаточно широкий выбор цветных светодиодов см. рис. 1.

Как видно из графика спектры излучения отличаются как по форме так и по ширине. Что несколько усложняет выбор светодиодов и расчёт режима их работы.

Для получения источника с требуемым спектром излучения предлагается следующий подход.

1. Выбор светодиодов. Светодиоды должны иметь перекрывающиеся спектры излучений. Точки пересечения графиков спектральных характеристик должны быть выше половины

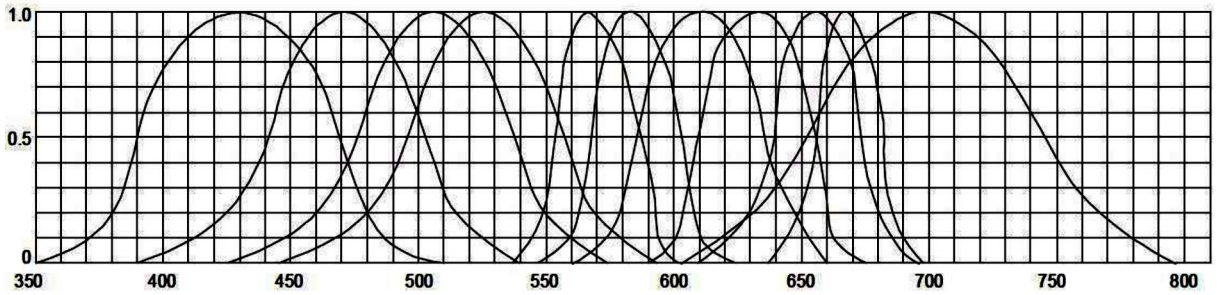


Рисунок 1.
Нормированные спектральные характеристики светодиодов

уровня пика спектральной характеристики излучения.

2. Для последующего расчёта задать характеристику светодиода в виде сплайн кривой: $f_i(\lambda)$

Где: i - номер светодиода,

λ - длинна волны

Тогда результирующий спектр излучения всех выбранных светодиодов определятся суммой их интенсивностей излучения:

$$f_\Sigma = \sum_{k=0}^{n} k_i \cdot f_i(\lambda) \qquad (1)$$

Где: k_i - коэффициент использования потока излучения i-го светодиода

3. Задаем требуемую спектральную характеристику излучения $\phi(\lambda)$ также в виде сплайн кривой. Находим функцию $\varepsilon(\lambda)$ среднеквадратичного отклонения результирующего спектра излучения от требуемого, которую требуется минимизировать:

$$\varepsilon(\lambda) = \sqrt{\int_{380}^{780}[f(\lambda) - \varphi(\lambda)]^2} \to min \qquad (2)$$

В качестве оптимизируемых параметров обеспечивающих минимизацию функции $\varepsilon(\lambda)$ выступают коэффициенты k_i

4. Решая задачу оптимизации, находим коэффициенты k_i, которые используем в дальнейшем для формирования требуемого спектра излучения.

Для примера проведён расчёт излучателя на 8-ми светодиодах. Выбраны следующие светодиоды:

BL-L324BC-430 нм, GNL-3014BGC-505 нм, KA-3528PBC-E-465 нм, KPTD-3216PGC-555 нм, KA-3528SYC-590 нм, KPC-3216ID-627нм, KA-3528SRC-660 нм FYL-3014HD1A-700 нм.

В качестве требуемого спектра задаём спектр солнечного света и ясного неба см. рис. 2 и 3 штриховые кривые.

В результате расчёта в среде MathCad получены коэффициенты k_i обеспечивающие максимальное приближение спектральной характеристики светодиодов к требуемым спектральным характеристикам.

Например, при k_1=0,815, k_2=0,959, k_3=0,283, k_4=0,723, k_5=0,651, k_6=794, k_7=0,521, k_8=0,774 спектральная характеристика светодиодов приближена к спектру солнечного света и выглядит так, как показано на рис. 2 (сплошная кривая.)

Спектральная характеристика светодиодов приближенная к спектру ясного неба обеспечивается при коэффициентах k_1=1,003, k_2=0,794, k_3=0,193,k_4=0,432, k_5=0,308, k_6=0,212, k_7=0,132, k_8=0,137 (см. рис. 3 сплошная кривая)

Не смотря на то, что полученные спектральные характеристики заметно отличаются от требуемых, тем не менее, они существенно лучше в сравнении со спектральными характеристиками существующих бытовых светильников. Как видно из рисунков 2 и 3 в полученных спектрах отсутствуют:

- узкополосные пики излучения присущие газоразрядным лампам.
- относительно мощный пик излучения синего цвета, который даёт светодиод белого света.
- мощное излучение в инфракрасной области, которое даёт лампа накаливания.

С помощью спектрального калькулятора [4] произведен расчёт индексов цветопередачи характеризующих степень цветопередачи при освещении предлагаемым источником света:

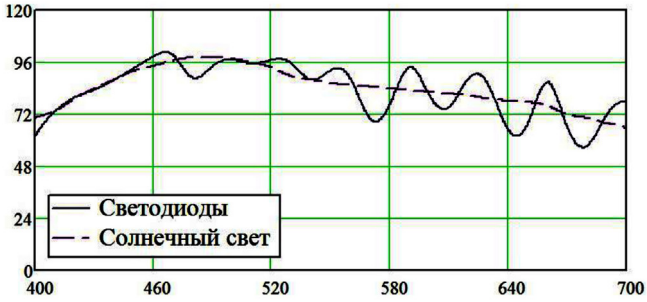


Рисунок 2.
Спектральные характеристики солнечного света - штриховая кривая и суммарный спектр излучения светодиодов - сплошная кривая

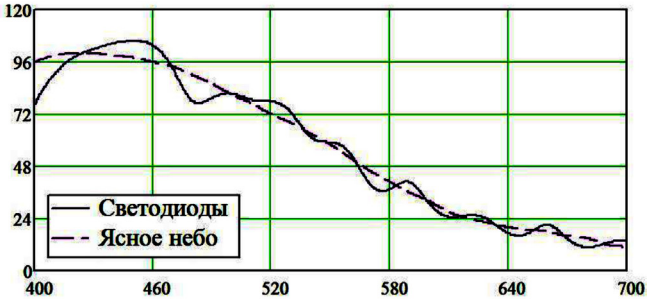


Рисунок 3.
Спектральные характеристики ясного неба – штриховая кривая и суммарный спектр излучения светодиодов – сплошная кривая

Цветовая температура источника излучения - 5860 K

Индекс цветопередачи - CRI:

Ra = 99.1

Ra(14) = 98.8

Ra(15) = 98.8

Индекс цветопередачи - CQS:

Qa = 99.1

Qf = 99.0

Qp = 99.3

Qd = 99.9

С учётом того, что источники света с индексом CRI = 90-95 считаются высококачественными, исследуемый источник света имеет превосходные характеристики приближенные к эталонным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход в формировании требуемого спектра позволит сравнительно просто (путём изменения токов цветных светодиодов) получить источник света с произвольно изменяемой спектральной характеристикой излучения. В частности, в соответствии со временем суток и широты местности, можно сформировать спектры, приближенные к спектру ясного дневного неба, облачного неба, солнечного света, сумерек. Использование соответствующих алгоритмов управления позволит реализовать светильник с автоматическим изменением спектра и яркости в соответствии с суточным изменением естественного света. Такой светильник, не будет сбивать «внутренние часы» организма человека и оказывать, таким образом, негативное влияние на здоровье.

В тоже время источник света будет иметь и ряд недостатков:

- дороговизна светильника вследствие использования нескольких независимо управляемых драйверов, микропроцессорного узла управления.

- мощные цветные светодиоды выпускаются с меньшей градацией цветов, что не позволяет реализовать малогабаритные светильники

Тем не менее, всё возрастающие требования к качеству светильников и повышение заботы о собственном здоровье со стороны пользователей вынудят производителей к производству светильников в полной мере создающих безопасное и комфортное освещение.

Список литературы:

1. Зак *П.П., Островский М.А.* Потенциальная опасность освещения светодиодами для глаз детей и подростков, журнал Светотехника №3, 2012г. Стр. 4-6.

2. Бижак *Г.,* Кобав *М.Б.* Спектры излучения светодиодов и спектр действия для подавления секреции мелатонина, журнал Светотехника №3, 2012г. Стр.11-16.

3. Fontoynont, M., Miras, J.P., Angelini, M., Chanussot, J., Marty, C., Dunchêne, G., Novakovski, L., Makita, K., Moriyama, T. Lighting Mona Lisa with LEDs: details concerning innovating techniques (TOSHIBA Lamp – 2013). Стр.1-6.

4. https://cielab.xyz/spectralcalc.php

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@mail.ru

Аннотация: *В статье рассмотрены алгоритмы шумоподавления изображений, применяемые при их обработке. Показано, что неадаптивные алгоритмы (медиана, среднее геометрическое и т.д.) в сильной степени подавляют высокие пространственные частоты. Построены различные варианты адаптивных алгоритмов шумоподавления, учитвающих наличие контуров в окрестности рассматриваемого пикселя, и проведено сравнение результатов их работы.*

Ключевые слова: ДЗЗ, обработка изображений, фильтрация шумов.

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 «WorldWiew-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 получат 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_{KA} (коэффициент масштабирования $k = L_{aer} / L_{KA}$). Результаты этой операции описывается матрицей A;
- вычисляется функция передачи модуляции (ФПМ) оптико-электронного тракта КА $MTF(\nu)$, показанная на рисунке 1;

- для исследования улучшения процедуры шумоподавления предварительно впечатаем в угол снимка А две пары трёхшпальных мир (контрасты 0,3 и 0,8 ; периоды 2 и 4 пикселя);

- выполняется двумерное дискретное преобразование Фурье (ДДПФ) снимка А. Обозначим полученный спектр как F(А);

- имитируем размытие мелких деталей изображения А путём домножения спектра F(А) на ФПМ оптико-электронного тракта MTF(ν).

Полученный результат F(В) = F(А)· MTF(ν) является Фурье-спектром изображения В, формируемого в фокальной плоскости телескопа. Соответственно, для получения снимка В необходимо выполнить обратное ДДПФ: В = F^{-1}(F(B)) = F^{-1}(F(А) ·MTF(ν));

- моделируем зашумление изображения В. Как известно, СКО шума

$$\sigma_{\text{полн}} = \sqrt{\sigma^2_{\text{фотон}} + \sigma^2_{\text{ФПУ}}} \quad ,$$

причём СКО фотонного шума

$$\sigma_{\text{фотон}} = \sqrt{U} \quad ,$$

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 $U >> 1$ 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].

На рисунках 2-4 показаны фрагменты передискретизованного аэрофотоснимка А, изображения на фокальной плоскости объектива

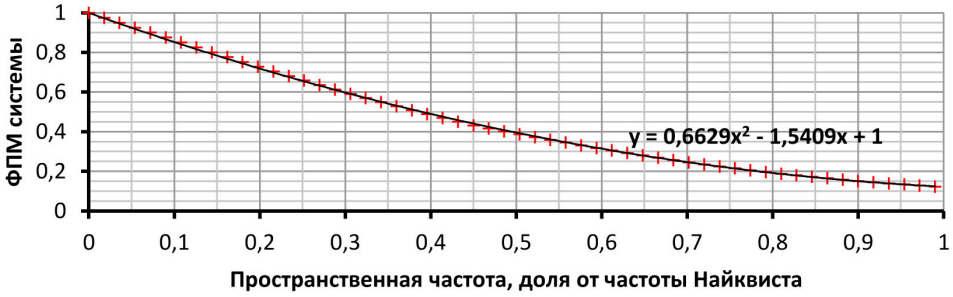


Рисунок 1.
ФПМ системы и её аппроксимация многочленом. Отметим, что здесь применена безразмерная пространственная частота, нормированная на частоту Найквиста (55,56 пар линий на мм)

Рисунок 2.
Снимок А

Рисунок 3.
Снимок В

Рисунок 4.
Снимок С

В и зашумлённого изображения С соответственно. Все три фрагмента включают в себя четыре трёхшпальных миры (слева вверху).

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ШУМОПОДАВЛЕНИЯ

Применим различные алгоритмы шумоподавления для исправления изображения С, 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:

$C_{fil}(i,j) = med(y1, y2, y3)$

где y1, y2, y3 – медианы яркостей пикселей строк окна 3x3:

y1 = med(C(i-1,j-1), C(i-1,j), C(i-1,j+1));

y2 = med(C(i,j-1), C(i,j), C(i,j+1));

y3 = 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 мир. Медианная и среднегеометрическая фильтрации превращают миру в размытое пятно почти круглой формы. Это сильно ухудшает ЛРМ, определяемое, как известно, по «критерию трёхшпальной миры» [1].

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.

Рисунок 5. Снимок С

Рисунок 6. Медиана

Рисунок 7. Псевдо-медианный

Рисунок 8. Средне-геометрический

Таким образом, возможна реализация алгоритма из двух ветвей:

- ветвь 1: если (контуры есть), то $C_{fil}(i,j) = f(C(i,j) ; noise(i,j))$, где f(a,b) – цельночисленная функция;
- ветвь 2: если (контуров нет), то $C_{fil}(i,j) = med(y1, y2, y3)$.

При этом шум

$$noise(i,j) = \frac{4095}{P_{зар}} \cdot \sqrt{C(i,j) \cdot \frac{P_{зар}}{4095}}$$

при зарядовой ёмкости $P_{зар}$

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

Вариант 2. В качестве признака наличия контуров в окне 3x3 пикселя E примем условие, что СКО(E) / noise(i,j) ≥ 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 (СКО(E) / noise(i,j) ≥ 3), то
$C_{fil}(i,j) = C(i,j) + noise(i,j)\cdot(1 - C(i,j) / med(y1, y2, y3))$;
- ветвь 2: если (СКО(E) / noise(i,j) < 3), то
$C_{fil}(i,j) = med(y1, y2, y3)$.

На рисунках 11-12 показаны два варианта алгоритма:

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.

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

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

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

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

Рисунок 9. Снимок C

Рисунок 10. Псевдомедианный

Рисунок 11. Вариант 1

Рисунок 12. Вариант 2

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

Отметим, что угловые пиксели окна 3·3 не участвуют в вычислениях, поэтому для диагональных контуров будет иметь место размытие. При величине угла θ = ±45° усреднение примет вид:

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

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 3·3.

1) Если 30° < |θ| < 60°, то:

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

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

1б) Иначе

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

2) Если |θ| < 30° или |θ| > 60°

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

Таким образом, ветвь 1а работает, когда контур можно считать диагональным и при этом в верхней части окна 3·3 контур находится верху, 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:

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

Очевидно, что для белой точки на чёрном фоне получится, что Lap(i,j) = 2·|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 $C_{fil}(i,j) = 0{,}3*C(i,j) + 0{,}7*\langle S'_{ij} \rangle$
- если Lap(i,j) < 1000, то $C_{fil}(i,j) = 0{,}7*C(i,j) + 0{,}3*\langle S'_{ij} \rangle$.

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 размытия мелких деталей и резких контуров. Наоборот, для равноярких 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 Cfil для разных возвышений Солнца hs показаны на рисунке 17.

Рисунок 17.
Lap C_{fil} , h_s=2° C_{fil} , h_s =5° C_{fil} , h_s =10°

Таблица 1

Алгоритм	SNR	ФПК 0,5*ν_N	ФПК 1*ν_N
Исх.снимок **C**, h_s=5°	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

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 миры с периодом 4 пикселя (0,5 частоты Найквиста).

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.

УДК 620.17

российский индекс научного цитирования Science Index

ОЦЕНКА ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ СОВРЕМЕННЫМИ МЕТОДАМИ

БОРБЕНЧУК А.С. - оператор 3 научной роты КВ ВКС РФ
ЧЕРНЫШЕВ А.О. - старший оператор 3 научной роты КВ ВКС РФ

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

E-mail: chernych3@rambler.ru

Борбенчук А.С.

Чернышев А.О.

Аннотация: *В статье рассматривается задача точного определения значений механических свойств материала. Рассматриваются современные методы неразрушающего контроля для оценки твердости материала.*

Ключевые слова: материаловедение, твердость, неразрушающие методы контроля, вдавливание, индентирование.

MODERN METHODS OF EVALUATION OF MATERIALS' RIGIDITY

BORBENCHUK A.S., CHERNYSHEV A.O.

PJSC «Krasnogorsky plant him S.A. Zvereva», Krasnogorsk

E-mail: chernych3@rambler.ru

Abstract: *This work is devoted to the study of the testing methods of materials. Existing methods of determining rigidity, as one of the most important characteristics of the material, require cutting out the sample. The instruments for measuring are stationary and can't leave the laboratory. When diagnosing a material, it is not always possible to cut out a sample of material to study its state in the laboratory.*
Practice proves that most often the equipment being diagnosed has its destruction in places where the cutting was previously performed. Because the actual task is to improve the methods for determining the rigidity of the material without destroying it and developing rapid methods for monitoring the state of the material.
We consider the method of dynamic indentation.

Keywords: materials science, rigidity, non-destructive testing methods, the dynamical indentation.

ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении и приборостроении задача точного определения значений механических свойств материалов является весьма актуальной, тем более при измерении свойств методами неразрушающего контроля безобразцово и оперативно. Существующие методы определения твердости, как одной из важнейших характеристик материала, требуют вырезки образца. Приборы являются стационарными и не могут покидать пределов лабораторий, однако часто возникает необходимость провести измерения в условиях цеха на изделии в процессе эксплуатации.

В настоящее время одним из основных методов является инструментальное индентирование. Расчет характеристик в приборах, реализующих данный метод, основывается на анализе диаграммы зависимости контактного усилия от перемещения индентора в материале. Но определение характеристик при данных методах осуществляется только в определенных лабораторных условиях при ограничении габаритов и массы испытуемого образца.

При диагностировании материала не всегда имеется возможность вырезки образца материала для исследования его состояния в лабораторных условиях. Также практика доказывает, что чаще всего у диагностируемого оборудования возникают разрушения в тех местах, где ранее была выполнена вырезка. Поэтому актуальной является задача совершенствования методов определения твердости материала без его разрушения и разработка экспресс-методов контроля состояния материала.

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТВЕРДОСТИ

Для определения твердости конструкторской документацией могут быть предусмотрены специальные методы контроля:

1) Инструментальное индентирование

2) Методы вдавливания (метод Бринелля, метод Виккерса, метод Роквелла, метод Шора)

Стандартными методами определения твердости являются метод Роквелла (оценка по глубине проникновения индентора), метод Бринелля (по отпечатку от индентора в форме шарика), метод Виккерса (по отпечатку от индентора в форме пирамиды) и метод измерения микротвердости. Схемы определения твердости представлены на рисунке 1.

Внедрение индентора сопровождается пластической деформацией материала. Соответственно, чем выше сопротивление внедрению в материал, тем выше его твердость.

В государственном стандарте пока нет регламентации метода Либа, в зарубежных стандартах порядок проведения описан в ISO/DIS 16859.

Число твердости по Либу (HL) определяется отношением скорости падения индентора к скорости отскока. Шкала по которой определяются значения твердости (шкала Либа) не так широко применима, в отличие от шкал,

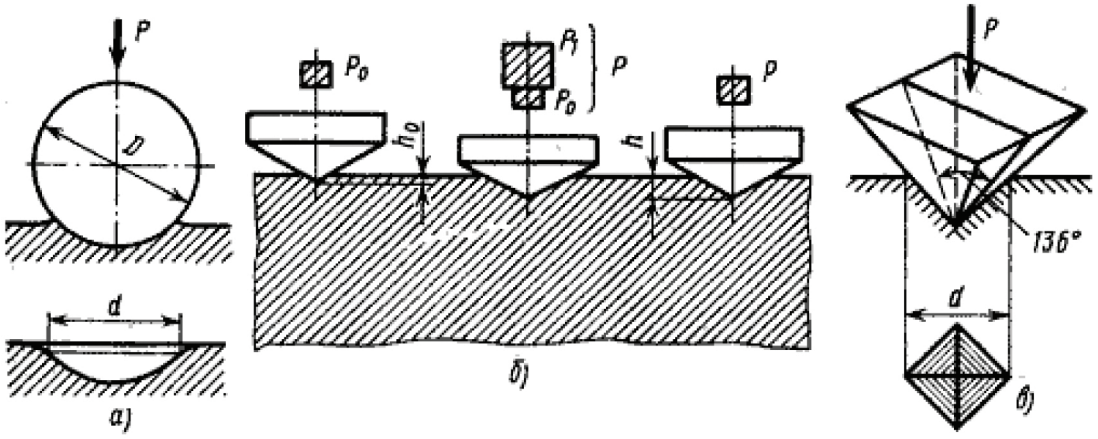


Рисунок 1.
Схемы испытаний: а – по Бринеллю; б – по Роквеллу; в – по Виккерсу

применяемых в других методах. Тем не менее, существуют таблицы преобразования, позволяющие перевод значений из шкалы Либа в другие. При определении твёрдости по Либу не имеет существенного значения размер отпечатка, в этом случае проводятся косвенные измерения и определяется через потерю энергии при соударении индентора с испытуемой поверхностью.

Общая схема твердомера, работающего по Либу, представлена на рисунке 2. Начальная скорость и направление задается с помощью пружины. Для измерения скорости к ударнику прикреплен магнит, который создает ЭДС во время прохождения через катушку, это значение пропорционально скорости [3].

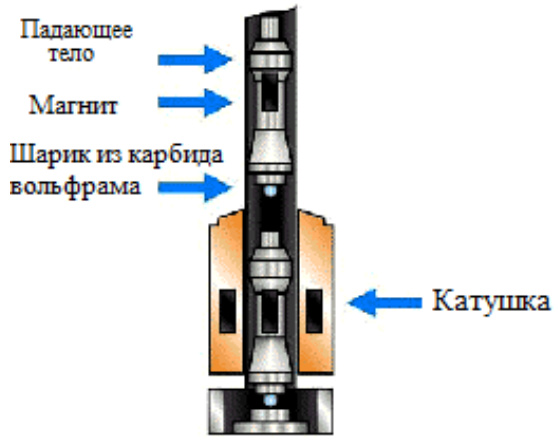


Рисунок 2.
Устройство твердомера Либа

Недостатком метода Либа является то, что твердомеры, работающие на основе данного метода, применимы только в случаях, когда идет речь о контроле качества крупногабаритных объектов или в случаях, когда исследуемый образец невозможно отправить в испытательную лабораторию [1]. Также недостатком метода Либа является то, что данный метод позволяет определить только твердость материала.

МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТВЕРДОСТИ

Для определения значений твердости материалов в настоящее время одним из наиболее популярных методов является метод инструментального индентирования (ИИ). Сущность данного метода состоит в анализе экспериментальной зависимости глубины внедрения индентора от контактного усилия, возникающего при взаимодействии материала и индентора (рисунок 3). В результате анализа получают значения твердости изучаемого материала.

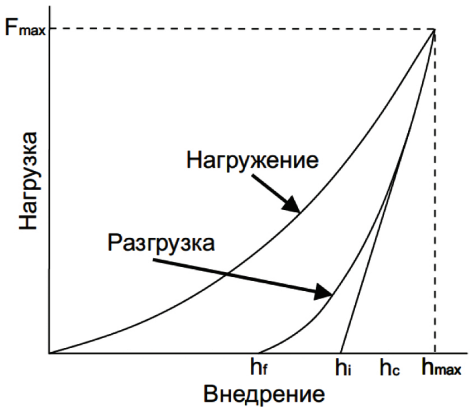


Рисунок 3.
Кривая F(h) зависимости «нагрузка – внедрение» [4]

Твердость индентирования определяется по следующей формуле:

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_{\text{отп}}} \qquad (1)$$

где F_{max} - максимальная нагрузка на материал,

$A_{отп}$ - площадь проекции отпечатка.

Анализ кривой *F(h)* осуществляется согласно предложенному Оливером и Фарром методу [2]. Для расчета твердости используется описанная выше формула.

Данный метод является достаточно распространенным благодаря его теоретической обоснованности и высокой точности при экспериментальной апробации. Измерения проводятся просто и оперативно.

Однако данный метод ограничен ввиду трудности безобразцового определения твердости. Оборудование, используемое при его реализации, является стационарным и крупногабаритным и применяется только в лабораторным условиях. С целью устранения данных недостатков был разработан метод динамического ударного индентирования (ДИ).

Метод ДИ сочетает в себе достоинства методов Либа и инструментального индентирования и исключает некоторые их недостатки. Данный метод состоит в том, что при вдавливании индентора в испытуемую поверхность материала образуются пластическая и упругая деформации, которые и являются мерой физико-механических характеристик материала. С развитием цифровой техники и появлением более точной измерительной базы, метод динамического индентирования стал весьма востребованным.

Данный метод относится в неразрушающему контролю, так как деформирование материала происходит в нано- или микрообъеме, что не приводит к изменению свойств и повреждению образца материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время стали и сплавы являются самыми распространенными материалами, используемыми в машино- и приборостроении. Вследствие этого задача определения их физико-механических свойств, а в частности твердости, от которой можно перейти к другим характеристикам, является весьма важной. Классические методы определения твердости не позволяют проводить измерения оперативно и безобразцово, то есть на детали в процессе эксплуатации. Поэтому актуальным является метод динамического индентирования, объединивший в себе метод измерения по Либу и метод кинетического индентирования. Данный метод стандартизован (ГОСТ 56424 – 2015) и в госреестр внесены приборы для его реализации. Но данный метод и средства для реализации нуждаются в усовершенствовании.

Список литературы:

1. *M.Tietze, M.Kompatscher*, Predicative Hardness Testing for Production Control and Materials Design, IMEKO-TC5-2002-027, 2002.

2. *Oliver W.C., Pharr G.M.* An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / Journal Materials Research, Vol.7, N 6, June 1992, pp.1564-1583

3. *S. Frank*, Innovations in Portable Hardness Testing, NDT.net Vol. 06 No. 09 - Sep 2001.

4. *Турченко А.В*. Определение показателя степени кривой разгрузки при кинетическом индентировании // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. №3. С. 17-20.

УДК 621.794.4

российский индекс научного цитирования Science Index

ВОЗМОЖНОСТИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ СТЕКЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ДИОДНОЙ СИСТЕМЫ

ОДИНОКОВ С.Б., САГАТЕЛЯН Г.Р., БУГОРКОВ К.Н., КОВАЛЕВ М.С.

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

E-mail: Milan85@yandex.ru, h_sagatelyan@mail.ru

Аннотация: *В статье представлены результаты экспериментальных исследований травления силикатного стекла с использованием высокочастотной диодной системы RIE-300. Был реализован полный факторный эксперимент 23 с использованием в качестве факторов эксперимента расстояния от образца до диэлектрического окна, контактирующего со спиральной антенной, продолжительности кислородной очистки, продолжительности плазмохимического травления (ПХТ). По результатам экспериментальных работ составлено уравнение регрессии, проведён анализ полученных коэффициентов регрессии. Достигнута скорость травления 10 нм/мин. Полученная в центре плана эксперимента скорость травления весьма близка к рассчитываемой по формуле уравнения регрессии.*

Ключевые слова: плазмохимическое травление, силикатное стекло, производительность, уравнение регрессии.

POSSIBILITIES OF PLASMA-CHEMICAL ETCHING OF GLASS USING A HIGH-FREQUENCY DIODE SYSTEM

ODINOKOV S.B., SAGATELYAN H.R., BUGORKOV K.N., KOVALEV M.S.

FGBOU VO Bauman Moscow State Technical University, Moscow

E-mail: Milan85@yandex.ru, h_sagatelyan@mail.ru

Abstract: *The article presents the results of experimental studies of silicate glass etching using the high-frequency diode system RIE-300. A full factorial experiment 23 was carried out using, as experimental factors, the distance from the sample to the dielectric window contacting with the helical antenna, the duration of oxygen purification, and the duration of plasma chemical etching (PCT). Based on the results of the experimental work, the regression equation was compiled, and the obtained regression coefficients were analyzed. The etching rate of 10 nm / min was achieved. The etching rate obtained in the center of the experimental plan is very close to the regression equation calculated by the formula.*

Keywords: plasma chemical etching, silicate glass, productivity, equation of regression.

ВВЕДЕНИЕ

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 10х10 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.

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.

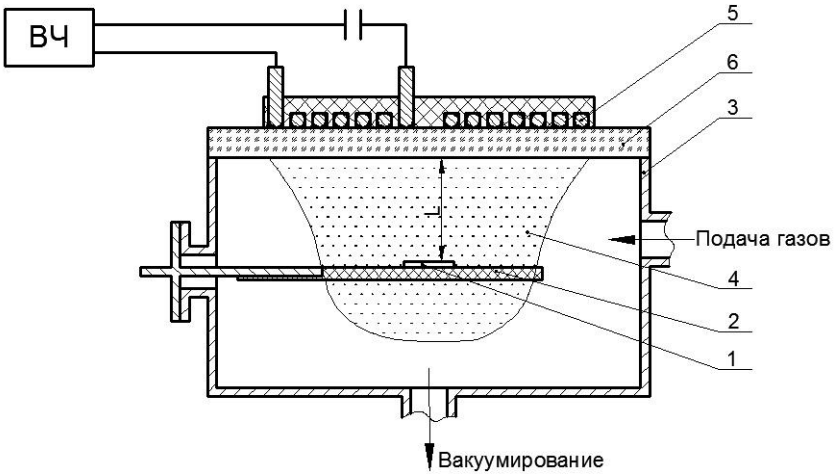


Рисунок 1.
Схематичное устройство установки плазмохимического травления RIE-300

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_{O2} = 50 см^3/мин; расход аргона C_{Ar} = 50 см^3/мин. При собственно плазмохимическом травлении – расход элегаза C_{SF6} = 100 см^3/мин; расход кислорода C_{O2} = 40 см^3/мин; расход аргона C_{Ar} = 35 см^3/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; $t_{пр}$ = 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 напряжённостей электромагнитного поля, что, в свою очередь, объясняется интенсификацией реакций полимеризации «высадки». В целом же в областях электромагнитного поля, характеризуемых 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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., Доскалович Л.Л. Дифракционные оптические элементы в устройствах нанофотоники. – Компьютерная оптика, т. 33, № 4, 2009. – С. 352 – 368.

2. Совершенствование технологического процесса изготовления пластины маятникового акселерометра / 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--p1ai/index.php?information_id=7&route=information / information

6. Расчёт, конструирование и изготовление дифракционных и голограммных оптических элементов: учебное пособие / С.Б. Одиноков, 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-produktcii.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.

УДК 535.4: 681.7.02-04:681.787

российский индекс научного цитирования Science Index

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» (АО ЛЗОС), г. Лыткарино, Московская область

E-mail: lastro@lzos.ru

Аннотация: *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.*

Ключевые слова: оптика телескопов, изготовление оптики, контроль оптики, асферические зеркала.

EXECUTION OF WORK PACKAGE ON THE RECONSTRUCTION AND IMPROVEMENT OF OPTICAL CHARACTERISTICS OF BTA TELESCOPE PRIMARY MIRROR

MAGOMED A. ABDULKADYROV, SERGEY P. BELOUSOV, NIKITA V. VLADIMIROV, NIKOLAY S. DOBRIKOV, ALEKSANDR N. IGNATOV, VLADIMIR E. PATRIKEEV, VITALIY V. PRIDNYA, ANDREY V. POLYANCHIKOV, ALEKSANDR P. SEMENOV, YURIY A. SHAROV

JSC «Lytkarino Optical Glass Factory» (LZOS), Lytkarino, Moscow region, Russia

E-mail: lastro@lzos.ru

Abstract: *LZOS, JSC has completed work package on the reconstruction and improvement of optical characteristics of BTA Telescope 6-m primary mirror (Bolshoi Azimuth Telescope). In the course the work package performance, LZOS developed and implemented a complex of manufacturing methods and metrological tools, which allowed achieving the required quality and precision of the primary mirror fabrication, with root mean square (RMS) deviation of 0.3 wavelengths in the optical range.*

Keywords: telescopes optic, optical fabrication, optical testing, aspherical mirrors.

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной темы являлось выполнение комплекса работ по формообразованию рабочей поверхности главного зеркала БТА (ГЗ), восстановлению и улучшению ее оптических характеристик.

Комплекс работ включал:

– 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 0,3λ, (где λ=632,8 нм) и равномерно распределенной по поверхности шероховатости не более Rq 3 нм;

– устранение располировок в местах вклеек и завалов по краям зеркала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ РАБОТ

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 **λ**/50, для λ = 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, то есть устранена юстировочная кома.

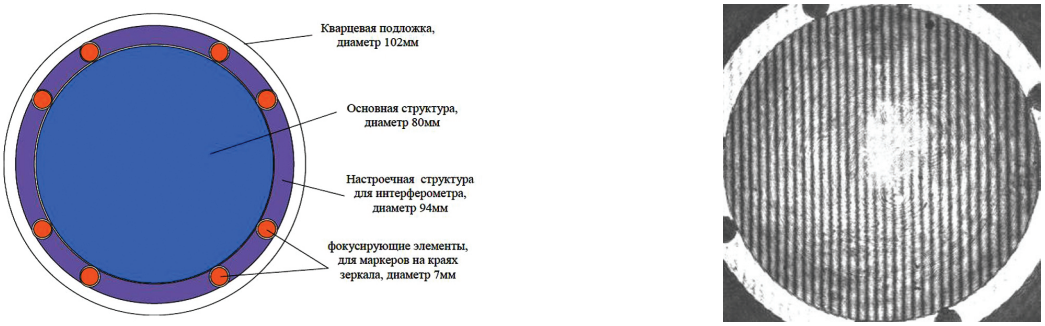


Рисунок 1.
Схематическое изображение корректора волнового фронта и интерферограмма волнового фронта корректора с имитатором

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.

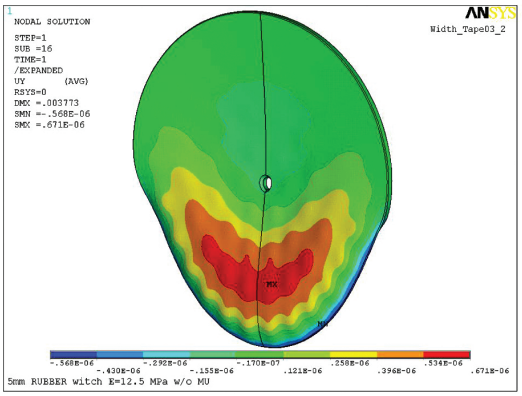


Рисунок 2.
Деформация рабочей поверхности ГЗ БТА в ленте. RMS=0,56λ, P-V=3,6λ

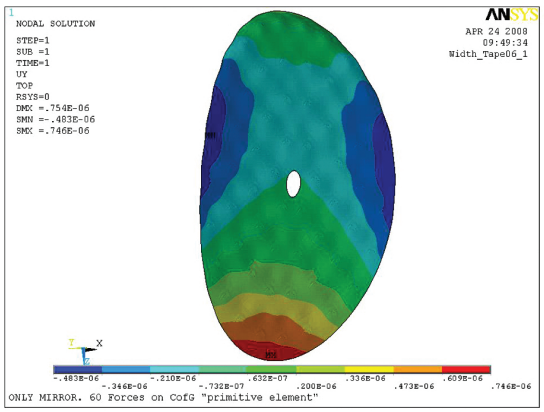


Рисунок 3.
Деформация рабочей поверхности ГЗ БТА в оправе. RMS=0,46λ, P-V=2,5λ

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 0,5λ. 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° к горизонту.

Отклонения отраженного от рабочей поверхности волнового фронта в результате деформаций в штатной оправе при вертикальной ориентации оси RMS=0,08λ, P-V=0,37λ.

Отклонения отраженного от рабочей поверхности волнового фронта в результате деформаций в штатной оправе при горизонтальной ориентации оси RMS=0,46λ, P-V=2,52λ.

Отклонения отраженного от рабочей поверхности волнового фронта в результате деформаций в штатной оправе при ориентации оси под 45° RMS=0,371λ, P-V=2,093λ.

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 3λ (рис. 4-7).

По результатам фрезерования рабочей поверхности произошло уменьшение массы зеркала БТА. Измеренная масса составила 40621 кг.

Микрошероховатость, достигнутая рабочей поверхности зеркала БТА по Rq менее 1,02 нм.

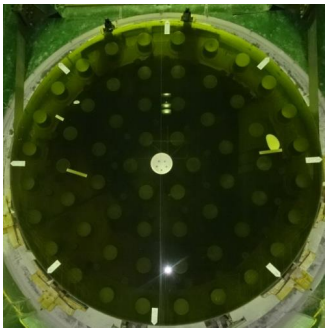


Рисунок 4.
Вставки на поверхности зеркала

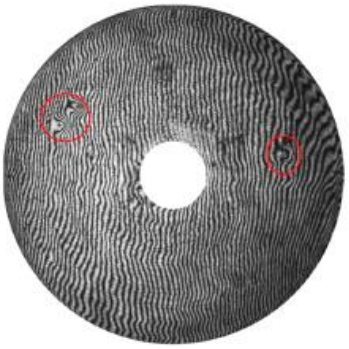


Рисунок 5.
Зоны располировок на интерферограмме

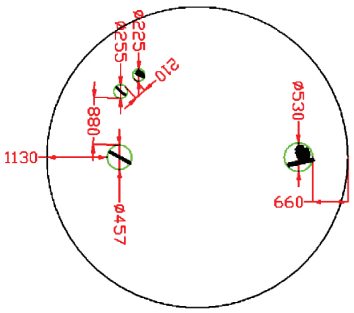


Рисунок 6.
Заплатки на поверхности детали, дающие располировки, составляли 1,68% по площади, располировки 9,8% на волновом фронте

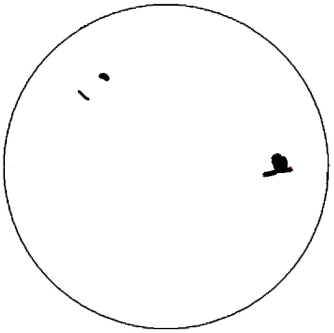


Рисунок 7.
Заплатки на поверхности детали, дающие располировки, составляют 0,3% по площади, располировки на волновом фронте 0,7%

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°, -60°, +90°, +120°, -120° и 180°. Суммарные отклонения волнового фронта, вызванные деформацией в ленте, составили по регулярным составляющим:

астигматизм $A = 1{,}5\lambda / j_A = 30{,}1°$,

триангулярная кома $Tr = 3{,}2\lambda / \varphi_{Tr} = -3{,}1°$,

квадратичный астигматизм $Q = 1{,}4\lambda / \varphi_Q = -18{,}4°$.

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=0,31λ, P-V=3,0 λ.

Значение функции точки рассеивания для ГЗ БТА с обновленной рабочей поверхностью меньше по отношению к действующему и составляет 0,31 угл. сек (рис. 8).

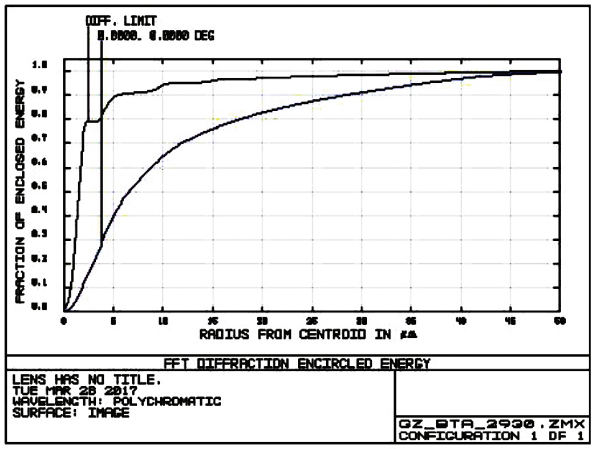


Рисунок 8.
Энергия 80% концентрируется в кружке диаметром 36 мкм. ФТР (функция точки рассеивания) составляет 0,31 угл. сек.

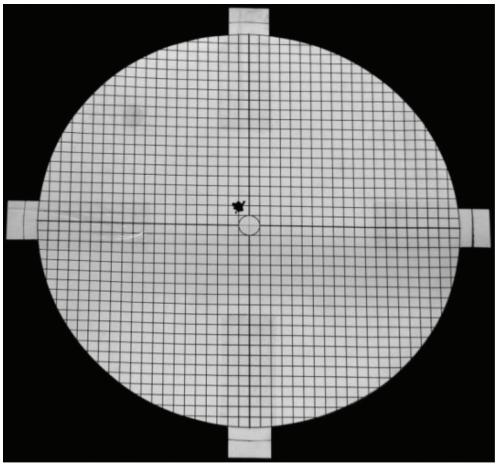


Рисунок 9.
Определение смещения оптической оси относительно геометрического центра зеркала. Шаг сетки 10 мм. Смещение 22 мм

Как уже отмечалось, на настроечной 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).

В процессе проведения измерений параметров зеркала также было измерено положение центра масс зеркала. Измерения производились с использованием лазерного трекера API Tracker3. На зеркало были наклеены 4 марки, диаметром 0,5’=12,7 мм (рис.10-11, точки 3,4,5,6) на диаметре 5950 мм. На центры осей подвеса с двух сторон на каждой наклеены 4 марки, диаметром 0,5’=12,7 мм (рис.10-11, точки 1,2,12,13). На основание станка наклеены магнитные площадки под диаметр измерительной марки 1,5’=38,1 мм для реализации опорных точек (рис.10-11, точки 7,8,9,10,11). Зеркало вывешено в горизонтальное положение.

Принципиальная схема измерений показана на рис. 12. Трекер установлен справа от зеркала. Измерены опорные точки (7,8,9,10,11). Построена опорная система координат. Измерены точки, лежащие на асферичекой поверхности (3,4,5,6). Измерены правые точки осей подвеса (1,2). Трекер установлен слева от зеркала. Измерены опорные точки (7,8,9,10,11). Левая и правая опорные системы совмещены. Измерены правые точки осей подвеса (12,13).

По результатам измерений найдена искомая величина. Фактический центр масс: 253,1 мм от вершины.

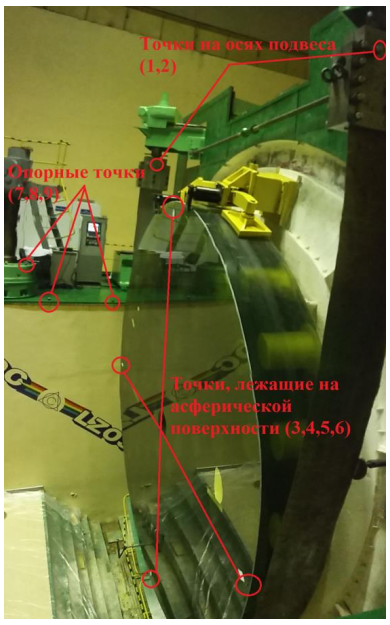


Рисунок 10.
Измерение центра масс, вид справа

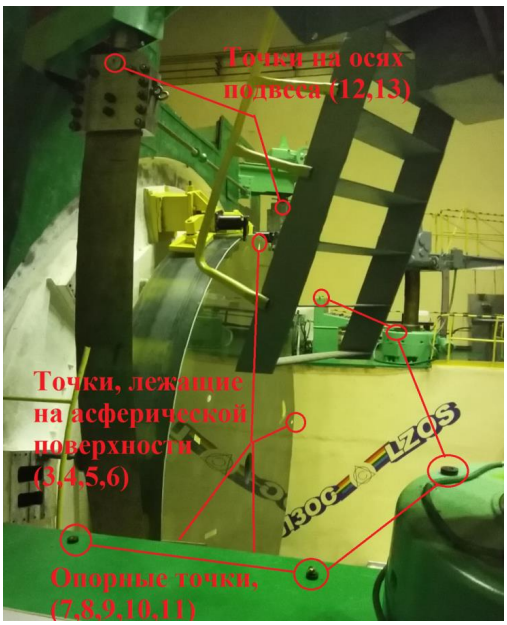


Рисунок 11.
Измерение центра масс, вид слева

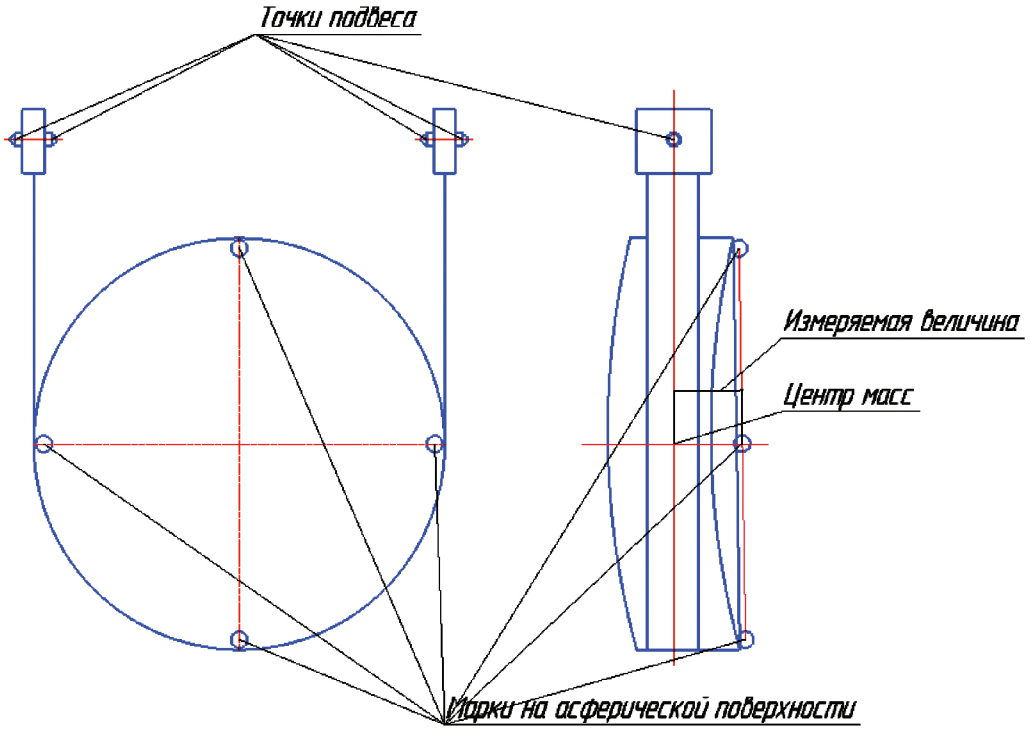


Рисунок 12.
Схема измерений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выводы по результатам аттестации формы поверхности зеркала:

- по результатам серии контролей волнового фронта отраженного от рабочей поверхности зеркала БТА среднеквадратичное отклонение составляет по RMS = 0,3λ (λ=632,8 нм), по размаху P-V=3,0λ,
- 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.

УДК 5535.4: 681.7.02-04:681.787

российский индекс научного цитирования Science Index

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВНЕОСЕВЫХ МАТРИЦ ИЗ АСТРОСИТАЛЛА С АСФЕРИЧНОСТЬЮ до 20 мм ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СЕГМЕНТОВ ЗЕРКАЛА КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА

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» (АО ЛЗОС), г. Лыткарино, Московская область

E-mail: lastro@lzos.ru

Аннотация: *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.*

Ключевые слова: оптика телескопов, изготовление оптики, контроль оптики, асферические зеркала.

FABRICATION OF OFF-AXIS MATRIXES WITH ASPHERICITY UP to 20 mm FROM ASTROSITALL FOR THE PRODUCTION SPACE TELESCOPE MIRROR SEGMENTS

ALEKSANDR P. SEMENOV, MAGOMED A. ABDULKADYROV, SERGEY P. BELOUSOV, NIKOLAY S DOBRIKOV, ALEKSANDR N. IGNATOV, ALEXEY B. MOROZOV, VLADIMIR E. PATRIKEEV

JSC «Lytkarino Optical Glass Factory» (LZOS), Lytkarino, Moscow region, Russia

E-mail: lastro@lzos.ru

Abstract: *Technology using computer-controlled automatic system and a set of special instruments, which allows aspherization of astronomical and space telescopes off-axis large-sized optical elements with deviation from the nearest sphere up to 20 mm, was developed. Computer-controlled process of optical surface shaping is carried out at all stages – milling, grinding and polishing.*

Keywords: telescopes optic, optical fabrication, optical testing, aspherical mirrors.

ВВЕДЕНИЕ

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. Допустимые 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.

Таблица 1.

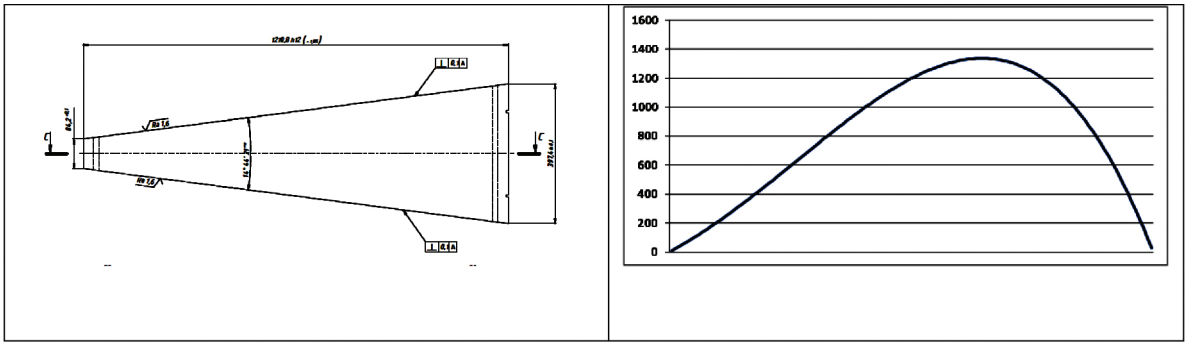
Параметры	Главное зеркало	Вторичное зеркало
Вершинный радиус, мм	-5 600	-275
Коническая константа, мм	-1	-1,1472778
Стрелка прогиба, мм	-3 214,3	-157,1
Световой диаметр, мм	10 000	600
Осевое расстояние, мм	-2 667,2	

ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ СЕГМЕНТОВ

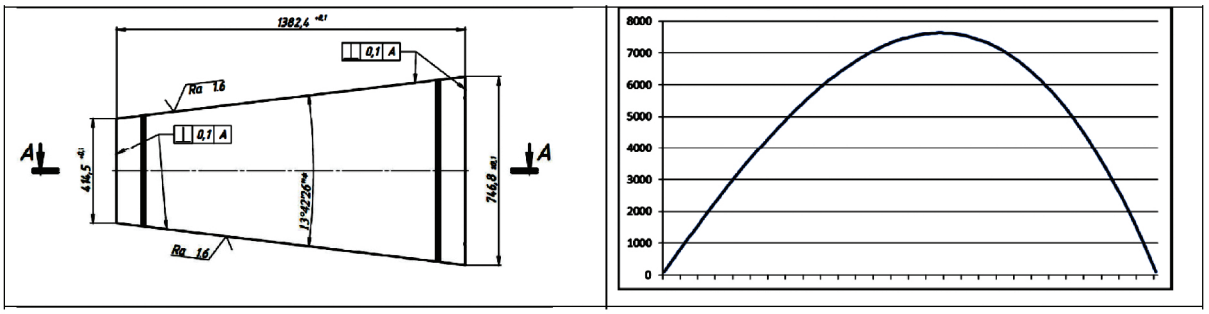
Параметры главного и вторичного зеркал приведены в таблице 1, а параметры сегментов и величина асферичности на рис. 1.

На матрице сразу формировалась выпуклая внеосевая асферическая поверхность. Работа выполнялась путем фрезерования кольцевым алмазным инструментом под управлением ЧПУ. Заготовка детали представляет собой трапецеидальную призму, а конечная рабочая поверхность является внеосевым параболоидом (рис. 2). Очевидно, что форму внеосевого параболоида можно создать только с помощью фрезерного станка с числовым программным управлением. Однако даже создание управляющей программы для такой нестандартной поверхности является непростой задачей. Возникают две основные проблемы. Во-первых, крайне неравномерный припуск по детали, на углах детали необходимо снять порядка 30 мм материала, тогда как по центру детали припуск составляет около 1 мм. Во-вторых, данная форма поверхности приводит к тому, что инструмент работает практически одной точкой, а это значит, что в управляющей программе необходимо прописать координаты всех точек по поверхности.

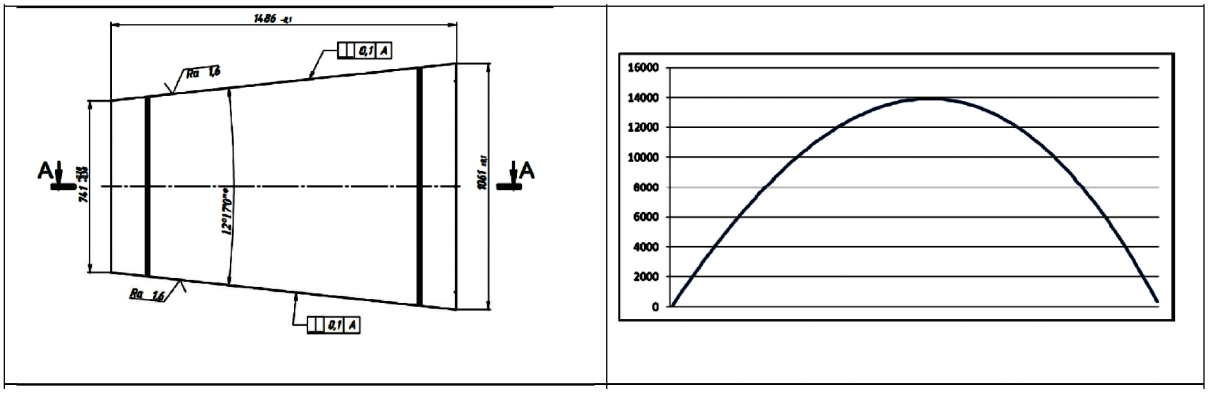
Первая проблема решается разбиением процесса обработки на два этапа. На первом этапе происходит грубая обдирка с большим съёмом материала по простой траектории. Инструмент снимал до 2 мм за проход. Результатом первого этапа является серия ступенек на детали, повторяющих форму параболоида (рис. 2). На втором этапе формируется уже непосредственно требуемая поверхность. Это достигается за счёт мелкого шага фрезы и движения инструмента по радиусу секторов. Съем не превышал 0,5 мм. Очевидно, что чем меньше шаг между соседними проходами инструмента, тем более гладкая поверхность получится. Однако, вместе с качеством поверхности также увеличивается и время, необходимое для обработки. Поэтому шаг подбирается таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить необходимое каче-



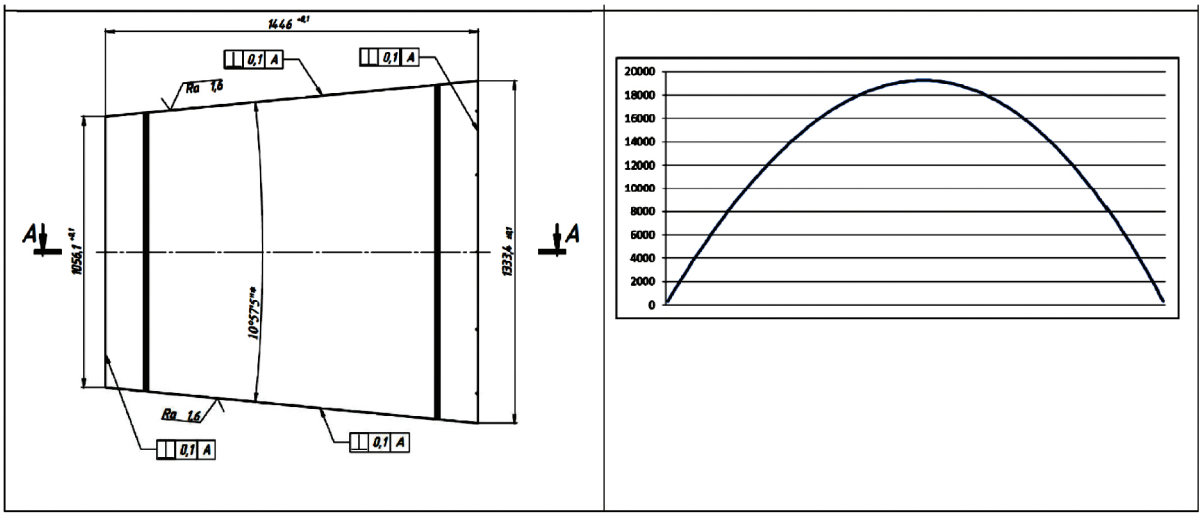
Асферичность 1,3 мм



Асферичность 7,6 мм



Асферичность 13,9 мм



Асферичность 19,3 мм

Рисунок 1.

Параметры асферических сегментов

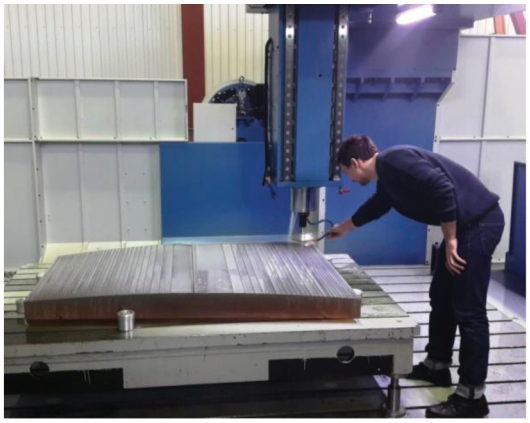


Рисунок 2.
Программно-управляемое фрезерование внеосевой выпуклой асферической поверхности матрицы

ство поверхности перед шлифовкой детали, а с другой – чтобы время обработки не превышало приемлемой величины.

Вторая проблема, связанная с необходимостью задания в управляющей программе координат практически всех точек поверхности, решается использованием CAD и CAM программного обеспечения. Сначала необходимо по чертежам создать трёхмерные модели конечной детали и заготовки в CAD программе. Далее эти модели загружаются в CAM программное обеспечение. И уже с помощью CAM программы происходит расчёт необходимых координат траектории инструмента и, соответственно, генерация кода управляющей программы (рис. 3). Сложность заключается в том, что все CAM программы рассчитаны на обработку дерева или металлов и не учитывают такие особенностей обработки стекла, как траектория захода инструмента на деталь, сочетание конкретных траекторий резания с определённым съёмом материала и некоторые другие. Таким образом, возникает необходимость вручную править код управляющей программы с учётом опыта обработки стеклокерамики.

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.

КОНТРОЛЬ АСФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

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 (рис. 4).

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.

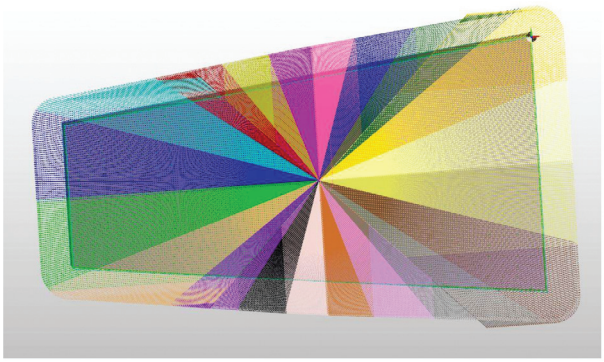


Рисунок 3.
Траектория движения инструмента при чистовой обработке

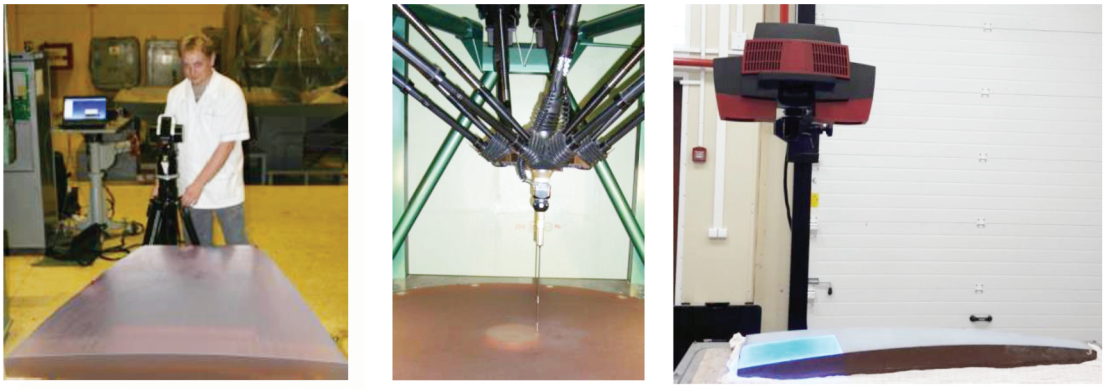


Рисунок 4.
Проведение контроля формы поверхности различными методами: с помощью лазерного трекера, измерительной машины КИМ-1400 и измерительного комплекса ATOSIII

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.

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

Система ATOS III 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.

Первоначально выполняются повороты измеренных массивов координат таким образом, чтобы получить требуемую ориентацию детали в пространстве. Поворот осуществляется вокруг всех трех осей, (например оси Z на рис. 5).

Далее отклонения по оси Z сопоставляются с массивом данных построенной модели отклонений с заданными теоретическими параметрами.

Тем самым мы можем определить фактические отступления формы поверхности сегмента от требуемой формы (рис. 6).

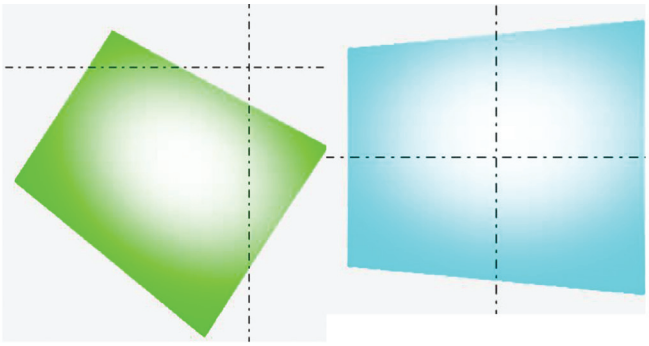


Рисунок 5.
Разворот измеренных координат вокруг оси Z

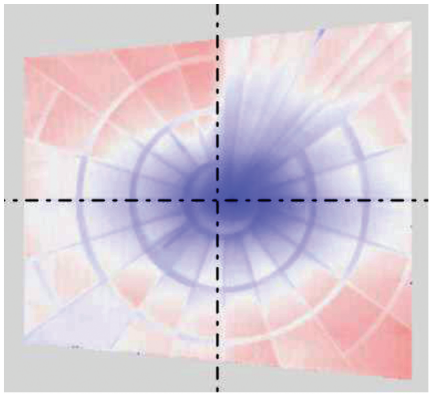


Рисунок 6.
Отклонения формы поверхности от заданной формы

Далее возможен процесс оптимизации параметров поверхности, чтобы получить более близкий к измеренным данным параболоид, но с радиусом, отличным от номинального.

Такой анализ позволяет детально исследовать полученную форму поверхности и выбрать оптимальный путь дальнейшего формообразования.

Точность измерений около 10 мкм.

ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМАЯ ШЛИФОВКА ПОВЕРХНОСТИ

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 пятаками 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 съем. 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. 7) 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. 8). Этот профиль съема вводится в программу для расчета сеанса обработки асферической поверхности.

Когда была достигнута асферическая поверхность требуемого качества, она была отполирована. Полировка также проводилась набором малых инструментов (рис. 9).

Например, на матрице типа 1 (рис. 11) 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. 10 показана панель из углепластика на матрице. На рис. 11 представлена шлифовка сегмента 3 с асферичностью 14 мм. На рис. 12 представлены элементы главного зеркала из углепластика, полученные с использованием матрицы типа 1.

С использованием компьютерно-управляемого фрезерования удается получить точность менее 100 мкм. Сегмент 3-го типа: P-V = 106,6 мкм, RMS =17,1 мкм.

Рисунок 7.
Шлифующий инструмент

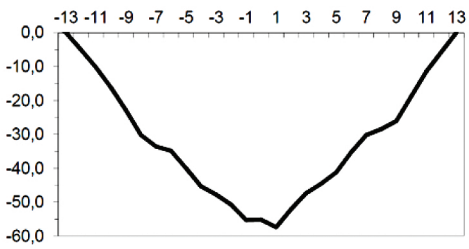


Рисунок 8.
Профиль съема под инструментом в мкм

Рисунок 9.
Финишная доводка матрицы

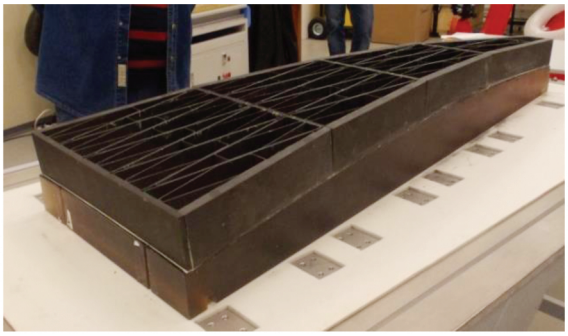


Рисунок 10.
Панель из углепластика на матрице

С использованием компьютерно-управляемого шлифования точность формы уменьшается. Например сегмент 3: P-V = 48 мкм, RMS = 5,3 мкм.

На финишной стадии компьютерно-управляемого процесса шлифования и полирования для контроля сегмента используется координатно-измерительная машина КИМ-1400 и измерительный комплекс ATOS III. Проведение измерений на сегменте типа 1: P-V = 5,73 мкм, RMS = 1,07 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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).

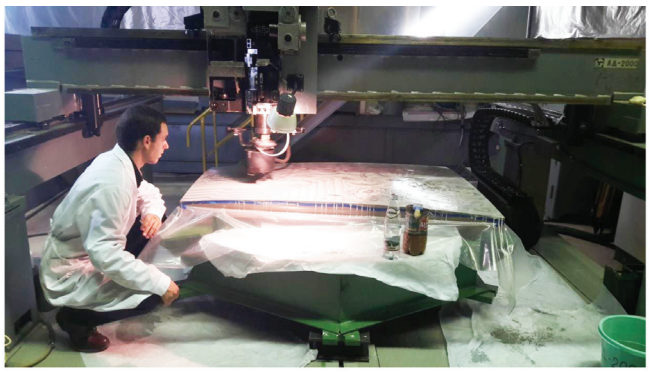


Рисунок 11.
Шлифование сегмента 3 с асферичностью 14 мм

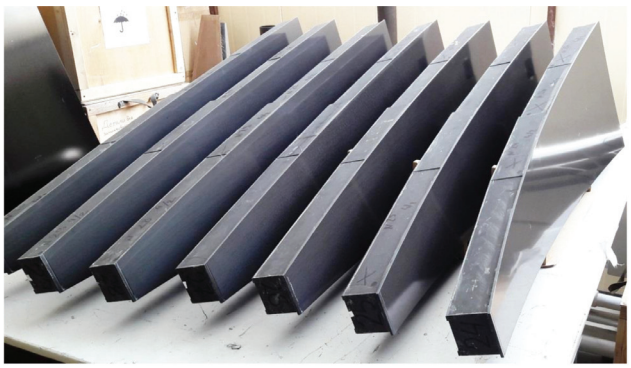


Рисунок 12.
Элементы главного зеркала из углепластика

УДК 62-7

АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ ПИТАНИЯ RFID ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

САРАЙКИН Д.С. - оператор 3 научной роты КВ ВКС РФ

АО «Корпорация «Комета»», г. Москва

E-mail: ravinggus@mail.ru

Сарайкин Д.С.

Аннотация: *В статье рассматриваются способы обеспечения электропитания RFID датчиков давления, используемых для контроля целостности уязвимой поверхности. Подробно исследованы достоинства и недостатки каждого метода подвода необходимой для работы электроэнергии к RFID датчикам давления, при использовании их в сетях обнаружения малых значений изменения давления. Сделаны выводы и приведены рекомендации по электропитанию рассматриваемых RFID датчиков давления.*

Ключевые слова: RFID, датчик давления, сети, корпус, кремний.

ANALYSIS AND COMPARISON OF POWER METHODS OF RFID PRESSURE GAUGES

SARAYKIN D.S.

JSC «Corporation «Kometa»», Moscow

E-mail: ravinggus@mail.ru

Abstract: *TThe article deals with the fundamentals of quality management of the military-industrial complex of the Russian Federation. The share of the world market for the export of military products of the leading countries, to which the Russian Federation belongs, is investigated, as well as the volume of production of enterprises of the military-industrial complex by branches of industry. Some peculiarities of ensuring the national security of the Russian Federation have been revealed, which adversely affect the development of the country's defense-industrial complex, and also presents ways to address them.*

Keywords: RFID, pressure sensor, networks, haul, silicon.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время налажено производство датчиков давления, чувствительными элементами которых являются интегральные кремниевые преобразователи, использующие свойства монокристаллического кремния [1]. От аналогов такие датчики выгодно отличаются малыми размерами, высокой чувствительностью (благодаря уникальным свойствам упругости монокристаллического кремния) к малейшим значениям давления и возможностью выстраивания их в сеть для наблюдения за объектами со значительной площадью наблюдаемой поверхности. Из весомых недостатков можно выделить хрупкость кремниевых датчиков. Использования таких датчиков позволяет контролировать надежность конструкций, уязвимых к дефектам из-за малейших перепадов давления [2].

Использование технологии RFID (Radio Frequency IDentification) в конструкциях с кремниевыми датчиками позволяет считывать данные на расстоянии, не прибегая к проводным соединениям и любым физическим контактам считывателя данных и хрупкого датчика.

Целью данной работы является описание методов питания RFID сенсоров, проведение их оценки и предложены наиболее рациональные решения проблемы. Данная работа является актуальной, так как существует необходимость в эффективных методах слежения за целостностью конструкций с помощью сенсоров.

КЛАССИФИКАЦИЯ RFID-МЕТОК ПО ИСТОЧНИКУ ПИТАНИЯ

Существует три основных способа питания RFID-меток:

Пассивное питание

Наиболее популярный метод питания RFID устройств, при котором полностью отсутствует собственный внутренний источник электроэнергии [3]. Для питания применяется электроэнергия, индуцируемая полем электромагнитного приемопередатчика (рис. 1). Индуцируемого в цепи системы тока необходимо и достаточно для обеспечения работы кремниевого CMOS-чипа и отправки информационного сигнала считывателю.

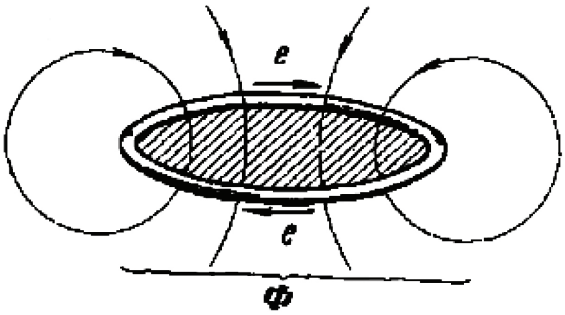


Рисунок 1.
Индуцирование тока магнитным полем

Такие метки, как правило, встраивают в тонкие наклейки, используемые на упаковках продуктов массового производства. Также такие чипы можно встраивать под кожу живым организмам, благодаря миниатюрным реализациям близким к размеру рисовой крупы (производства VeriChip).

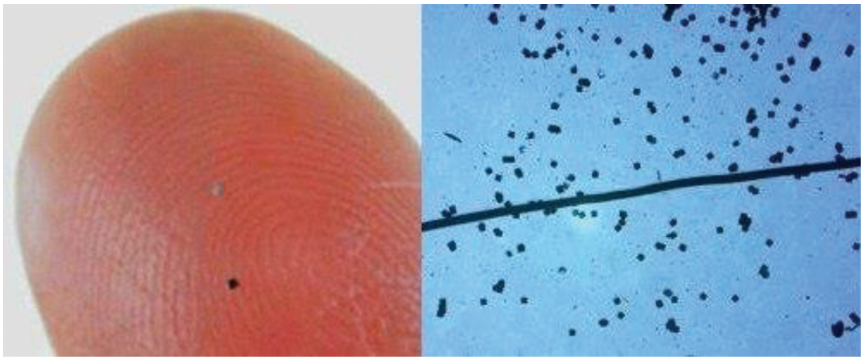


Рисунок 2.
RFID чип компании Hitachi

К RFID, применяемых в датчиках давления, можно отнести RFID сенсоры компании Hitachi. В 2006 Hitachi представила чип (рис. 2) на новой технологии под названием μChip (мю чип). Толщина такого чипа не более 8 мкм, с квадратной формой, площадью 0,023 мм^2 и дальностью передачи информации около 30 см. При такой степени интеграции возможно изготовление чипа по технологии «кремний на изоляторе». μChip способен отправлять 128-битную посылку в виде ID номера, записанного в процессе изготовления микросхемы. Этот номер невозможно изменить в готовом чипе, благодаря чему устройство надежно, защищено от постороннего воздействия и обладает гарантированно уникальным номерным идентификатором. Существуют модификации этого чипа с возможностью незаметно встроить в тонкий лист [4].

Благодаря компании Alien Technology цена на RFID метки с данным типом питания снизилась. Этому способствовала разработка технологии массового параллельного производства. В результате разработки меток данного типа электропитания с использованием наиболее эффективных технологических процессов получается производить более от 2 до 70 миллионов кремниевых пластин в час. В таких технологических процессах монтаж антенны и чипа (рис. 3) – самая продолжительная и дорогая стадия производства. Вместе со стандартизацией, в совокупности такой подход к массовому производству позволил RFID меткам с пассивным методом питания стать наиболее дешевым вариантом на рынке.

Активное питание

RFID метки с данным типом питания независимы от приемопередатчика и получают электроэнергию из собственной батарейки (рис. 4). Благодаря этому они считываются на большем расстоянии и могут быть усовершенствованы дополнительной электронной начинкой. Но активные устройства имеют значительные габариты и конечное время работы на одном заряде батарейки.

Использование собственного источника энергии обеспечивает надежность и точность при считывании большого пакета данных. Сигнал от таких меток может распространятся в сложных для радиочастотного сигнала средах, например, в металлах и воде. Некоторые дорогие и громоздкие RFID метки с активным питанием способны передавать сигнал на расстояниях более 100м, при заряде батареи на 10 лет [5].

Полупассивное питание

RFID метки на основе полупассивные можно также назвать полуактивными. Больше близки к пассивным, но имеют отдельную батарейку исключительно для питания чипа. Дальность обмена информацией зависит исключительно от чувствительности приемника. Как правило, такие метки работают на большем расстоянии и обладают лучшими техническими параметрами.

Такие метки дороже пассивных и бесполезны при разряде батарейки, так как она встроена в схему с отсутствием возможности простой замены.

Рисунок 3.
Чип с антенной RFID метки

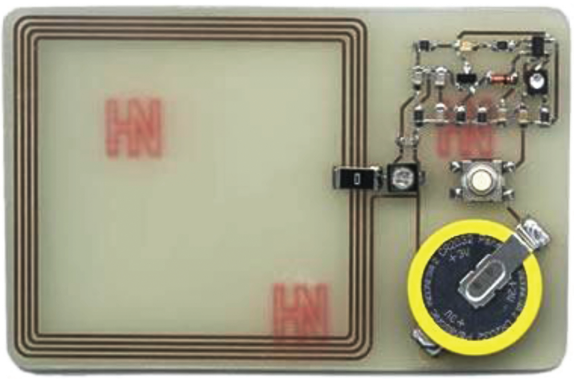


Рисунок 4.
Устройство на основе RFID с батарейкой в правом нижнем углу

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате изучения метода питания RFID меток были описаны все возможные методы питания устройства. Подробно описаны достоинства и недостатки, приведены относительные сравнения между ними.

Для использования в RFID датчиках давления с целью контроля поверхности выгодней всего использовать пассивный метод питания. Этому способствует дешевизна и малые размеры, что позволяет выстроить метки в практически любую сеть. Такие сети не будут сообщать об изменении давления в реальном времени, но их можно использовать при плановых проверках, например, обшивки самолета или кабины пилота при техническом обслуживании с помощью считывателя.

Также можно использовать полупассивные метки. В этом случае потребуются плановые замены RFID датчиков в сети. Стоить такие сети будут дорого, кроме того потребуются регулярные замены.

От активного питания следует воздержаться из-за крайней нерентабельности. Они позволят контролировать поверхность в реальном времени, но требуют регулярных плановых проверок.

Таким образом можно сделать вывод, что лучше всего использовать пассивный (или полупассивный в редких случаях) метод питания RFID меток при использовании в сетях RFID датчиков давления.

Список литературы:

1. *Сергеева Н.А, Цивинская Т.А., Шахнов В.А.* Контрольно-измерительные МЭМС с использованием малогабаритных чувствительных элементов из монокристаллического кремния.

2. *Аваева Л.Г., Сергеева Н.А. , Милешин С.А., Цивинская Т.А.* Разработка чувствительных элементов из монокристаллического кремния для контрольно-измерительной техники.

3. *Сандип Лахири*. RFID. Руководство по внедрению = The RFID Sourcebook / Дудников С.. — М.: Кудиц-Пресс, 2007. — 312 с.

4. *Маниш Бхуптани, Шахрам Морадпур*. RFID-технологии на службе вашего бизнеса = RFID Field Guide: Deploying Radio Frequency Identification Systems / Троицкий Н.. — Москва: «Альпина Паблишер», 2007. — С. 70. — 290 с.

5. *М. Власов*. RFID: 1 технология – 1000 решений: Практические примеры использования RFID в различных областях. — М.: Альпина Паблишер, 2014. — 218 с.

УДК 535:530.182

российский индекс научного цитирования Science Index

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., ЩЕБЕТОВА Н.И.

АО «Национальный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика»
***АО «Швабе – исследования»**

E-mail: np_andreeva@mail.ru; v-rogalin@mail.ru; kmitin67@mail.ru

Аннотация: *Обобщен цикл работ, проведённых в АО «НЦЛСК «Астрофизика» по нелинейно-оптическим технологиям преобразования лазерного излучения с целью расширения спектрального диапазона. Исследованы различные схемы параметрических генераторов света (ПГС) на основе кристаллов: тиогаллата серебра ($AgGaS_2$); ниобата лития ($LiNbO_3$); тиогаллата кадмия - ртути ($Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$); BBO ($\beta - BaB_2O_4$); периодически поляризованной структуры из ниобата лития, легированного оксидом магния (PPMgO: LN) и лазеров на вынужденном рассеянии света (ВКР) на основе соединений вольфраматов и молибдатов щелочноземельных металлов и свинца со структурой шеелита, а также на монокристалле алмаза.*

Ключевые слова: лазер, параметрическая генерация света (ПГС), генератор на вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР), PPMgO: LN, вольфрамомолибдаты бария и стронция, алмаз.

NONLINEAR OPTICAL TECHNOLOGIES FOR CREATING RADIATION SOURCES TUNABLE IN THE UV, VISIBLE AND IR RANGES

ANDREEVA N.P., BARASHKOV M.S., EVSTIGNEEV V.L., KRYMSKIIM.I., MITIN K.V.*, ROGALIN V.E., SHCHEBETOVA N.I.

Joint-stock company National Center of Laser Systems and Complexes Astrophysica
***«Joint-stock company «Schwabe studies»**

E-mail: np_andreeva@mail.ru; v-rogalin@mail.ru; kmitin67@mail.ru

Abstract: *We generalized series of works, concerning nonlinear optical technologies for converting laser radiation with the aim of widening the spectral range, carried out in JSC "NCLSC" ASTROFIZIKA". Different versions of optical parametric oscillator (OPO) schemes, based on the following crystals: silver thiogallate ($AgGaS_2$); lithium niobate ($LiNbO_3$); cadmium-mercury thiogallate ($Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$);beta-barium borate BBO ($\beta - BaB_2O_4$); the periodically poled MgO doped congruent lithium niobate (PPMgO:LN); SRS lasers based on alkali-earth metals and plumbum tungstates and molybdates with scheelite structure as well as diamond monocrystal were experimentally realized and investigated.*

Keywords: laser, optical parametric oscillator (OPO), based on stimulated Raman scattering (SRS) laser, PPMgO:LN, tungstomolybdates of barium and strontium, diamond.

ВВЕДЕНИЕ

С появлением лазеров происходит постоянное развитие возможностей лазерной техники в направлении увеличения мощности, уменьшения расходимости, расширения спектрального диапазона и т.д. В идеале потребитель зачастую желает иметь прибор, в котором, повернув рукоятку, можно было бы изменять параметры генерируемого излучения.

Большинство традиционных коммерческих лазерных систем излучает на длинах волн 0,53; 0,69; 0,808; 1,06 и 10,6 мкм или на близких линиях широко используемых активных сред. В ряде случаев требуется использовать лазерное излучение других диапазонов. Поиски новых активных сред часто позволяют найти подходящий вариант, но зачастую это сопряжено со значительными технологическими проблемами.

После появления коммерчески доступных твердотельных лазеров на неодиме появилось большое количество разнообразных оптических приборов на основе этих лазеров. При их эксплуатации выяснилось, что, несмотря на жёсткие меры техники безопасности, наблюдается значительное число случаев поражения органов зрения работников. Этот факт стал побудительной причиной перевода ряда лазерных приборов, работающих в ближней ИК области спектра, в область ≥ 1,5 мкм. В этой области наблюдается высокое поглощение света в радужной оболочке глаза и в хрусталике, что резко снижает риск повреждения сетчатки глаза при несанкционированном попадании излучения в орган зрения. Ожог радужной оболочки, в отличие от сетчатки, гораздо легче поддаётся лечению. Были созданы твердотельные эрбиевые лазеры, излучающие в безопасном для глаз диапазоне, но их мощность оказалась недостаточной для ряда применений. Зачастую, перевод лазера в длинноволновый режим осуществляется путём использования нелинейно-оптических технологий [1].

Лазерные устройства, использующие перестраиваемое или мультиспектральное когерентное излучение ультрафиолетового (УФ), видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов, могут решать актуальные задачи в различных областях науки и техники. Это метрология, многоволновое дистанционное зондирование атмосферы, лазерная дальнометрия и локация, лазерная, в том числе, нелинейная спектроскопия, фотолиз, фотобиология, лазерно-индуцированная флуоресценция, системы экологического мониторинга, в частности определение опасных взрывчатых, отравляющих и наркотических веществ в контролируемом пространстве и т.д. [2].

Воздействие лазерного излучения на биологические структуры зависит от длины волны, излучаемой лазером, его энергии, плотности мощности и временных характеристик. Эффект может быть результатом фотохимического, фототермического, фотомеханического или фотоэлектрического взаимодействия в зависимости от длины волны лазера, плотности энергии и времени воздействия лазерного луча, что активно применяется в последнее время в биологии и медицине [3].

Перестраиваемое или мультиспектральное когерентное излучение применяется специальных системах - оптоэлектронное противодействие, преодолевающее спектральную защиту; мультиспектральное распознавание объектов и т.п. [4].

Возможности нелинейной оптики позволяют, в некоторой степени, создать лазер с расширенным спектральным диапазоном и перестройкой длины волны в широком диапазоне. В данной работе обобщены исследования нелинейно-оптических технологий, проведённых в АО «НЦЛСК «Астрофизика», посвящённые данной проблеме. Это параметрические генераторы света (ПГС) [5–12] и лазеры на вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР) [13–15]. В качестве источника оптической накачки обычно использовались твердотельные лазеры на кристаллах алюмоиттриевого граната (YAG), легированного редкоземельными элементами, излучающие в диапазоне длин волн $\lambda = 1{,}05 – 1{,}07$ мкм.

В основе функционирования лазерных систем на основе ПГС заложены следующие принципиальные отличительные особенно-

сти: 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.

Рассмотрим вкратце принцип действия ПГС [1]. Нелинейно-оптический кристалл облучается светом лазера накачки с круговой частотой $\omega_н$. В кристалле возникают две новые волны (параметрическая пара) – холостая и сигнальная с частотами $\omega_х$ и $\omega_с$, суммарная энергия которых равна энергии исходного фотона. Нелинейный кристалл помещается в резонатор, состоящий из зеркал, осуществляющих обратную связь для выбранных волн. Усиление в кристалле и, соответственно, генерация ПГС, возможны только для волн, для которых выполняются т.н. условия фазового синхронизма. Изменение показателей преломления нелинейно-оптического кристалла (или изменение положения оптической оси) приводит к тому, что будут выполняться условия фазового синхронизма для других частот, на которых будет возникать генерация.

Управление частотой $\omega_с$ и $\omega_х$ выходного излучения ПГС можно осуществлять:

- изменением положения оптической оси нелинейных кристаллов;
- изменением направления вектора накачки относительно оптической оси кристалла с помощью дефлектора;
- внутрирезонаторным селектором частоты;
- изменением длины волны накачки.

Другим нелинейным эффектом, позволяющим изменять длину волны излучения накачки, является вынужденное комбинационное рассеяние [16–21]. Преобразование на основе 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. На выходе можно получить одну, две, три, а иногда и более стоксовы спектральные компоненты. А при определённых условиях синхронизации и антистоксовы [20].

Однако явление ВКР сопровождается поглощением в кристалле части энергии преобразуемого излучения и, соответственно, ростом температуры, что приводит к изменению показателя преломления. Так как преобразование излучения в среде проходит неоднородно по объему, то и показатель преломления так же неоднороден. Такая среда внутри резонатора начинает искажать траектории проходящего через неё света, что значительно увеличивает потери всей системы и может приводить к срыву генерации ВКР лазера.

Ситуация осложняется тем, что практически все наиболее выгодные, с точки зрения эффективности ВКР процесса, кристаллы обладают очень малой теплопроводностью – всего несколько $Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$ [18–21]. Несмотря на применение различных систем охлаждения, средняя по времени мощность ВКР лазеров на сегодняшний день ограничивается несколькими ваттами - именно из-за описанной выше цепочки эффектов. Особняком в этом ряду стоит алмаз, обладающий не только очень высоким коэффициентом ВКР преобразования, но и самой высокой из известных материалов теплопроводностью 2000 – 2400 $Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$ [22–28]. Причём эту величину можно увеличить в ~ 1,5 раза путём использования изотопически чистого материала [23]. Однако проблемой является возможность получения качественных монокристаллов алмаза необходимого размера. После решения этой проблемы предполагается, что ВКР лазеры на алмазе со временем достигнут киловаттного уровня [28].

1. ПГС НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛА $AGGAS_2$ [6]

Исследовалась перестройка частоты в наносекундном параметрическом генераторе света на основе кристалла тиогаллата серебра ($AgGaS_2$), который обладает высокой нелинейностью (d_{36} = 22 пм/В), низким поглощением в области 3,0 – 3,5 мкм ($\alpha \leq 0{,}07 см^{-1}$). Кристалл негигроскопичен, температурно стабилен.

Кристалл $AgGaS_2$ - единственный из халькопиритных высоконелинейных кристаллов ($AgGaSe_2$, $ZnGeP_2$, $CdGeAs_2$), который может быть использован в ПГС с накачкой лазером на Nd:YAG.

Исследовался способ генерации выбранной дифференциальной пары волн (выбранной, исходя из детектируемого газа метанового ряда) путем изменения угла падения накачки на входное зеркало резонатора при фиксированном положении кристалла в резонаторе. Была разработана и испытана система регистрации и идентификации спектра ИК излучения ПГС 1,5 – 4,0 мкм на основе метода «преобразования вверх» частоты излучения коротковолновой (резонаторной) волны ПГС в видимый диапазон 0,61 – 0,67 мкм. В последующем длины волн этого диапазона измерялись с помощью калиброванного акустооптического фильтра (АОФ) видимого диапазона [7] с точностью до $5 \cdot 10^{-4}$ мкм. При изменении угла между направлением накачки и осью резонатора в пределах 3,5° длина волны излучения варьировалась в пределах 3,0 – 3,6 мкм. При этом ориентация оптической оси кристалла по отношению к оси резонатора была зафиксирована и равна 51°. Расчетный порог генерации ($9 \cdot 10^6$ Вт/см^2) оказался близок к порогу разрушения кристалла ($3 \cdot 10^7$ Вт/см^2), поэтому мы работали с превышением не более 1,2 над порогом при длительности импульса 10 нс.

2. «БЫСТРАЯ» ПЕРЕСТРОЙКА ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ПГС НА $LINBO_3$ С ПОМОЩЬЮ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ДЕФЛЕКТОРА И ОБУЖЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ШИРИНЫ ЛИНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА [7]

В ПГС на кристалле ниобата лития ($LiNbO_3$) волновая перестройка в диапазоне 2,7 – 3,7 мкм достигалась изменением угла неколлинеарности (угол между осью резонатора и пучком накачки) в диапазоне 3,2 – 5,3 угл. град. путем использования электронно – перестраиваемого акустооптического дефлектора (АОД). Изготовленный на основе кристалла парателлурита (TeO_2), АОД обладал угловым шагом сканирования - 20 угл. сек., временем пространственного установления пучка – 1 мс. Излучение одномодового генератора накачки на Nd:YAG горизонтальной поляризации через ячейку АОД заводилось в узел ПГС. Длительность импульса накачки – 10 нс, энергия в импульсе – 250 мДж. В эксперименте область изменения звуковой частоты АОД составила 73,1 – 83,5 МГц, при этом длины волн генерации ПГС перестраивались в диапазонах 1,56 – 1,69 мкм и, соответственно, 3,36 – 2,88 мкм. Кристалл $LiNbO_3$ был неподвижен и ориентация его оптической оси относительно резонаторной составляла 48,5 угл. град., а угол неколлинеарности α менялся от 4° до 5°.

С помощью разработанного инфракрасного АОФ были прописаны формы линий естественной (необуженной) генерации ПГС, т.е. АОФ использовался в качестве анализатора спектра. В основе работы акустооптического фильтра лежит дифракция света с перекачкой энергии в дифракционные максимумы. Акустическая волна, распространяясь в твердом теле, создает локальные сжатия и разрежения среды. Вследствие эффекта фотоупругости при появлении механических напряжений возникают изменения показателя преломления среды. В итоге в среде образуются периодические слои с отличающимся показателем преломления. Эти слои движутся со скоростью звука и следуют друг за другом на расстоянии половины длины звуковой волны. При прохождении света через такую слоистую структуру возникает дифракция. Принципиальная схема исследованного неколлинеарного фильтра показана на рис. 1.

Обужение ширины полосы оптического излучения применялось для увеличения спектральной чистоты импульсов и происходило за счет узкой оптической полосы пропускания фильтра. Быстродействие фильтра определялось временем прохождения звуковой волны через область взаимодействия со светом. Для реальных акустооптических фильтров эта величина составляла ~ 10 – 100 мкс [7].

При помещении АОФ внутрь резонатора ПГС на длине волны 3,32 мкм была получена

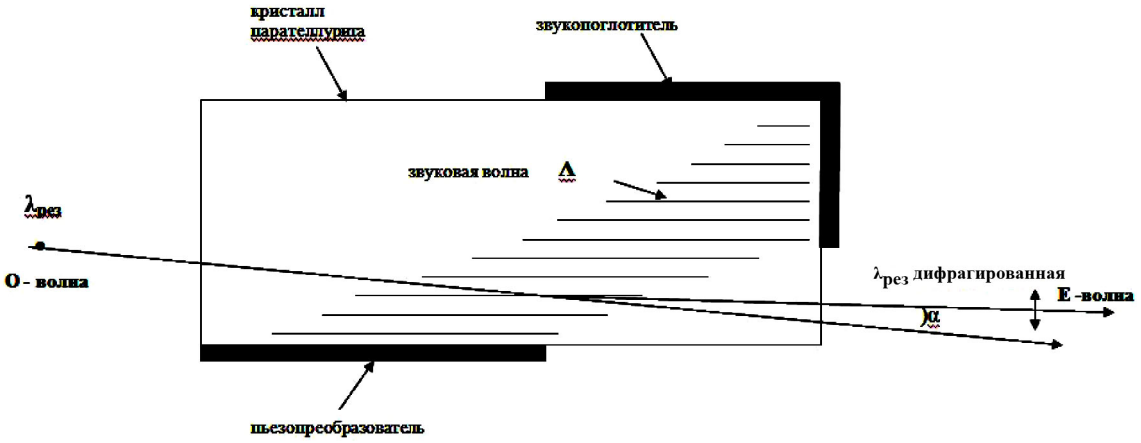
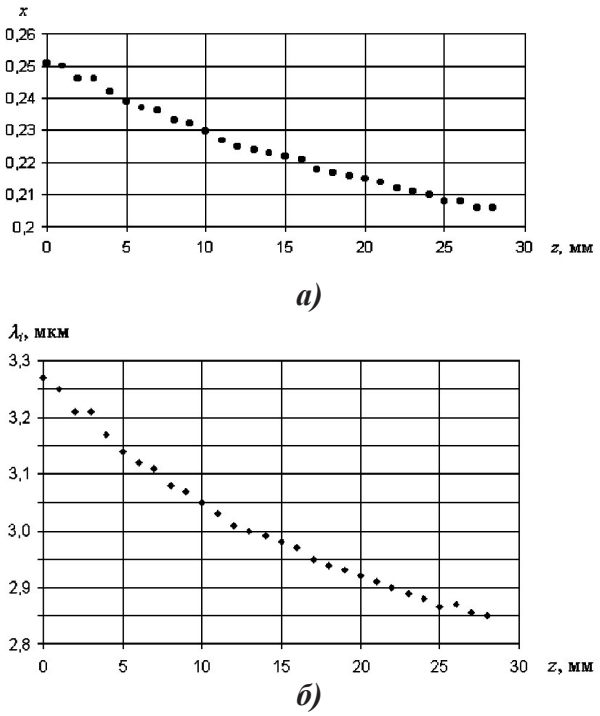


Рисунок 1.
Неколлинеарный АОФ на кристалле парателлурита

обуженная более чем в 10 раз по спектральной полосе генерация. Исходя из полученных экспериментальных результатов, оценка ширины линии резонаторной волны 3340 нм дает величину 0,5 – 0,8 см$^{-1}$, что хорошо совпадает с расчетной величиной ширины аппаратной функции АОФ в нашей схеме – 0,6 см$^{-1}$ (для резонатора длиной 20 см).

3. ПГС НА КРИСТАЛЛЕ $HG_{1-X}CD_XGA_2S_4$ С ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЛИНЕЙНЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ КРИСТАЛЛА [10]

В Кубанском государственном университете (группа В.В. Бадикова) разработана технология и выращен новый нелинейно-оптический кристалл тиогаллат кадмия - ртути ($Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$). Полученный кристалл обладает хорошим оптическим качеством и контролируемым распределением примеси Cd вдоль его оси. В АО «НЦЛСК «Астрофизика» создан на его основе ПГС с накачкой излучением Nd:YAG – лазера и плавной перестройкой длины волны в среднем ИК диапазоне. Диапазон перестройки составил 2,85 – 3,27 мкм с максимальным дифференциальным коэффициентом преобразования 6,6%. Определены коэффициенты уравнения Селлмейера для твердых растворов $Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$. Введение в кристаллы $Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$ различных концентраций кадмия (**x**) приводит к изменениям двулучепреломления и главных значений показателей преломления в кристаллах. В результате, меняя величину **x**, возникает возможность «управлять» условиями фазового синхронизма. Кроме того, в процессе роста кристалла возникает естественный градиент концентрации кадмия по длине були. Полученные данные позволяют по длине волны преобразованного излучения определить концентрацию кадмия в кристалле (рис. 2а).



а)

б)

Рисунок 2.

а) - зависимость расчетного значения концентрации кадмия в кристалле от расстояния от боковой поверхности кристалла;

б) - зависимость длины холостой волны на выходе ПГС от смещения пучка накачки относительно боковой поверхности кристалла

Используя изготовленные таким образом нелинейно-оптические элементы, можно осуществлять перестройку длины волны ПГС путем линейного перемещения кристалла относительно пучка накачки (или перемещением пучка накачки относительно кристалла). При этом условия некритичного фазового синхронизма не нарушаются. Все эти преимущества были продемонстрированы в ПГС, в котором в качестве нелинейно-оптического элемента использовался уникальный кристалл, вырезанный под 90°-ный синхронизм, с плавным изменением **x** от 0,21 до 0,25 вдоль оси. На рис. 2б представлена экспериментальная зависимость длины холостой волны от положения пучка накачки в кристалле. При смещении пучка в плоскости синхронизма кристалла на 28 мм изменение длины волны составило 0,42 мкм.

Изменяя параметр **x** в диапазоне от 0,14 до 0,56, можно получить генерацию ПГС в условиях некритичного фазового синхронизма в спектральном диапазоне (2,7 ÷ 9) мкм.

Основные характеристики данного ПГС на основе $Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$: длина волны излучения, перестраиваемая в диапазоне 2,85 – 3,27 мкм, энергия в импульсе - 10 – 100 мкДж; длительность импульса ~ 10 нс; расходимость излучения 10^{-3} – 10^{-2} рад, частота следования импульсов – 1 – 100 Гц.

4. «БЫСТРАЯ» ПЕРЕСТРОЙКА ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ПГС НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА ВВО С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРИВОДА [6]

Разработан и исследован быстроперестраиваемый ПГС видимого и ближнего ИК диапазона 0,47 – 1,5 мкм. Использовалась коллинеарная схема ПГС на двух идентичных нелинейных кристаллах ВВО, ориентированных таким образом, чтобы скомпенсировать «снос» энергии накачки и тем самым существенно увеличить эффективность ПГС. В известных схемах коммерчески производимых лазеров перестройка частоты осуществляется последовательно, вращением нелинейных кристаллов с помощью шагового двигателя. Скорость такой перестройки составляет единицы секунд, например, пошаговый переход от длины волны 0,55 мкм в 0,67 мкм - порядка 3 секунд.

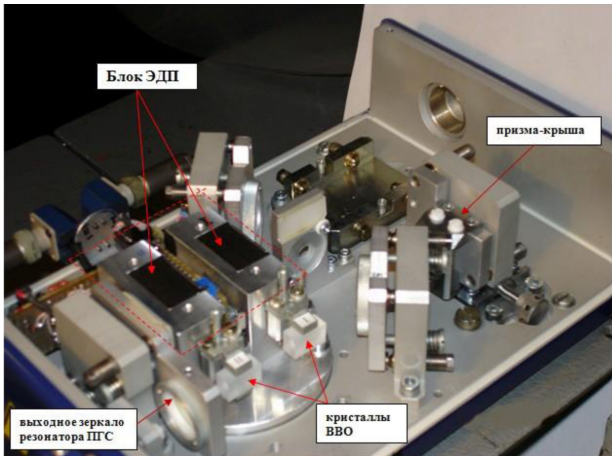


Рисунок 3.
Блок ПГС видимого диапазона на основе ВВО с ЭДП

Для осуществления «быстрой» перестройки длины волны излучения в области 0,47 – 1,5 мкм для прецизионного управления угловым положением нелинейных кристаллов ВВО по сигналам ЭВМ или в автономном режиме разработан электродинамический привод (ЭДП). В ПГС использованы два идентичных однокоординатных ЭДП для каждого кристалла ВВО. Основой ЭДП является электродинамический механизм (ЭДМ). Общее управление приводами осуществлялось или от ЭВМ, или от специализированного автономного пульта управления.

Технические характеристики ЭДП: габариты нагрузки (кристалл ВВО) - 12·12·14 мм^3, масса нагрузки – 50 г, диапазон углов поворота кристалла - ± 2,5°, время перехода в крайнее положение – 5 мс.

Для повышения точности управления положением нагрузки в ЭДМ встроены фотоэлектрические датчики положения, а обмотка управления включена в замкнутый контур регулирования, образуя следящий привод электродинамического типа.

Разработанное программное обеспечение позволяет выбрать произвольную последовательность длин волн генерации ПГС.

На рис. 3 показан блок ПГС видимого диапазона на основе ВВО с «быстрой» перестройкой длины волны излучения, осущест-

вляемой двумя следящими приводами на основе электродинамических исполнительных механизмов. Время переключения длин волн в пределах рабочего диапазона 470 – 680 нм – 5 мс.

5. ПГС НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННОЙ СТРУКТУРЫ ИЗ НИОБАТА ЛИТИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ОКСИДОМ МАГНИЯ, ИЗЛУЧАЮЩИЙ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 4,1±0,1МКМ [5]

Создан параметрический генератор света на основе кристалла PPMgO:LN. Легирование монокристалла $LiNbO_3$ окисью магния осуществлено для увеличения оптической стойкости. Нелинейный кристалл с периодически поляризованной (PP) структурой представляет собой материал, в котором ориентация оптической оси кристалла инвертирована для каждого полупериода генерации с выбранной длиной волны. Это эквивалентно изменению знака нелинейной восприимчивости χ_{eff} в каждом полупериоде. Суммарный эффект состоит в том, что энергия на всех полупериодах передается от накачки к сигнальному излучению и не происходит процесса обратной перекачки энергии от параметрических волн в волну накачки, как это происходит в монокристаллической нелинейной среде при длине кристалла, превышающей оптимальную, связанную с длиной когерентности. Кроме отсутствия «сноса» энергии, преимуществом PPMgO:LN является более высокий коэффициент эффективной нелинейной восприимчивости χ_{eff}, чем у монокристалла ниобата лития ($LiNbO_3$), и, следовательно, более высокая эффективность преобразования в излучение среднего ИК диапазона.

В качестве источника накачки использован лазер на фториде иттрия-лития с легированием неодимом (Nd:YLF) с диодной накачкой, излучающий на длине волны 1,053 мкм. Длительность импульса варьировалась в пределах 10 – 40 нс при изменении частоты повторения и энергии в импульсе. Средняя мощность излучения на длине волны 4,1 мкм с частотой повторения 10 кГц при длительности импульса 10 нс составила 70 мВт. Длина волны 4,1 мкм выбрана с целью детектирования изотопа ^{13}C в выдыхаемом воздухе (для дыхательных тестов при ранней клинической диагностике заболеваний) [29].

На рис. 4 показана перестроечная кривая генерации ПГС на PPLN – зависимость генерируемой параметрической пары длин волн от периода доменной решетки при накачке длиной волны 1053 нм, рассчитанная в программе SNLO v.61. [30].

Как видно из рис. 4, изменением периода доменной решетки от 27 до 30 микрометров возможно реализовать генерацию ПГС на произвольно выбранных длинах волн в ближнем инфракрасном диапазоне 1,37 – 4,5 мкм при накачке длиной волны 1053 нм.

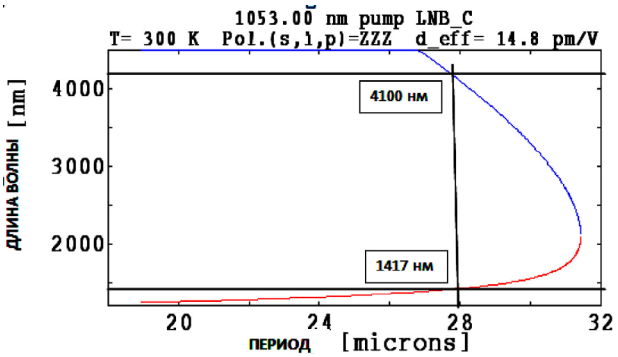


Рисунок 4.
Перестроечная кривая PPLN при накачке длиной волны 1053нм

Основным требованием при создании ПГС является максимальная эффективность преобразования при параметрическом взаимодействии, поэтому критерием для разработки оптической схемы резонатора являлось создание эффективной фокусировки в кристалле PPMgO:LN, сечением 3·2 мм^2 и длиной 20 мм. Он располагался в термостате при T = 40ºC. Оптические поверхности элемента просветлены для излучения сигнальной волны.

Пороговые характеристики ПГС рассчитаны согласно предложенной в [5] модели.

Экспериментально измеренная средняя мощность генерации ПГС на длине волны 4,1 мкм в зависимости от длительности импульса лазера накачки при частоте повторения 10 кГц показана на рис. 5 точками; сплошная

линия на графике – расчетная зависимость. Максимально достигнутое значение средней мощности генерации составила 70 мВт.

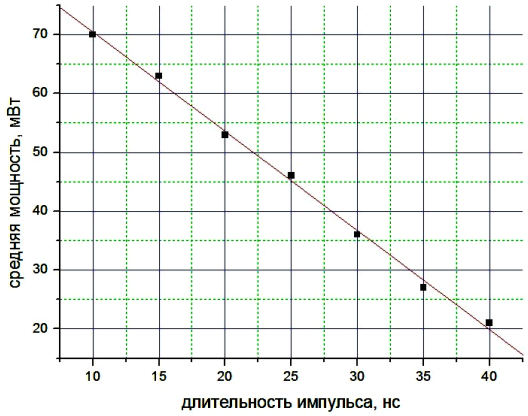


Рисунок 5.
Зависимость средней мощности излучения ОПГ на длине волны 4,1 мкм от длительности импульса лазера накачки при частоте повторения 10 кГц

На рис. 6 приведён внешний вид ПГС на основе PPMgO:LN.

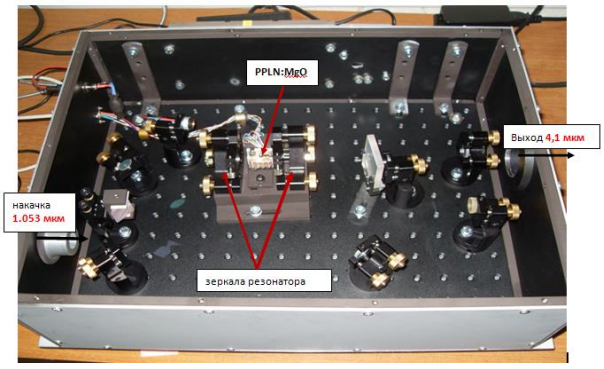


Рисунок 6.
Блок ПГС ближнего инфракрасного диапазона на основе PPMgO:LN

Принцип измерения длины волны генерации λ_1 (в области 4 мкм) основывался на ее «визуализации», т.е. измерении спектрометром видимого диапазона второй гармоники ее параметрической пары - волны λ_2 (в области 1,4 мкм), однозначно связанной с измеряемой λ_1 соотношением:

$$\lambda_2 = \lambda_3 \cdot \lambda_1/(\lambda_1 - \lambda_3),$$

где λ_3 – длина волны накачки, равная 1,053 мкм. Генерация второй гармоники волны λ_2 происходила одновременно с параметрической генерацией в том же нелинейном кристалле PPMgO:LN, как сопутствующий несинхронный процесс; при этом визуально наблюдалось излучение темно-красного цвета с длиной волны $\lambda_4=\lambda_2/2$ (в области 0,7 мкм). Второй наблюдаемый в эксперименте несинхронный нелинейный процесс – генерация в красно-оранжевой области спектра, связан с генерацией суммарной частоты волны λ_2 и волны накачки λ_3. Длина волны при этом составляла $\lambda_5 = \lambda_3 \cdot \lambda_1/(\lambda_1 + \lambda_3)$ - порядка 0,6 мкм.

Разработка ПГС на длинах волн в диапазоне 1,37 – 4,5 мкм с варьируемой длительностью импульса позволит создать на их базе диагностическое оборудование для применения в широких областях науки и техники.

6. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ «БЕЛОГО» (RGB) ЛАЗЕРА [31]

Существует несколько лазерных технологий получения белого света за счёт суперпозиции красного, синего и зеленого цветов, например [2]. Один из вариантов рассмотрен в данном разделе. На базе описанного выше,

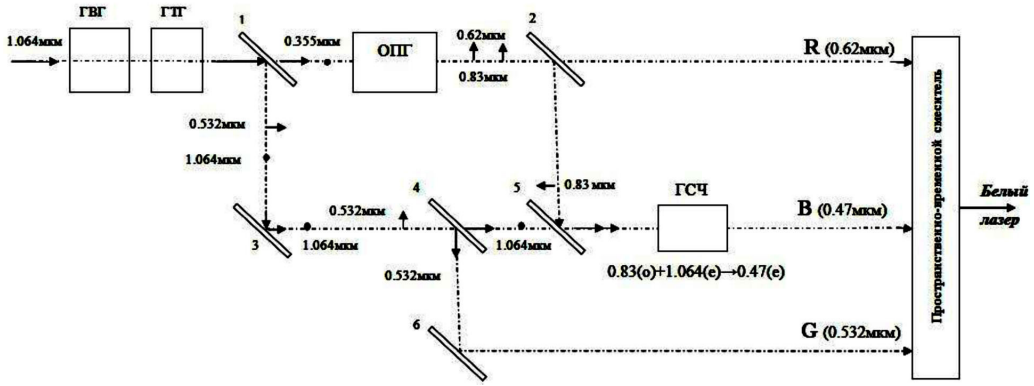


Рисунок 7.
Блок- схема реализации RGB лазера на базе ПГС на основе BBO

лазерного источника - быстроперестраиваемого ПГС видимого и ближнего ИК диапазона (0,47 – 1,5) мкм на основе ВВО, разработаны принципы реализации «белого» лазера - мощного импульсно-периодического лазера, излучающего одновременно на трех длинах волн в красном, зеленом и синем диапазонах с определенными энергетическими соотношениями между ними, позволяющими визуально воспринимать излучение как белый свет. Блок-схема показана на рис. 7.

Излучение накачки с длиной волны 1,064 мкм, пройдя через генератор второй гармоники (ГВГ) и генератор третьей гармоники (ГТГ), преобразовывалось в излучение с длиной волны 0,355 мкм. На выходе из ГТГ располагалось дихроичное зеркало 1, пропускающее излучение с длиной волны 0,355 мкм, которое накачивало ОПГ на ВВО (описанный выше в п.5), и отражающее под 90^{o} остаточное излучение с длинами волны 1,064 мкм и 0,532 мкм. С выхода ПГС дихроичное зеркало 2 пропускало R (Red) излучение (0,62 мкм), которое затем направлялось в пространственно-временной смеситель и отражало его параметрическую пару с длиной волны 0,83 мкм. Это излучение, отраженное дихроичным зеркалом 5, взаимодействовало в генераторе суммарной частоты (ГСЧ) с излучением с длиной волны 1,064 мкм, прошедшим через поворотное зеркало 3 и дихроичные зеркала 4 и 5. В ГСЧ генерировалось и направлялось в пространственно-временной смеситель B (Blue) излучение (0,47 мкм). G (Green) излучение с длиной волны 0,532 мкм поворотными зеркалами 2 и 6 и дихроичным зеркалом 4 также направлялось в пространственно-временной смеситель для формирования пучка «Белого лазера». Пространственно-временной смеситель включал в себя систему оптических задержек и зеркал для формирования однонаправленного RGB пучка.

И если лазерные системы такого типа начали находить в настоящее время своё место в народно-хозяйственной нише, например, в качестве источника света в лазерном кинематографе [32], то в образцах спецтехники различного способа базирования они пока не используются. В то же время ОЭС и ОВС развитых стран оснащаются специальными фильтрами для защиты от облучения традиционными длинами волн при распознавании и помеховом воздействии.

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования методов дистанционного обнаружения и идентификации по характеристикам спектрального отражения мобильных объектов спецтехники, а также функционального подавления их оптико-электронных и оптико – визуальных средств обнаружения (ОЭС и ОВС). Кроме этого, предлагаемый к разработке лазер отличает «скрытность» его излучения от визуального наблюдения, т.к. его излучение воспринимается наблюдателем как белый свет.

Зарубежные исследования по созданию подобных «белых» лазеров для целей идентификации объектов по дисперсии спектрального отражения и функциональному подавлению проводятся очень активно [33].

В этой связи, разработка помеховых и функционально подавляющих лазеров с произвольными длинами волн, причем воспринимаемыми наблюдателем в совокупности как белый свет, подтверждает значимость проведения исследований.

7. ВКР ЛАЗЕРЫ С САМОПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЧАСТОТЫ

Недавние исследования открыли новый класс соединений вольфраматов и молибдатов щелочноземельных металлов и свинца со структурой шеелита – перспективных ВКР - активных сред нового поколения [20]. Эти материалы позволяют в одном кристалле генерировать излучение с $\lambda = 1{,}06$ мкм и осуществлять его ВКР преобразование.

В Кубанском государственном университете (группа профессора В.А. Исаева) на основе модификации метода Чохральского была разработана технология выращивания кристаллов $BaWO_4$, $SrWO_4$, $SrMoO_4$, а также активных элементов $Nd:SrWO_4$ и $Nd:SrMoO_4$ [34], которые были исследованы в АО «НЦЛСК «Астрофизика». Показано, что дан-

Таблица 1.
Сравнительные характеристики вольфрамомолибдатов бария и стронция и коммерчески доступных материалов

Химическая формула	Кристаллы, разрабатываемые в настоящем проекте				Доступные аналоги	
	$Ba(MoO_4)_x(WO_4)_{1-x}$, $0<x<0,01$ (вольфрамат бария, $BaWO_4$)	$Sr(MoO_4)_x(WO_4)_{1-x}$, $0<x<0,01$ (вольфрамат стронция, $SrWO_4$)	$Sr(MoO_4)_x(WO_4)_{1-x}$, $0.99<x<1$ (молибдат стронция, $SrMoO_4$)	$Ba(MoO_4)_x(WO_4)_{1-x}$, $0,5<x<0,6$	$Ba(NO_3)_2$ (нитрат бария)	$KGd(WO_4)_2$ (калий-гадолиниевый вольфрамат)
Кристаллическая структура	Тетрагональная, пр. гр. $I4_1/a$				Кубическая, пр. гр. $P2_13$	Моноклинная, пр. гр. $C2/c$
Плотность	6,35 г/см^3	6,26 г/см^3	4,65 г/см^3	5,5-5,65 г/см^3	3,25 г/см^3	7,27 г/см^3
Теплопроводность	2,3 Вт/м·К	3 Вт/м·К	4 Вт/м·К	2 Вт/м·К	1,17 Вт/м·К	3,3 Вт/м·К
Область прозрачности номинально чистого кристалла	0,45 – 5,4 мкм	0,25 – 5,4 мкм	0,25 – 5,4 мкм	0,45 – 5,4 мкм	0,35-1,8 мкм	0,35-5,5 мкм
Показатель преломления на 1064 нм	n_o =1,806 n_e = 1,804	n_o =1,84 n_e = 1,85	n_o =1,878 n_e = 1,88	n ~ 1,8	n = 1,555	n_g = 2,061 n_p = 1,982 n_m = 2,010
Стоксов сдвиг	925 см$^{-1}$	921,5 см$^{-1}$	888 см$^{-1}$	889 см$^{-1}$	1048 см$^{-1}$	901 см$^{-1}$ (p[mm]p) 768 см$^{-1}$ (p[gg]p)
Стационарный коэффициент ВКР-усиления на 1064 нм, $E\|\|c$	8,5 см/ГВт	5 см/ГВт	5,5 см/ГВт	5 см/ГВт	11 см/ГВт	3,3 – 4,4 см/ГВт
Концентрация Nd^{3+} в кристалле	0 – 0,15 ат. % (в позиции бария)	0 – 1,5 ат. % (в позиции стронция)	0 – 1,5 ат. % (в позиции стронция)	0 – 0,15 ат. % (в позиции бария)	-	0 – 3 ат. % (в позиции гадолиния)
Возможные длины волн излучения в активированном Nd^{3+} кристалле	1055 нм, 1329 нм	1057 нм, 1330 нм	1058 нм, 1331 нм	1055 нм, 1329 нм	-	1067 нм
Лучевая стойкость (1064 нм, 4,2 нс)	2 ГВт/см^2 (на поверхности кристалла)	1,9 ГВт/см^2 (на поверхности кристалла)	0,8 ГВт/см^2 (на поверхности кристалла)	1,7 ГВт/см^2 (на поверхности кристалла)	0,4 ГВт/см^2 на поверхности кристалла)	10 ГВт/см^2 (в объеме кристалла)
Твердость по Моосу	4				2,5-3	4

ные материалы по своим характеристикам не уступают широко используемым в ВКР лазерах и преобразователях кристаллам KGW, $Ba(NO_3)_2$ 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 табл. 1 показаны характеристики разрабатываемых в Кубанском ГУ ВКР-активных монокристаллов вольфрамомолибдатов бария и стронция и их сравнение с коммерчески доступными материалами.

На рис. 8 показана фотография макетов ВКР-преобразователей в сборе, разработанных на основе кристаллов вольфрамомолибдатов бария и стронция.

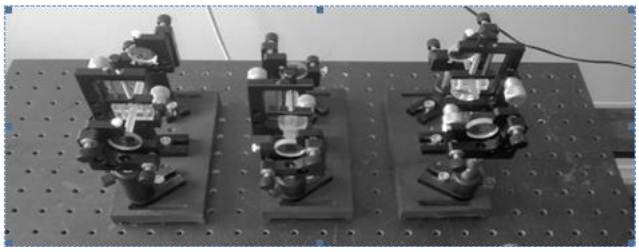


Рисунок 8.
Макеты ВКР преобразователей, разработанных на основе кристаллов вольфрамомолибдатов бария и стронция, в сборе

Фотография макетов ВКР-лазера с самопреобразованием длины волны в сборе представлена рис. 9.

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. Результаты показаны в табл. 2 и 3.

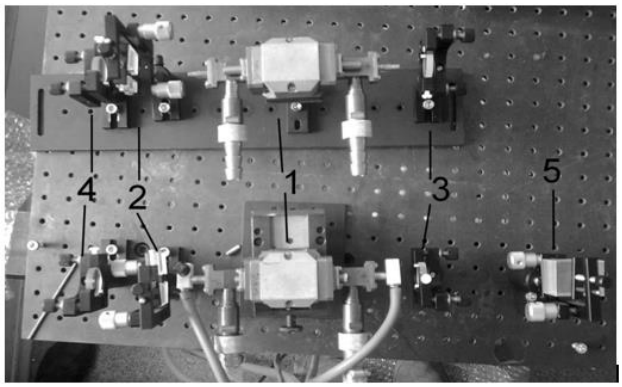


Рисунок 9.
ВКР лазер с самопреобразованием длины волны в сборе:
1 – квантрон с активным элементом и лампой накачки, 2 – пассивный затвор, 3 – выходные зеркала, 4 –зеркала со 100%-м отражением, 5 – нелинейный кристалл DKDP для получения 2-й гармоники

Реализованы и исследованы ВКР - лазеры с самопреобразованием частоты с активными элементами из $SrWO_4$:Nd и $SrMoO_4$:Nd. В табл. 4 показаны результаты измерения энергии стоксовой частоты.

Таким образом:

- наименьшая пороговая энергия накачки первой стоксовой компоненты ВКР-преобразования достигалась на кристаллах вольфрамата бария и составляла 7,8 мДж. При этом максимальная выходная энергия – 6,8 мДж, максимальная эффективность преобразования – 22%, а дифференциальная эффективность преобразования – 28,5%. Использовались образцы кристаллов вольфрамата бария, вольфрамата стронция и молибдата стронция размером Ø6,3·65 мм.

- Максимальная выходная энергия – 8,6 мДж получена на кристаллах вольфрамата стронция при частоте следования импульсов лазерного излучения 10 Гц на длинах волн лазерного излучения в ближней ИК спектральной области.

Максимальная эффективность преобразования составила 15,6%, а дифференциальная эффективность преобразования – 22,2%. Использовались образцы кристаллов вольфрамата и молибдата стронция размером Ø6,3·65 мм с концентрацией неодима 1 ат. % по стронцию. Кристаллы молибдата стронция демонстрировали наименьшую эффективность, однако обладают существенно отличной от вольфраматов величиной стоксового сдвига и расширяют возможности получения излучения на новых длинах волн. Кроме того молибдат стронция имеет наибольшую теплопроводность и потому является предпочтительным материалом для систем высокой средней мощности.

Полученные результаты показали возможности их использования в различных приложениях, в частности, применения в лазерных приборах, безопасных для глаз человека.

Таблица 2.
Спектральные характеристики вольфрамомолибдатов стронция

Кристалл	Стоксов сдвиг, $см^{-1}$	Длина волны 1-ой стоксовой компоненты, мкм	Длина волны 2-ой стоксовой компоненты, мкм
$BaWO_4$	925,6	1,1802	1,3250
$SrWO_4$	921	1,1796	1,3234
$SrMoO_4$	887,7	1,1750	1,3118

Таблица 3.
Энергетические характеристики вольфрамомолибдатов стронция

	Пороговая энергия накачки, мДж	Максимальная выходная энергия преобразователя, мДж	Максимальная эффективность преобразования, %	Дифференциальная эффективность преобразования, %
$BaWO_4$	7,8	6,8	22	28,5
$SrWO_4$	16	8,6	15,6	22,2
$SrMoO_4$	13,8	3,8	9,2	12,8

Таблица 4.
Характеристики активных элементов вольфрамомолибдатов стронция с неодимом

		$SrWO_4$:Nd	$SrMoO_4$:Nd
1	Стоксов сдвиг, $см^{-1}$	921	888
2	Длина волны (основная частота), нм	1057	1058
3	Длина волны 1-й стоксовой компоненты, нм	1171	1168
4	Энергия импульса излучения на стоксовой частоте, мДж	11,56	5,00

Таблица 5.
Теплофизические и ВКР свойства некоторых кристаллов [20, 21, 32]

Параметры	$Ba(NO_3)_2$	$LiIO_3$	KGW	$BaWO_4$	YVO_4	Алмаз
Теплопроводность при 25°C, $Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$	1,17	-	2,6 вдоль [100] 3,8 вдоль [010] 3,4 вдоль [001]	3	5,2	>2000
Коэффициент термического расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/°C	13	28-48	1,6-8,5	6	3	0,9
Коэффициент усиления g_R на длине волны 1064 нм, см/ГВт	11	4,8	3,5-4,4	8,5	>4,5	>12,5

8. ВКР ЛАЗЕР НА МОНОКРИСТАЛЛЕ АЛМАЗА

Среди всех возможных ВКР – кристаллов алмаз выделяется [22, 25, 36] своими наибольшими частотным сдвигом и коэффициентом усиления света. Теплопроводность же алмаза является наивысшей [24, 30, 36] среди всех известных материалов.

В табл. 5 приведены значения теплопроводности и коэффициента термического расширения для ряда широко применяемых ВКР кристаллов и монокристаллического алмаза [31, 35, 36]. Данные, приведенные в табл. 5, позволяют сопоставить величины тепловых эффектов, возникающих в этих кристаллах во время ВКР генерации.

Как видно из сравнения свойств кристаллов, монокристаллический алмаз обладает самым высоким коэффициентом преобразо-

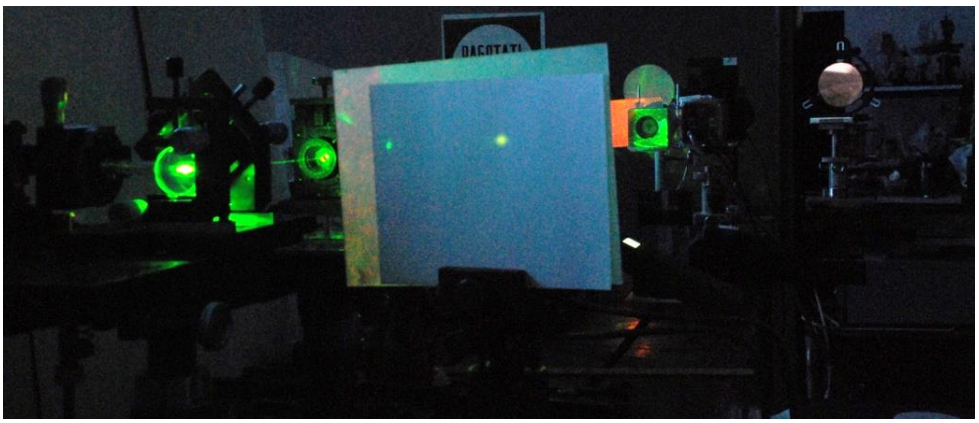


Рисунок 10.
Установка для получения ВКР излучения.
На экране показано пятно генерируемого ВКР излучения в алмазе (в центре)
и пятно излучения накачки (слева)

вания в ВКР излучение, а также рекордно высокой теплопроводностью и самым низким коэффициентом термического расширения.

Эти свойства позволяют ожидать от алмазных ВКР лазеров высочайшую эффективность преобразования (до 60 – 70 %) и недостижимую ранее среднюю по времени мощность. В работе [26] сообщалось о создании квазинепрерывного алмазного ВКР лазера с выходной мощностью до 100 Вт.

В данной работе была предпринята попытка создать ВКР лазер, средой для преобразования в котором был искусственный монокристалл алмаза, выращенный CVD-методом (аббревиатура на английском языке – CVD – от chemical vapour deposition). К сожалению, этот метод пока не позволяет выращивать монокристаллы алмаза размером ≥ 10 мм [24].

В нашей работе мы использовали кристаллы размером 4·4·0,5 мм^3. На рис. 10 показана установка для получения ВКР излучения. В качестве источника накачки использовался частотно-импульсный Nd:YAG лазер с модуляцией добротности, длина волны λ = 1064 нм, длительность импульса $\tau_{имп}$ = 5 нс, энергия в импульсе – 120 мДж., с удвоителем частоты на кристалле KDP. Тем не менее, при такой длине кристалла и неоптимальных условиях эксперимента порог генерации ВКР – излучения был преодолён. На экране наглядно видны пятна от излучения накачки λ = 532 нм и ВКР излучения λ = 573 нм.

Низкая эффективность полученной нами ВКР генерации обусловлена малой длиной активной среды (всего 4 мм), высоким уровнем внутренних напряжений в кристалле, что привело к его значительной оптической неоднородности, неоптимальными условиями проведения эксперимента (кристалл располагался нормально, а не под углом Брюстера, к падающему излучению, зеркала резонатора были плоскими), большими потерями на рассеяние излучения (уровень оптической обработки был недостаточен). После получения более качественных монокристаллов алмаза работа будет продолжена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье обобщен цикл работ, проведённых в АО «НЦЛСК «Астрофизика» по нелинейно-оптическим технологиям преобразования лазерного излучения с целью расширения спектрального диапазона.

Исследованы различные схемы параметрических генераторов света на основе кристаллов: тиогаллата серебра ($AgGaS_2$); ниобата лития ($LiNbO_3$); тиогаллата кадмия - ртути ($Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$); BBO (β – BaB_2O_4); периодически поляризованной структуры из ниобата лития, легированного оксидом магния (PPMgO: LN) и лазеров на вынужденном рассеянии свете на основе соединений вольфраматов и молибдатов щелочноземельных металлов и свинца со структурой шеелита, а также на монокристалле алмаза.

На базе быстроперестраиваемого ПГС видимого и ближнего ИК диапазона (0,47 – 1,5) мкм на основе BBO, разработан т. н. «белый» лазер. Это мощный импульсно-периодический лазер, излучающий одновременно на трех длинах волн в красном, зеленом и синем диапазонах. Определенные энергетические соотношения между ними, позволяют визуально воспринимать излучение как белый свет.

Особое внимание в работе уделялось способам уменьшения времени перестройки ПГС и уменьшению спектральной ширины линии получаемого лазерного импульса, что особенно важно для многих приложений. Для обужения спектральной ширины линии излучения был использован акусто-оптический фильтр. Изготовленный из кристалла TeO_2, АОД обладал угловым шагом сканирования - 20 угл. сек., временем пространственного установления пучка – 1 мс. Обужение ширины полосы излучения происходило за счет узкой полосы пропускания фильтра. При помещении АОФ внутрь резонатора ПГС на длине волны 3,32 мкм была получена обуженная более чем в 10 раз по спектральной полосе генерация, что дает величину 0,5 – 0,8 см$^{-1}$.

Разработан и исследован быстроперестраиваемый ПГС видимого и ближнего ИК диапазона (0,47 – 1,5) мкм. В известных схемах коммерчески производимых лазеров перестройка частоты осуществляется последовательно вращением нелинейных кристаллов с помощью шагового двигателя. Скорость такой перестройки составляет единицы секунд, например, пошаговый переход от длины волны 0,55 мкм в 0,67 мкм - порядка 3 секунд. Для осуществления «быстрой» перестройки длины волны излучения для прецизионного управления угловым положением нелинейных кристаллов ВВО по сигналам ЭВМ или в автономном режиме разработан электродинамический привод (ЭДП). Время перестройки в пределах рабочего диапазона 470 – 680 нм – 5 мс.

На кристалле тиогаллат кадмия - ртути ($Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$) создан ПГС с плавной перестройкой длины волны в среднем ИК диапазоне. Диапазон перестройки составил 2,85 – 3,27 мкм с максимальным дифференциальным коэффициентом преобразования 6,6%. Введение в кристаллы различных концентраций кадмия (**x**) приводит к изменениям двулучепреломления и главных значений показателей преломления в кристаллах. Меняя величину **x**, создаётся возможность «управлять» условиями фазового синхронизма. Создан ПГС, с плавным изменением **x** от 0,21 до 0,25 вдоль оси. Диапазон его перестройки составил 2,85 ÷ 3,27 мкм.

Для анализа дыхательных тестов при ранней клинической диагностике заболеваний создан параметрический генератор света на основе периодически поляризованной структуры из ниобата лития, легированного оксидом магния, излучающий на длине волны 4,1±0,1мкм. Средняя мощность излучения на длине волны 4,1 мкм с частотой повторения 10 кГц при длительности импульса 10 нс составила 70 мВт.

Созданы ВКР лазеры с самопреобразованием частоты на основе соединений вольфраматов и молибдатов щелочноземельных металлов и свинца, легированных неодимом, со структурой шеелита. Эти материалы позволяют в одном кристалле генерировать излучение с $\lambda = 1{,}06$ мкм и осуществлять его ВКР преобразование. Они обладают широкой областью оптической прозрачности 0,3 – 5 мкм, неплохими механическими и теплофизическими свойствами. Полученные результаты показали возможности их использования в различных приложениях, в частности, для применения в лазерных приборах, безопасных для глаз человека.

Получена генерация ВКР лазера на монокристаллах алмаза. Излучение второй гармоники лазера на неодиме $\lambda = 532$ нм преобразовывалось в $\lambda = 573$ нм. После получения совершенных кристаллов большего размера ожидается создание ВКР – лазеров на алмазе киловаттного уровня.

Результаты работы показали большие возможности разработанных ПГС и ВКР лазеров. Причём технология получения многих нелинейных кристаллов пока далека от совершенства и, в дальнейшем, по мере развития технологии выращивания кристаллов, а также поиска новых материалов, можно ожидать новых результатов, в том числе и по расширению спектрального диапазона. В последнее время появились сообщения о получении кристаллов приемлемого качества, на которых удалось создать ПГС диапазона 2 – 12 мкм.

Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам Кубанского государственного университета (группы В.В. Бадикова и В.А. Исаева) за предоставленные образцы кристаллов и ценные консультации.

Список литературы:

1. *Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В.* Прикладная нелинейная оптика. // М. Радио и связь. 1982. 352 с.

2. *Феру Ф., Ли Мак-Крамб* Техника перестройки лазеров. Генерирование волн от ультрафиолета до инфракрасного света. // Фотоника. 2007. №3. С. 34-40.

3. *Овсянников В.А.* Биофизика лазерных терапевтических воздействий и клиническое использование черезкожной лазерной терапии. // Диссертация д.т.н. 2003. С.-Пб. С. 219.

4. Technologies for Optical Countermeasures X; and High-Power Lasers 2013: Technology and Systems. edited by Titterton D.H., Richardson M.A., Grasso R.J., Ackermann H., Bohn W.L. // Proc. of SPIE 2013. V. 8898. P. 889801. doi: 10.1117/12.2035259.

5. *Andreeva M.S., Andreeva N.P., Barashkov M.S., Mitin K.V., Shchebetova N.I., Krymskii M.I., Krymskii K.M., Rogalin V.E., Akhmatkhanov A.R., Chuvakova M.A., Shur V.Ya.* Optical parametric oscillator based on the periodically poled MgO:LN crystal with 4.1 μm wavelength and varied pulse duration. // Ferroelectrics. 2016. V. 496. № 1. P. 128-133.

6. *Андреев С.А., Андреева Н.П., Барашков М.С., Бадиков В.В., Демкин В.К., Дон А.К., Епихин В.М., Крымский М.И., Калинников Ю.К., Митин К.В., Серегин А.М., Синайский В.В., Талалаев М.А., Чистяков А.А., Щебетова Н.И., Щетинкина Т.А.* Исследование способов перестройки параметрических генераторов света видимого и ИК диапазонов. // Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 4. С. 286-293.

7. *Андреев С.А., Андреева Н.П., Барашков М.С., Демкин В.К., Багаев С.Н., Клочков Д.В., Чистяков А.А., Налобин А.С., Епихин В.М., Калинников Ю.К.*, 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. 2005. В. 48 (140). С. 35-41.

8. *Бадиков В.В., Дон А.К., Митин К.В., Серегин А.М., Синайский В.В., Щебетова Н.И.* Оптический параметрический генератор на кристалле $HgGa_2S_4$. // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 9. С. 831-832.

9. *Бадиков В. В., Кузьмин Н. В., Лаптев В. Б., Малиновский А. Л., Митин К. В., Назаров Г. С., Рябов Е. А., Серёгин А. М., Щебетова Н. И.* Исследование оптических и теплофизических свойств нелинейных кристаллов тиогаллата ртути. // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. №5. С. 451–456.

10. *Бадиков В.В., Дон А.К., Митин К.В., Серегин А.М., Синайский В.В., Щебетова Н.И.* Оптический параметрический генератор на кристалле $Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$. // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 9. С. 853-856.

11. *Бадиков В.В., Дон А.К., Митин К.В., Серегин А.М., Синайский В.В., Щебетова Н.И., Щетинкина Т.А.* Оптический параметрический генератор среднего ИК диапазона на кристалле $HgGa_2S_4$ с накачкой импульсно-периодическим Nd:YAG-лазером. // Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 4. С. 363-365.

12. *Андреев С.А., Андреева Н.П., Барашков М.С., Бельдюгин И.М., Демкин В.К., Евстигнеев В.Л., Крымский М.И., Митин К.В., Рогалин В.Е., Серегин А.М., Степанов А.С., Талалаев М.А., Филатов В.В.* Перспективные направления исследований в области эффективной транспортировки лазерных пучков через фазоискажающие среды. // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 5. С. 23-43.

13. *Исаев В.А., Лебедев А.В., Плаутский П.Г., Андреева Н.П., Евстигнеев В.Л., Митин К.В., Быкова М.Б., Гореева Ж.А., Козлова А.П., Козлова Н.С.* Получение крупных монокристаллов со структурой шеелита и их оптические свойства. // в сб. Тезисы докладов международного симпозиума «Физика кристаллов 2013». МИСиС. Москва. 2013. с. 81.

14. *Исаев В.А., Лебедев А.В., Плаутский П.Г., Андреева Н.П., Евстигнеев В.Л., Митин К.В., Быкова М.Б., Гореева Ж.А., Козлова А.П., Козлова Н.С.* Рост монокристаллов, лазерная генерация и коэффициент эллиптичности поляризации лазерного излучения, прошедшего через оптические элементы из $SrWO_4$ и $SrMoO_4$. // Материалы XIX Всерос. Конф. «Оптика и спектроскопия конденсированных сред». Краснодар. 2013. С. 195 – 199.

15. *Евстигнеев В.Л., Митин К.В., Щебетова Н.И., Куликова Е.О., Лебедев А.В., Аванесов С.А., Игнатьев Б.В., Исаев В.А.* Двухчастотный ВКР – преобразователь на основе кристалла вольфрамомолибдата бария. // Материалы XXI Всерос. Конф. «Оптика и спектроскопия конденсированных сред». Краснодар. 2015. С. 297 – 301.

16. *Piper J.A., Pask H.M.* Crystalline Raman Lasers. // IEEE J. of selected topics in quantum electronics. 2007. V. 13. №3. P. 692-704.

17. Cerny P., Jelinkova H., Zverev P.G., Basiev T.T.. Solid state lasers with Raman frequency

conversion. // Prog. Quantum Electron. 2004. V. 28. P. 113-143.

18. *Шпак П.В.* Внутрирезонаторное ВКР–преобразование излучения мини–лазеров с продольной диодной накачкой. // Автореферат диссертации к. ф.–м. н. Минск, 2017. 25 с.

19. *Зверев П.Г.* ВКР активные кристаллы и разработка ВКР преобразователей на их основе. // Автореферат диссертации д. ф.-м. н. М. 2011. 31 с.

20. *Басиев Т.Т.* Новые кристаллы для лазеров на вынужденном комбинационном рассеянии. // ФТТ. 2005. Т. 47. №8. С. 1354-1358.

21. *Басиев Т.Т., Осико В.В* Новые материалы для ВКР-лазеров. // Успехи химии. 2006. Т. 75. № 10. С. 939-955.

22. *Kaminskii A.A., Hemley R.J., Lai J., Yan C.S., Mao H.K., Ralchenko V.G., Eichler H.J. and Rhee H.* High-order stimulated Raman scattering in CVD single crystal diamond. // Laser Physics Letters. 2007. V. 4. №5. P. 350-353.

23. *Каминский А.А., Ральченко В.Г., Ёнеда Х., Большаков А.П., Инюшкин А.В.* Моноизотопные ^{12}C- и ^{13}C-алмазы - новейшие ВКР-активные кристаллы, как новый этап в развитии алмазной фотоники (diamond photonics). // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2016. Т. 104. № 5-6. С. 356-361. DOI: 10.7868/S0370274X16170124.

24. *Хмельницкий Р.А.* Перспективы выращивания монокристаллического алмаза большого размера. // Успехи физических наук. 2015. Т. 185. № 2. С. 143-159. DOI: 10.3367/UFNr.0185.201502b.0143.

25. *Sabella A., Piper J.A., Mildren R.P.* Diamond raman laser with continuously tunable output from 3.38 to 3.80 μm. // Optics letters. 2014. V. 39. № 13. P. 4037-4040. DOI: 10.1364/OL.39.004037.

26. *Williams R.J., Kitzler O., McKay A., Mildren R.P.* Investigating diamond raman lasers at the 100 w level using quasi-continuous-wave pumping. // Optics Letters. 2014. V. 39. № 14. P. 4152-4155. DOI: 10.1364/OL.39.004152.

27. *Pashinin V.P., Ralchenko V.G., Bolshakov A.P., Ashkinazi E.E., Gorbashova M.A., Yurov V.Yu. and Konov V.I.* External-cavity diamond Raman laser performance at 1240 nm and 1485 nm wavelengths with high pulse energy. // Laser Phys. Lett. 2016. 13. 065001 (4pp) doi:10.1088/1612-2011/13/6/065001.

28. *Williams R.J., Nold J., Strecker M., Kitzler O., McKay A., Schreiber T., and Mildren R.P.* Efficient Raman frequency conversion of high-power fiber lasers in diamond. // Laser &Photonics Reviews. 2015. June 25. P. 1 – 7. DOI: 10.1002/lpor.201500032.

29. *Крымский М.И., Межевов В.С., Рогалин В.Е., Эльман А. Р.* Разработка технологии производства ^{13}C – препаратов, медицинских приборов и методик дыхательных тестов для ранней клинической диагностики заболеваний // сб. тезисов V межд. конф. ФизтехБио, г. Долгопрудный. 2015. с. 43 - 45.

30. http://www.as-photonics.com/products/matlab-snlo

31. *Барашков М.С., Андреева Н.П.* Устройство формирования когерентного излучения частотно-импульсного «белого» лазера. // Патент РФ № 107597 от 13.04.2011.

32. https://www.christiedigital.com/amea/cinema-projection-solutions/high-frame-rates

33. *Vaidyanathan, Mohan; Grayson, Timothy P.; Hardie, Russell C.; Myers, Lawrence E.; McManamon, Paul F.* Multispectral laser radar development and target characterization. // Proc. SPIE V. 3065. P. 255-266, Laser Radar Technology and Applications II, Gary W. Kamerman; Ed.

34. *Isaev V.A., Ignatiev B.V., Lebedev A.V., Avanesov S.A., Plautskiy P.G.* The Czochralski Growth and Structural Investigations of $Ba(MoO_4)_{(X)}(WO_4)_{(1-X)}$ Solid Solution Single Crystals. // J. Cryst. Growth. 2013. V. 363. P. 226-233.

35. *Pask H.M.* The design and operation of solid-state Raman lasers. // Progress in Quantum Electronics. 2003. V. 27. P. 3-56.

36. Углеродная фотоника, под ред. В.И. Конова. М. Наука. 2017. 201 с.

Referens

1. *Dmitriev V.G., Tarasov L.V.* Prikladnaya nelinejnaya optika. // M. Radio i svyaz'. 1982. 352 s.

2. *Feru F., Li Mak-Kramb* Tekhnika perestrojki lazerov. Generirovanie voln ot ul'trafioleta do infrakrasnogo sveta. // Fotonika. 2007. №3. S. 34-40.

3. *Ovsyannikov V.A.* Biofizika lazernyh terapevticheskih vozdejstvij i klinicheskoe ispol'zovanie cherezkozhnoj lazernoj terapii. // Dissertaciya d.t.n. 2003. S.-Pb. S. 219.

4. Technologies for Optical Countermeasures

X; and High-Power Lasers 2013: Technology and Systems. edited by Titterton D.H., Richardson M.A., Grasso R.J., Ackermann H., Bohn W.L. // Proc. of SPIE 2013. V. 8898. P. 889801. doi: 10.1117/12.2035259.

5. *Andreeva M.S., Andreeva N.P., Barashkov M.S., Mitin K.V., Shchebetova N.I., Krymskii M.I., Krymskii K.M., Rogalin V.E., Akhmatkhanov A.R., Chuvakova M.A., Shur V.Ya.* Optical parametric oscillator based on the periodically poled MgO:LN crystal with 4.1 μm wavelength and varied pulse duration. // Ferroelectrics. 2016. V. 496. № 1. P. 128-133.

6. *Andreev S.A., Andreeva N.P., Barashkov M.S., Demkin V.K., Don A.K., Krymskii M.I., Mitin K.V., Seregin A.M., Sinaiskii V.V., Talalaev M.A., Shchebetova N.I., Shchetinkina T.A., Badikov V.V., Epikhin V.M., Kalinnikov Yu.K., Chistyakov A.A.* Investigation into the ways of tuning parametric oscillators of visible and IR ranges. // Quantum Electronics. 2010. T. 40. № 4. C. 288-295.

7. *Andreev S.A., Andreeva N.P., Barashkov M.S., Demkin V.K., Bagaev S.N., Klochkov D.V., Chistyakov A.A., Nalobin A.S., Epikhin V.M., Kalinnikov Yu.K.* $LiNbO_3$ – monocrystal – based Parametric Light Generator with "long"-wave resonator and AOTF application for parametric generation spectrum control. // Proceeding of VNIIFTRI. 2005. 48 (140). P. 35-41.

8. *Badikov V.V., Don A.K., Mitin K.V., Seregin A.M., Sinaiskii V.V., Shchebetova N.I.* A $HgGa_2S_4$ optical parametric oscillator. // Quantum Electronics. 2003. V. 33. № 9. P. 831-832.

9. *Badikov V.V., Kuzmin N.V., Laptev V.B., Malinovsky A.L., Ryabov E.A., Mitin K.V., Nazarov G.S., Seryogin A.M., Shchebetova N.I.* A study of the optical and thermal properties of nonlinear mercury thiogallate crystals. // Quantum Electronics. 2004. V. 34. № 5. P. 451-456.

10. *Badikov V.V., Don A.K., Mitin K.V., Seryogin A.M., Sinaiskiy V.V., Schebetova N.I.* Optical parametric oscillator on an $Hg_{1-X}Cd_XGa_2S_4$ crystal. // Quantum Electronics. 2005. V. 35. № 9. P. 853-856.

11. *Badikov V.V., Don A.K., Mitin K.V., Seregin A.M., Sinaiskii V.V., Shchebetova N.I., Shchetinkina T.A.* Optical parametric mid-IR $HgGa_2S_4$ oscillator pumped by a repetitively pulsed Nd: YAG laser. // Quantum Electronics. 2007. V. 37. № 4. P. 363-365.

12. *Andreev S.A., Andreeva N.P., Barashkov M.S., Bel'dyugin I.M., Demkin V.K., Evstigneev V.L., Krymskij M.I., Mitin K.V., Rogalin V.E., Seregin A.M., Stepanov A.S., Talalaev M.A., Filatov V.V.* Perspektivnye napravleniya issledovanij v oblasti ehffektivnoj transportirovki lazernyh puchkov cherez fazoiskazhayushchie sredy. // Uspekhi sovremennoj radioehlektroniki. 2010. № 5. S. 23-43.

13 *Isaev V.A., Lebedev A.V., Plautskij P.G., Andreeva N.P., Evstigneev V.L., Mitin K.V., Bykova M.B., Goreeva ZH.A., Kozlova A.P., Kozlova N.S.* Poluchenie krupnyh monokristallov so strukturoj sheelita i ih opticheskie svojstva. // v sb. Tezisy dokladov mezhdunarodnogo simpoziuma «Fizika kristallov 2013». MISiS. Moskva. 2013. s. 81.

14. *Isaev V.A., Lebedev A.V., Plautskij P.G., Andreeva N.P., Evstigneev V.L., Mitin K.V., Bykova M.B., Goreeva ZH.A., Kozlova A.P., Kozlova N.S.* Rost monokristallov, lazernaya generaciya i koehfficient ehlliptichnosti polyarizacii lazernogo izlucheniya, proshedshego cherez opticheskie ehlementy iz $SrWO_4$ i $SrMoO_4$. // Materialy XIX Vseros. Konf. «Optika i spektroskopiya kondensirovannyh sred». Krasnodar. 2013. S. 195 – 199.

15. *Evstigneev V.L., Mitin K.V., SHCHebetova N.I., Kulikova E.O., Lebedev A.V., Avanesov S.A., Ignat'ev B.V., Isaev V.A.* Dvuhchastotnyj VKR – preobrazovatel' na osnove kristalla vol'framomolibdata bariya. // Materialy XXI Vseros. Konf. «Optika i spektroskopiya kondensirovannyh sred». Krasnodar. 2015. S. 297 – 301.

16. *Piper J.A., Pask H.M.* Crystalline Raman Lasers. // IEEE J. of selected topics in quantum electronics. 2007. V. 13. №3. P. 692-704.

17. *Cerny P., Jelinkova H., Zverev P.G., Basiev T.T.* Solid state lasers with Raman frequency conversion. // Prog. Quantum Electron. 2004. V. 28. P. 113-143.

18. *SHpak P.V.* Vnutrirezonatornoe VKR–preobrazovanie izlucheniya mini–lazerov s prodol'noj diodnoj nakachkoj. // Avtoreferat Dissertacii k.f.–m.n. Minsk, 2017. 25 c.

19. *Zverev P.G.* VKR aktivnye kristally i razrabotka VKR preobrazovatelej na ih osnove. // Avtoreferat Dissertacii d.f.-m.n. M. 2011. 31 s.

20. *Basiev T.T.* New crystals for Raman lasers. // Physics of the Solid State. 2005. T. 47. № 8. C. 1400-1405. DOI: 10.1134/1.2014477.

21. *Basiev T.T., Osiko V.V.* New materials

for SRS lasers. // Russian Chemical Reviews. 2006. V. 75. № 10. P. 847-862. DOI: 10.1070/RC2006v075n10ABEH003626.

22. *Kaminskii A.A., Hemley R.J., Lai J., Yan C.S., Mao H.K., Ralchenko V.G., Eichler H.J. and Rhee H.* High-order stimulated Raman scattering in CVD single crystal diamond. // Laser Physics Letters. 2007. V. 4. №5. P. 350-353.

23. K*aminskii A.A., Ral'chenko V.G., Bol'shakov A.P., Yoneda H., Inyushkin A.V*. ^{12}C and ^{13}C diamond crystals: a milestone in the development of diamond photonics. // Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters). 2016. V. 104. № 5. P. 347-352. doi.org/10.7868/S0370274X16170124.

24. *Khmelnitskiy R.A*. Prospects for the synthesis of large single-crystal diamonds. // Physics-Uspekhi. 2015. V. 58. № 2. P. 134-149. DOI: 10.3367/UFNe.0185.201502b.0143.

25. *Sabella A., Piper J.A., Mildren R.P*. Diamond raman laser with continuously tunable output from 3.38 to 3.80 μm. // Optics letters. 2014. V. 39. № 13. P. 4037-4040. DOI: 10.1364/OL.39.004037.

26. *Williams R.J., Kitzler O., McKay A., Mildren R.P.* Investigating diamond raman lasers at the 100 w level using quasi-continuous-wave pumping. // Optics Letters. 2014. V. 39. № 14. P. 4152-4155. DOI: 10.1364/OL.39.004152.

27. *Pashinin V.P., Ralchenko V.G., Bolshakov A.P., Ashkinazi E.E., Gorbashova M.A., Yurov V.Yu. and Konov V.I.* External-cavity diamond Raman laser performance at 1240 nm and 1485 nm wavelengths with high pulse energy. // Laser Phys. Lett. 2016. 13. 065001 (4pp) doi:10.1088/1612-2011/13/6/065001.

28. *Williams R.J., Nold J., Strecker M., Kitzler O., McKay A., Schreiber T., and Mildren R.P.* Efficient Raman frequency conversion of high-power fiber lasers in diamond. // Laser &Photonics Reviews. 2015. June 25. P. 1 – 7. DOI: 10.1002/lpor.201500032.

29. *Krymskij M.I., Mezhevov V.S., Rogalin V.E., EHl'man A. R.* Razrabotka tekhnologii proizvodstva ^{13}C – preparatov, medicinskih priborov i metodik dyhatel'nyh testov dlya rannej klinicheskoj diagnostiki zabolevanij. // sb. tezisov V mezhd. konf. FiztekhBio, g. Dolgoprudnyj. 2015. s. 43 - 45.

30. http://www.as-photonics.com/products/matlab-snlo

31. *Barashkov M.S., Andreeva N.P*. Ustrojstvo formirovaniya kogerentnogo izlucheniya chastotno-impul'snogo «belogo» lazera. // Patent RF № 107597 ot 13.04.2011.

32. https://www.christiedigital.com/amea/cinema-projection-solutions/high-frame-rates

33. V*aidyanathan, Mohan; Grayson, Timothy P.; Hardie, Russell C.; Myers, Lawrence E.; McManamon, Paul F.* Multispectral laser radar development and target characterization. // Proc. SPIE V. 3065. P. 255-266. Laser Radar Technology and Applications II, Gary W. Kamerman; Ed.

34. *Isaev V.A., Ignatiev B.V., Lebedev A.V., Avanesov S.A., Plautskiy P.G.* The Czochralski Growth and Structural Investigations of $Ba(MoO_4)_{(X)}(WO_4)_{(1-X)}$ Solid Solution Single Crystals. // J. Cryst. Growth. 2013. V. 363. P. 226-233.

35. *Pask H.M.* The design and operation of solid-state Raman lasers. // Progress in Quantum Electronics. 2003. V. 27. P. 3-56.

36. Uglerodnaya fotonika, pod red. V.I. Konova. M. Nauka. 2017. 201 s.

УДК 681.2.084

российский индекс научного цитирования Science Index

ГИБРИДНАЯ 3D ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ГОЛОВКА ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ КОНТАКТНЫХ И БЕСКОНТАКТНЫХ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ РАЗМЕРОВ 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
Омский государственный технический университет, г. Омск
Научный центр волоконной оптики РАН, г. Москва
Институт физики твердого тела РАН, Московская область, г. Черноголовка
Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород
Московский государственный технологический университет «Станкин», г. Москва

E-mail: leun@laspace.ru

Аннотация: *Статья представляет гибридную 3D измерительную головку, состоящая из контактной измерительной головки касания с полым рубиновым сферическим наконечником радиусом r_0 и введенной внутрь нее разработанной бесконтактной волоконно-оптической измерительной головкой. Эта гибридная 3D головка может использоваться в двух режимах измерений:*

1) контактных измерений с возможностью формирования первого триггерного выходного сигнала $U_к \sim 1(r–r_0)$;

2) бесконтактных измерений с возможностью формирования второго триггерного выходного сигнала $U_{бк}(r) \sim 1(r–r_a)$, where r_a – радиус сформированной пространственной чувствительной полусферы при выполнении условии $r_a > r_0$.

Ключевые слова: измерительная головка, контактные измерения, бесконтактные измерения, координатная измерительная машина, координатные измерения.

HYBRID 3D MEASURING HEAD FOR HIGH-PRECISION CONTACT AND NON-CONTACT COORDINATE MEASUREMENTS OF THE SIZES OF PRODUCTS OF THE ROCKET AND SPACE INDUSTRY

LEUN E.V., SYSOEV V.K., SHALAY V.V., BELOVOLOV M.I., KURLOV V.N., VOLKOV P.V., SHULEPOV A.V.

JSC NPO Lavochkin, Moscow region, Khimki
Omsk state technical University, Omsk
Fiber optics research center RAS, Moscow, Russia
Institute of solid state physics, RAS, Moscow region, Chernogolovka
Institute for physics of microstructures RAS, Nizhny Novgorod, Russia
Moscow state technological University «Stankin», Moscow

E-mail: leun@laspace.ru

Abstract:
The article presents a hybrid 3D measuring head, consist of the contact measuring head touch with a hollow ruby (or sapphire) spherical cap of radius r_0 and put inside it developed noncontact fiber-optic measuring head. This hybrid 3D head can be used for two measurement modes:
1) contact measurements with the possibility of forming the first trigger output signal $U_c(r) \sim 1(r–r_a)$;
2) non-contact measurements with the possibility of forming the second trigger output signal $U_{nc}(r) \sim 1(r–r_a)$, where ra is the radius of the spatial-sensitive hemisphere with condition $r_a > r_0$ as head of the touch.

Keywords: measuring head, contact measurements, non-contact measurements, coordinate measuring machine, coordinate measuring.

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 $U_{вых}(l) \sim 1(l-l_0)$ в момент касания наконечника такой головки с поверхностью изделия для синхронного высокоточного 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 ≈0,5-1,5 мкм. Однако необходимость достижения высокой точности измерений обеспечивается за счет малой скорости 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 становится 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, судя по публикациям, достигнут определенный технологический прогресс за рубежом и в России [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, определяемых 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 и 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], что позволило получить сферические наконечники малых размеров с внутренним каналом. Развитие методов низкокогерентной 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 $\alpha \approx \pm\pi/2$ 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 низкокогерентного интерферометра) измерителей, измерительного стержня 3 со сферическим рубиновым (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 и 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.

Во время контактных координатных измерений используется механическая конструкция 3D измерительной головки, а именно: измерительный стержень 2 со сферическим рубиновым наконечником 4. При подведении и последующем касании таким рубиновым наконечником 4 поверхности изделия 10 измерителем 1 формируется переключающий электромеханический выходной сигнал $U_к(r) \sim 1(r-r_0)$ с синхронным высокоточным оцифровыванием данной точки осуществляемым лазерным интерферометром с точностью измерений не хуже 0,1 мкм по трем основным осям OX, OY и OZ: l_x, l_y, и l_z.

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 диаграммой излучения и приема $\alpha \approx \pi$ ср;

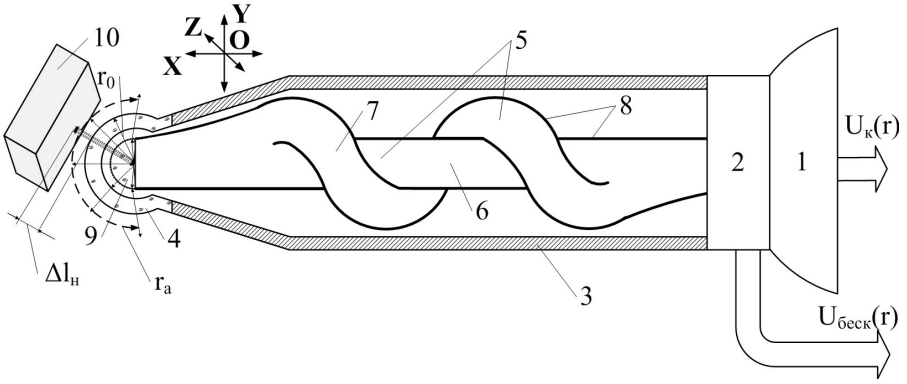


Рисунок 2.
Гибридная 3D измерительная головка

2) создание бесконтактным измерителем 2 оптических потоков с заданной разностью хода Δl с максимумом контраста интерференционной картины между ними для формирования снаружи сапфирового наконечника 4 единственной сферической пространственно-чувствительной координаты l_a.

Процесс бесконтактных координатных измерений заключается в следующем. В процессе приближения сапфирового наконечника 4 к поверхности изделия 10 происходит пересечение сферической пространственно-чувствительной координаты радиусом r_a с регистрацией максимумом контраста интерференционной картины измерителем 2 и генерированием электронного переключающего выходного сигнала $U_{беск}(r)\sim1(r-r_a)$ для синхронных измерений по трем координатам l_x, l_y, и l_z и аналогичному выше процессу высокоточного оцифровывания данной точки лазерным интерферометром.

Помимо описанных выше режимов работы возможен также импульсный режим работы, позволяющий существенно повысить амплитуду сигнала в импульсе и соответственно точность измерений, использования невидимого для человека ИК-излучения, отличия бесконтактного режима работы от контактного и освещаются особенности алгоритмов работы разработанной измерительной головки при бесконтактных координатных измерениях.

Разрешающая способность низкокогерентного интерферометра, составляющего оптическую схему разработанной гибридной 3D измерительной головки, определяется для двух режимов измерений: «по огибающей» и «по фазе». При измерениях «по огибающей» разрешающая способность, как правило, не превышает единиц микрометров. В случае измерений «по фазе» разрешающая способность существенно выше и определяется разрешающей способности фазовых измерений, значения которой может быть не более десятка нанометров [5].

В данной 3D измерительной головке используются выполненные на основе современных оптических технологий элементы, а именно: рубиновый (или сапфировый) полый высокопрочный наконечник с капилляром, световодный элемент, микрооптические элементы в виде наконечников и микролинз, созданных на торцах одно- и многомодовых волокон.

Рубин является ближайшим родственником сапфира (Al_2O_3) и несмотря на наличие примеси хрома (Cr) к нему применим почти весь современный арсенал технологий выращивания элементов нужной формы и размеров. Так в последнее время разработана технология получения профилированных кристаллов сапфира различного поперечного сечения с капиллярными каналами с минимальными диаметрами до 1,2 мм со сферическими наконечниками малых размеров [4].

Отличительная особенность световодного элемента заключается в использовании спиральной закрутки одного (или обоих) многомодовых световодов. Технология создания спиральных, биспирально-конических световодных элементов различных конструкций при использовании различных волокон, в т.ч. многомодового кварц-полимерного волокна КП-200 с диаметром сердцевины 200±2 мкм с нанесенным металлизированным покрытием на основе алюминия (Al) толщиной 15–50 мкм была отработана и исследована еще в середине 80-х годов XX века. Экспериментально отработанная технология позволяет создать закрутку световодов с числом витков, начиная от 1, с минимальным шагом скрутки равным диаметру световода.

Кроме того, к настоящему времени существует достаточно много разных технологий изготовления наконечников на торцах одно- и многомодовых волокон для рассеивания или фокусировки излучения. В [6] представлен несимметричный полимерный наконечник, изготовленный на основе полимерной технологии, с диаграммой направленности излучения и приема оптического потока более $\pm\pi/2$ ср. При создании шероховатой поверхности на его поверхности с $R_z\approx\lambda\approx1$ мкм, например, за счет травления или при добавлении рассеивающих частиц в состав наконечника при его соз-

дании, обеспечивающих дополнительное диффузное рассеяние, неравномерности диаграммы направленности могут быть существенно снижены.

Фокусирующие микролинзы могут быть созданы под действием сил поверхностного натяжения при плавлении торца волокна, либо нанесенного на него фоторезиста, либо также с применением полимерных технологий.

Список литературы:

1. *Гапшис 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. *Шикунова 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., Тертышник 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.

УДК 621.794.4

российский индекс научного цитирования Science Index

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ВОЕННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ – ОДНА ИЗ ОСНОВ НАЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

БАЖЕНОВ И.А. - оператор 3 научной роты КВ ВКС РФ

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

E-mail: vanya.bazhenov.94@mail.ru

Баженов И.А.

Аннотация: *В статье рассматриваются основы управления качеством военно-промышленного комплекса Российской Федерации. Рассмотрена структура военно-промышленного комплекса Российской Федерации, ее управляющий состав. Исследуется доля мирового рынка по экспорту военной продукции стран-лидеров, к которым относится Российская Федерация, а также анализируется объем производства предприятий военно-промышленного комплекса по отраслям промышленности. Выявлены некоторые особенности обеспечения национальной безопасности Российской Федерации, которые отрицательно влияют на развитие оборонно-промышленного комплекса страны, а также представлены пути обеспечения национальной безопасности страны, а именно: является импортозамещение, образование высокотехнологических отраслей производства, укрепление позиций в областях ядерной энергетики и освоения космоса, а также развитие оборонно-промышленного комплекса страны.*

Ключевые слова: военно-промышленный комплекс, управление качеством, конкурентоспособность, экономика.

QUALITY MANAGEMENT OF THE MILITARY-INDUSTRIAL COMPLEX OF THE RUSSIAN FEDERATION IS ONE OF THE BASES OF NATIONAL SECURITY

BAZHENOV I.A.

PJSC «Krasnogorsky plant him S.A. Zvereva», Krasnogorsk

E-mail: vanya.bazhenov.94@mail.ru

Abstract: *The article deals with the fundamentals of quality management of the military-industrial complex of the Russian Federation. The structure of the military-industrial complex of the Russian Federation and its managing staff are examined. The share of the world market for the export of military products of the leading countries, to which the Russian Federation belongs, is investigated, as well as the volume of production of enterprises of the military-industrial complex by branches of industry. Some features of ensuring the national security of the Russian Federation have been identified, which have a negative impact on the development of the country's defense and industrial complex, as well as ways of ensuring national security of the country, namely: import substitution, the formation of high-tech industries, strengthening positions in nuclear energy and space exploration, as well as the development of the country's military-industrial complex.*

Keywords: military-industrial complex, quality management, competitiveness, economy.

В настоящее время военно-промышленный комплекс (ВПК) Российской Федерации является неотъемлемой становления экономики страны. Ежегодно из объема государственного оборонного заказа в казну Российской Федерации поступает до 20-30% вырученных денежных средств [1].

Военно-промышленным комплексом Российской Федерации руководит Коллегия Военно-промышленной комиссии Российской Федерации, председателем которой является Президент Российской Федерации [2].

Кроме того, ВПК Российской Федерации представляет собой объединение производителей военной продукции, органов государственной власти и научных организаций (центров), конструкторские бюро, полигоны и испытательные лаборатории, высококвалифицированные специалисты, занимающиеся исследованиями в области обеспечения обороны страны, модернизации различных видов вооружения и создания новых [1].

Одним из ключевых факторов повышения или снижения роста экономики за счёт государственного оборонного заказа является конкурентоспособность производителей вооружения и военной техники на мировом рынке, поэтому качество готовой продукции играет особую роль. Само понятие «качество» подразумевает удовлетворение потребностей потребителей и влияние на заинтересованные стороны [3].

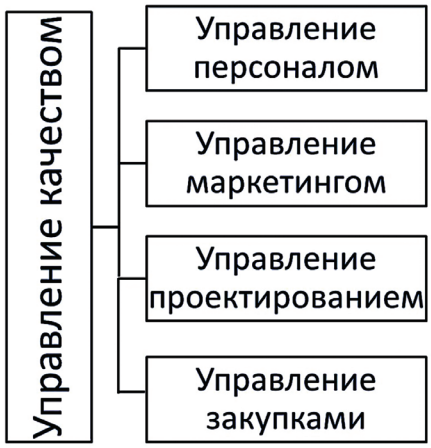


Рисунок 1.
Приоритеты управления качеством на предприятиях

Управление качеством на предприятиях включает в себя следующие приоритеты, представленные на рис. 1.

Каждая из стран-лидеров по экспорту вооружения, к которым относится и Российская Федерация, пытается превзойти друг друга, и, тем самым, заработать на продаже собственного произведенного оружия.

Помимо Российской Федерации (доля мирового рынка которой составляет около 25%) к странам-лидерам по экспорту вооружения можно отнести [4]:

– США (33%);
– Китай (5.9%);
– Францию (5.6%);
– Германию (4.7%);
– Великобританию (4.5%);
– Испанию (3.5%);
– Италию (2.7%);
– Украину (2.6%);
– Нидерланды (2%).

В таблице 1 представлено распределение предприятий ВПК России по отраслям промышленности [5].

По данным Минпромторга, объем производства военно-промышленного комплекса Российской Федерации за 2016 год вырос на 11% по сравнению с предыдущим 2015 годом, причем рост объема выпускаемой продукции коснулся практически всех отраслей производства, кроме ракетно-промышленной.

Существенный прирост наблюдается в радиопромышленности, он составляет около 18.5%; промышленность боеприпасов и спецхимии – 14.4%; производство обычного вооружения – 10.1%; авиационная промышленность – 9%; судостроение – 3.9% [6].

Исходя из пункта 62 Указа Президента Российской Федерации от 31.12.2015 г. № 683 «О Стратегии национальной безопас-

Таблица 1.
Распределение предприятий военно-промышленного комплекса по отраслям промышленности

№ п/п	Отрасли промышленности военно-промышленного комплекса	Подразделения отраслей промышленности военно-промышленного комплекса
1	Авиационно-космическая	Авиационная
		Ракетно-космическая
2	Производство боеприпасов	Промышленность боеприпасов и спецхимии
3	Производство обычного вооружения	-
4	Судостроение	Судостроительная промышленность
5	Производство систем управления	Радиопромышленность
		Промышленность средств связи
		Электронная промышленность

ности Российской Федерации» основными условиями обеспечения национальной безопасности страны является импортозамещение, образование высокотехнологических отраслей производства, укрепление позиций в областях ядерной энергетики и освоения космоса, а также развитие оборонно-промышленного комплекса страны. Внедрение данных предложений должно привести к модернизации военного производства, подготовке высококвалифицированных специалистов, а также выпуску качественной и востребованной продукции [7].

Также в Указе Президента Российской Федерации прописаны и негативные стороны обеспечения национальной безопасности, которые отрицательно влияют на развитие оборонно-промышленного комплекса страны. К ним можно отнести:

– низкую конкурентоспособность страны на мировом рынке по производству военной продукции;

– наличие зависимости от иностранных поставщиков;

– низкий уровень развития и внедрения новых технологий.

Проанализировав негативные стороны обеспечения национальной безопасности можно сделать вывод, что для обеспечения качества в военно-промышленном комплексе Российской Федерации необходимо выделить основные направления для развития, к которым можно отнести [1]:

а) создание и разработка конкурентоспособных образцов вооружения;

б) повышение квалификации специалистов военно-промышленного комплекса;

в) оптимизация военно-промышленного комплекса;

г) развитие научно-производственной организации труда на производстве;

д) импортозамещение иностранной продукции товарами, произведенными на территории Российской Федерации (поддержка российского производителя);

е) внедрение технологий двойного назначения для создания современных (и на перспективу) технологий гражданского и военного назначения;

ж) стабилизация финансового и социально-экономического предприятий военно-промышленного комплекса;

з) прекращение разработок и производства, устаревших образцов и сокращения типажа разрабатываемых и выпускаемых вооружений и военной техники;

и) обновление производственной базы предприятий.

Исходя из вышеперечисленных направлений развития, необходимо выделить главную цель военно-промышленного комплекса – удовлетворение потребностей заказчиков (потребителей) выпуском качественной продукцией. Это позволит значительно по-

высить боеспособность и национальную безопасность Российской Федерации [1].

Список литературы:

1. *Бессонов В.В.* Военно-промышленный комплекс – основа обеспечения военной безопасности страны. Ученые записки Тамбовского отделения РоСМУ. Серия: Экономика и экономические науки. 2016. № 5. С. 66-70.

2. Официальный сайт «Коллегия Военно-промышленной комиссии Российской Федерации». Режим доступа: http://www.oborona.gov.ru/vpk/members1

3. ГОСТ Р ИСО 9000-2015 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь».

4. Официальный сайт «Вести-экономика». Режим доступа: http://www.vestifinance.ru/articles/67810?page=1

5. *Ковбаса Н.А*. Современное состояние оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации. Российское предпринимательство. Серия: Экономика отрасли. 2012. № 12 (210). С. 94-100.

6. Официальный сайт «Телеканал «Звезда». Режим доступа: https://tvzvezda.ru/news/opk/content/201703241151-vzk2.htm

7. Указ Президента РФ от 31.12.2015 г. № 683 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации».

УДК 338.124.4

российский индекс научного цитирования Science Index

АВТАРКИЯ – ВОЗМОЖНАЯ СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ СОЮЗНОГО ГОСУДАРСТВА

ПЕЛИХ С.А.

Академия управления при Президенте Республики Беларусь

E-mail: dashkevich_alesya@mail.ru

Аннотация: *Парадигма развития современной цивилизации англо-саксонского типа ясно показывает ее тупиковый характер. 2030 год будет переломным пунктом современной цивилизации. Сырьевой тренд развития экономики Союзного государства грозит для нас катастрофой. Этот тренд нужно изменить, взяв курс на автаркию, которая до 60-70 гг. была характерна для СССР. Нужна соответствующая стратегия, которая позволит гармонично развить все отрасли для удовлетворения внутреннего спроса (до 60-70 % ВВП) до 2030 года, сократив до минимума продажу сырья.*

Ключевые слова: плазмохимическое травление, силикатное стекло, производительность, уравнение регрессии.

AVTARKIA IS A POSSIBLE STRATEGY FOR THE DEVELOPMENT OF THE UNION STATE

PELIKH S.A.

Academy of management at the President of Republic of Belarus

E-mail: dashkevich_alesya@mail.ru

Abstract: *The paradigm of the development of modern Anglo-Saxon civilization clearly shows its impasse. 2030 will be a turning point of modern civilization. The raw trend of the development of the economy of the Union State threatens us with a catastrophe. This trend needs to be changed by taking a course toward autarky, which characteristics the USSR from the 1960s till 1970s. We need an appropriate strategy that will harmoniously develop all industries to meet domestic demand (up to 60-70% of GDP) by 2030, minimizing the sale of raw materials.*

Keywords: autarky, development paradigm, trend, raw material economy, development strategy, domestic demand, deadlock.

Парадигма развития современной цивилизации англо-саксонского типа ясно показывает его тупиковый характер. Необузданная жажда потребительства, хищническое отношение к природе и ресурсам планеты, падение морали – явные признаки приближающегося коллапса. 2030 год видимо будет переломным пунктом современной цивилизации. При таких темпах потребления исчерпаются углеводородные источники сырья, воды, чистого воздуха, плодородной земли. Многие государства пытаются проработать возможные сценарии своего развития, наметить стратегии выживания. В этих стратегиях все большее внимание отводится России с ее неисчерпаемыми ресурсами. Роль незавидная – жертвенного быка, которого надо зарезать, чтобы продлить жизнь нынешней модели цивилизации. Один из возможных сценариев выживания для нее это автаркия, которая для России привычное дело, она позволяла ей развиваться успешно, самобытно и самодостаточно многие столетия до 1970 гг. В это время, в СССР, частью правящей элиты было принято решение в корне поменять парадигму социально-экономического развития страны с целью обогащения, для чего решить, в угоду Запада, ряд важнейших задач.

Во-первых, убрать мощного противника, для чего разрушить СССР, расчленить его на части, в том числе его славянское ядро (Украина, Беларусь, Россия).

Во-вторых, подготовить (ценой громадных усилий жителей страны, его обнищания) минеральные ресурсы Сибири к их присвоению в целях развития стран Запада, чтобы исключить их использование внутри страны. Так, например, к 1970 году была в 10 раз увеличена добыча нефти в Западной части Сибири.

Для этого были значительно урезаны все социальные программы, урезаны до минимума инвестиции во все отрасли, кроме сырьевых и военно-промышленного комплекса.

Этим решалась задача необратимого отставания народного хозяйства СССР и его последующего разрушения к 90-х гг. Получалась удручающая ситуация, когда страна, в 60 гг. первой пославшая человека в космос, не смогла наладить выпуск нормальной обуви, одежды, бытовой техники, мебели, автомобилей, добротного, комфортного жилья. Этим подготавливались протестные настроения жителей страны с целью лишения существующего политического строя социальной поддержки.

Существовавшая до 60-х гг. самодостаточная, бережливая, чрезвычайно эффективная модель экономики СССР, которая работала как единый комплекс, нацеленный на выпуск сложной, наукоемкой конечной продукции, где и собиралась вся добавленная стоимость. Т.е. это был вертикально-интегрированный мегахолдинг, в котором все промежуточные стадии обработки материалов были минимальны по стоимости, потому что не включали прибыль. По такой схеме сейчас работают все ТНК Запада, чем и объясняется их высокая эффективность. Сменив автаркию СССР на глобализм, мы загнали себя в мегаказино, в котором, как и положено, всегда проиграешь, потому что в установлении привил игры мы участвовать никак не могли.

Для того, чтобы реализовать новую стратегию нужно было уничтожить саму страну и ее несущие опоры:

- славянское ядро и прежде всего русский народ;
- коммунистическую партию.

Для этой цели, прежде всего, информация о международной торговле, «интернациональной помощи», оборонных расходов и межбюджетных отношениях между республиками была строго засекречена.

Это позволило бесконтрольно расходовать до 50 % ВВП страны на пустые и ненужные проекты, например:

- военные расходы СССР превышали па-

ритетные расходы США на 30%. Так, например, в 1970 г. военные расходы СССР составляли 90 млрд долл. США (13% ВВП), США – 78 млрд. (5% ВВП). В результате построили и содержали 63 подводные лодки-атомоходы, США – 40 шт., производили 2000 танков ежегодно (в эквиваленте 1 млн. легковых автомобилей) [1, с.285];

- за 1955-1977 годы построили 3560 промышленных предприятий в странах Азии и Африки (сейчас в собственности Запада) [2, с.119];

- экспорт СССР всегда превышал импорт на 10 %, например, в 1979 году экспорт составлял 49,6 млрд. долл. США, импорт – 44,5 млрд. долл. США. Разница шла на помощь сомнительным режимам, которые заявляли о социалистической ориентации;

- все сырье (алмазы, лес, редкие металлы, нефть, газ) продавали по цене в десятки раз меньше международных. Так, например, алмазы мы продавали «Де Бирс» как необработанное сырье за 5 млрд. долл., а «Де Бирс» после обработки за них выручал 50 млрд. долл. США, круглый лес продавали по 5 долл. за 1 $м^3$, а он стоил до 50 долл. за 1 $м^3$;

- инвестиции шли на освоение сырьевых запасов Сибири и крайнего Севера сверх всяких разумных пределов. Объемы производства представлены в таблице.

Таблица. Объемы производства в СССР

	1965 г.	1980 г.
Электроэнергия, кВт/ч	506	1980
Нефть, млн. т	243	603
Газ, млрд. $м^3$	129	435
Железная руда, млн. т	107	245
Никель, тыс. т	100	450

До 50% этих ресурсов уходили по бросовым ценам на Запад. Сейчас уходят все ресурсы иностранным владельцам этих богатств.

- Все бюджеты союзных республик (кроме России, Украины, Беларуси) до 50% формировались из центра, из ресурсов этих трех субъектов.

Результат развала был достигнут к концу 80-х гг. крайней отсталостью этих республик. Так жилой фонд до 80% состоит из непригодного жилья (не газифицирован, нет водопровода и канализации). Остальные 20% имеют эти блага, но у них выработан срок эксплуатации. Кроме Беларуси, нет дорожной инфраструктуры, нет своих современных курортов, здравоохранения и т.д. Нет современного сельского хозяйства, до 50% разрушена промышленность.

В результате этой тщательно продуманной и блестяще проведенной операции Запада, в 1991 году мы проиграли III мировую войну, и Горбачев подписал полную капитуляцию. Отсюда мы должны сделать вывод, что должна быть сформулирована еще более тщательно продуманная Программа по возрождению нас из кризиса.

В основе ее должна лежать автаркия, которая в наибольшей степени отвечает нашим условиям.

Нашим человеческим потенциалом (200 млн. чел, куда входит славянское ядро), территорией, минеральными ископаемыми, мы вполне обеспечим функционирование 50 мегатехнологий, которые составляют основу современной цивилизации. При этом 80-85% продукции должны производиться на внутренний рынок, 15% ВВП будет участвовать в международном обмене товарами и услугами, при этом с 2030 года сырье продавать мы не должны, так как на 300 лет развития, которые прогнозируются на Золотой век России нам его самим не хватит.

Имея такие ограничения мы и должны построить нашу Программу на 30-50-100-150-300 лет.

Промышленная политика «2030» должна иметь целью освоить весь спектр (50 мегатехнологий) отраслей для самодостаточного развития.

Понимая, что нынешнее благополучие Запада основывается на нашем дармовом сырье и неэквивалентном обмене в международной торговле, наша Программа вызовет у них шок, потому что потребует коренной перестройки основ их уклада жизни и психологии.

Поэтому в основе программы «2030» должна лежать проблема безопасности, и надо начинать с финансовой, продовольственной, параллельно информационной, военной и т.д.

Проблема усугубляется из-за либерально-консервативной политики денежных властей, не предпринимающих особых усилий по созданию целевых институтов для направления дешевых денег на технологическую модернизацию в сферах обрабатывающей промышленности и сельского хозяйства [3, с.37].

В основе построения самодостаточной экономики должна лежать независимая денежно-кредитная сфера, которую должны характеризовать следующие параметры:

- объем денежной массы (М2) должен соответствовать объему ВВП;
- курс валюты должен определяться по паритету покупательской способности (ППС);
- должна быть введена внешняя конвертируемость рубля и «критичный импорт»;
- все операции по экспорту должны осуществляться в рублях.

Сейчас эти показатели серьезно отличаются от заданных, нормативных. (так М2 составляет 42% от ВВП, курс рубля более 2 раз занижен от ППС), чем и вызваны значительные потери во внешнеэкономической деятельности страны.

Автракия позволит резко сократить эти издержки и вообще сведет их к значительному общенациональному эффекту. Ведь из макроэкономики известно, чем ниже стоимость промежуточных переделов, тем выше добавленная стоимость при выпуске конечной, наукоемкой продукции.

Нефть, металлы, лес, пропущенные через вертикально интегрированные отечественные производственные процессы дают 10-кратный эффект в конечной продукции. При этом надо помнить, что вертикально-интегрированные корпорации могут иметь смешанную государственно-частную форму собственности, но правила игры, т.е. налоговые, таможенные, финансовые, правовые нормы наклоняли прямо или косвенно действовать по этим правилам все субъекты хозяйствования. Мировая практика являет тому много примеров, особенно Китай, который сумел совместить не только разные формы собственности, но и различные идеологические системы.

Понятно, что речь не должна идти о пересмотре прав собственности, национализации и других мерах силового воздействия. Например, собственникам российского алюминиевого комплекса и их представителю господину О.В. Дерипаска не будет выгодно продавать алюминий за рубеж. Выход – вкладывать средства в строительство российских заводов (авиапромышленность, строительство, товары народного хозяйства и т.д.), потребляющих этот металл, или продавать свои мощности России.

Чтобы этот переход был плавным, эволюционным нужна соответствующая Программа реиндустриализации России, которая бы предусматривала использование отечественного сырья внутри страны, например, с 2025 года.

Все строительство вести из собственного сырья (красный кирпич, дерево и т.д.).

Для этого должна быть создана стратегия эффективного использования наших добывающих отраслей. Она должна заключаться во встраивании нашего сырья в промежуточные переделы отечественных ТНК вертикально-интегрированного типа. Это отрасли нефтехимии, новых эластических материалов, конструкционных материалов, мощная автомобилестроительная, авиастроительная

и множество других новых отраслей. Параллельно мы ограничиваем освоение и добычу сырья, поддерживая его достигнутый уровень на сотни лет вперед.

Много ресурсов уйдет на строительство современного благоустроенного жилья, прежде всего коттеджного типа. Здесь надо ставить национальную задачу «каждой семье свой дом» и за 10-15 лет посредством нормальной ипотеки (30 лет под 1,5-2%) решить эту проблему.

При этом строительство вести только из отечественных экологически чистых элементов – дерева, красного кирпича. Т.е. окна, двери, полы, обшивка стен должна изготавливаться из дерева. Понятно, что мебель, бытовые приборы должны быть отечественных производителей.

Этот этап легче всего запустит всю экономику, создаст миллионы рабочих мест, высокий внутренний спрос населения, потребует громадных денежных ресурсов, куда и пойдет наша выручка за ресурсы, которые сейчас уходят навсегда за границу.

Параллельно придется развивать отрасль альтернативных источников энергии, так этот позволит:

- дать тепло в каждый дом необъятной страны;
- значительно улучшить экологическую обстановку;
- прекратить «топить ночь ассигнациями», как говорил Менделеев;
- создать ультрасовременную отрасль с гарантированным сбытом продукции и сотнями тысяч рабочих мест;
- остановить «утечку мозгов» и вернуть обратно уже выехавших.

Принять Программу по развитию регионов и предпринимательства. В основу ее должны лечь несколько принципов:

- во-первых, ввести полностью федеральную бюджетно-налоговую систему, при которой 80% средств остается в регионе, а 20% идет в центр. Это позволит оценить объективно руководство региона, сделает систему показателей прозрачной, наглядной. У предпринимателей появятся «отцы» помощники и охранители их бизнеса, т.к. благосостояние всех ветвей власти региона на 50% будет зависеть от бюджета региона;
- во-вторых, развить предпринимательство таким путем, чтобы оно давало до 50% ВВП региона, 50% рабочих, 50% бюджетных поступлений. Для этого должно быть создано 35 тыс. предприятий малого бизнеса на 1 млн. жителей. Каждому малому предпринимателю государство должно изыскать 50-100 тыс. долл. начального капитала под 1,5-2% годовых сроком до 15 лет. Надо предусмотреть на 3-5 лет налоговые каникулы в начале деятельности. Нужно принять закон об уголовной ответственности любых органов власти за нанесенный ущерб предприятию;
- в-третьих, основная задача центрального и региональных правительств – завершить в сроки 5-7 лет создание институтов рыночной экономики и тем самым создать конкурентные рамочные условия отечественному бизнесу. По образцу японских кейрецу или южно-корейских чеболей создать 50 мощных отечественных корпораций с обязательным включением в их структуры банковских учреждений, один из членов наблюдательного Совета должен представлять интересы государства.

В парламенте должен быть представитель бизнес-сообщества с правом «вето» на любой законопроект. Пока согласительная комиссия не устранит замечания представителя, закон принят быть не может. Такая практика существует в Германии.

Автаркия требует соответствующей внешнеэкономической политики. Основной вопрос – что и в каком объеме нам нужно закупать за рубежом. Для этого, как было уже сказано, нам нужно тщательно отработать такой институт как «критичный импорт». Ясно, что там должны быть

исключительно товары и услуги для создания высокотехнологичной продукции и ряд экзотических продуктов (чай, кофе, какао), но никак не яблоки, помидоры, огурцы и другие фрукты, которые с успехом производятся в России. Бананы, ананасы нам вообще не нужны, т.к. все серьезные эксперты заявляют, что они генетически нам не подходят и в большинстве случаев вредны. Это наполовину сократит наш импорт, который и нужно покрыть экспортом высокотехнологичной продукции.

Автаркия требует полностью исключить утечку капитала из страны, кроме вывоза прибыли иностранных инвесторов. Известно, что сейчас более 300 млрд. долл. капиталов уходит из страны, вот эти средства и нужны для начала неоиндустриализации страны.

Сейчас в мире существует «феномен Исландии». Страна численностью 300 тыс. человек производит за год половину ВВП Республики Беларусь – 29 млрд. долл. США. Т.е. каждый житель Исландии работает за 18 белорусов и за 8 россиян. В Исландии 15 дней в году светит солнце, половина территории – вечный ледник, нет ни одного источника сырья кроме горячей воды из гейзеров, которой они полностью отапливают свои жилища и получают электроэнергию. Не произрастает ни один злак и овощ. Есть 1 млн. 200 тыс. овец и 200 тыс. лошадей. Полностью отсутствует эмиграция из страны. Это наш путь к возрождению.

Предлагаю коллегам расшифровать этот «феномен». Мой ответ – автаркия, это когда клок шерсти не продается напрямую, ни одна селедка без обработки на фабриках. Высочайшая эффективность использования каждого человека.

«Ключевое отличие предлагаемой стратегии опережающего развития от большинства ныне предлагаемых модернизационных стратегий состоит в выдвижении принципиально отличных от реализуемых ныне в большинстве стран мира целей, развитии и переходе к соревнованию с существующими системами по иным, нежели типичные для «позднего капитализма», критериям прогресса социально-экономической системы [4, с.15].

Список литературы:

1. *Леонтьев В.* Межотраслевая экономика. М., 1997.

2. Политика и экономика. М, 1981.

3. *Бодрунов С.Д.* Грядущее. Новое индустриальное общество: перезагрузка. С.-Петербург, 2016.

4. *Бузгалин А.В.* Эко-социо-гуманитарная ориентация экономики: тезисы к разработке стратегии опережающего развития : материалы XIII международной научно-практической конференции «Государственное регулирование экономики и повышение эффективности деятельности субъектов хозяйствования», 13-14 апреля 2017 г. Минск, 2017.