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.

Выходит 4 раза в год
Журнал печатается при поддержке руководителей организаций и предприятий оптической отрасли промышленности.

Редакционный совет:
Архипов Сергей Алексеевич
Абдулкадыров Магомед Абдуразакович
Балоев Виллен Арнольдович
Барышников Николай Васильевич
Бездидько Сергей Николаевич
Бокшанский Василий Бонславович
Дорошкевич Александр Георгиевич
Космодемьянский Евгений Владимирович
Одиноков Сергей Борисович
Сеник Богдан Николаевич
Тарасов Александр Петрович
Фатхудинов Рамзи Халич

Редакционная коллегия:
Семенов Александр Павлович – главный редактор
Азарова Валентина Васильевна
Крехова Елена Юрьевна
Лукин Анатолий Васильевич
Малькин Андрей Александрович
Морозов Сергей Александрович
Моисеев Евгений Анатольевич
Титов Евгений Иванович

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-53038 от 04.03.2013 г.

Адрес редакции:
Россия, 143403, Московская обл., г. Красногорск, ул. Речная, д. 8
Красногорский завод им. С.А.Зверева, Академия «Контенант»
www.contenant.ru
E-mail: book@contenant.ru,
Тел./факс: (495) 563-70-55

СОДЕРЖАНИЕ

Архипов С.А.
Юбилейная научно-практическая конференция «Оптико-электронные приборы и комплексы» 3

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПТИКЕ

Якушенков Ю.Г.
Тенденции развития оптико-электронных приборов и комплексов в рамках системного подхода к их проектированию 15

Малыгин М.С., Шлычков В.И.
Исследование эффективности применения узкопольных каналов наблюдения в авиационных оптико-электронных системах 21

Калинников Ю.К., Качарава А.Я., Поляков М.П.
Исследование качества изображения акустооптического видеоспектрометра с акустооптическим перестраиваемым фильтром в неколлимированных пучках для БПЛА 27

Федотов Ю.В., Булло О.А., Белов М.Л., Городничев В.А.
Дистанционная лазерная флуоресцентная диагностика состояния растительности 34

Якушенков П.О.
Проект фотонного АЦП 40

Городничев В.А., Белов М.Л., Всякова Ю.И., Кравцов Д.А., Михайловская М.Б.
Оценка лазерных контрастов «пленка нефтяного загрязнения – чистая водная поверхность» на безопасных для зрения длинах волн в УФ и ближнем ИК спектральных диапазонах ... 44

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Бакланов А.И.
Новые тенденции развития космических систем оптико-электронного наблюдения земли высокого разрешения 51

Иванов С.Е., Белов М.Л., Филимонов П.А., Городничев В.А., Михайловская М.Б.
Расчет энергетических характеристик аэрозольного лидара в ближнем УФ спектральном диапазоне 62

Белов М.Л., Фесенко Ю.С., Городничев В.А., Назаров В.В.
Двухспектральный рефлектометрический лазерный метод контроля состояния растительности 68

Азарова В.В., Макеев А.П., Кузнецов Е.В., Голяев Ю.Д.
О частотной характеристике Зеемановских лазерных гироскопов 74

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.

Мнения, высказанные в материалах журнала, не обязательно совпадают с точкой зрения редакции.

Ответственность за содержание статей несут авторы.

© При полной или частичной перепечатке ссылка на журнал «Контенант» обязательна.

Рукописи и фотографии не возвращаются.

Компьютерная верстка, корректорская читка - О.А.Чичигина

Отпечатано в типографии ПАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева».

Подписано в печать 15.11.2017
Формат 60x90/8 Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл.-печ. листов 17
Тираж 200. Заказ 2017.12-1762
Цена свободная.

Издательство «Контенант»

СОДЕРЖАНИЕ
(продолжение)

Шайда А.Н., Стратилатов Н.Р., Нонин А.С., Ткаченко А.С.
Определение параметров размеростабильного к действию температур сетчатого композитного корпуса телескопа 81

Калюгин В.С., Моисеев Е.А., Митрофанова Ю.С., Сеник Б.Н.
Проблемные вопросы промышленного производства тепловизионных объективов, работающих в спектральном диапазоне от 3 до 5 мкм 85

Самбаров Г.Е., Зубков Г.А.
Методика расчета аэродинамических характеристик тел с аэродинамической иглой в головной части летательного аппарата с помощью интегрированной среды разработки 91

Шуваев И.Н., Яковчук Е.А.
Разработка структуры и математической модели ПНК для ведущего высотного БЛА (атмосферного спутника) 96

Немтинов В.Б.
Графовая конвергенция научной проектно-технической инженерии технических систем и системной инженерии сложных систем на основе принципа дополнительности бора. Часть I. Инженерно-графовая методология процесса конвергенции инженерий 106

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СЕГОДНЯШНЕГО ДНЯ

Пелих С.А.
Китай: вчера, сегодня, завтра 126

19-20 октября 2017 года
на Красногорском заводе им. С.А.Зверева
была проведена
научно-практическая конференция
«Оптико-электронные приборы и комплексы»,
посвященная 75-летию завода.
В конференции в X раз принимала участие
научно-техническая академия «Контенант»

Журнал посвящен итогам конференции.

«ЮБИЛЕЙНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ»

АРХИПОВ С.А.
главный ученый секретарь академии «Контенант»

Юбилейная «Научно-практическая конференция «Оптико-электронные приборы и комплексы», посвященная 75-летию ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», состоялась 19-20 октября 2017 года. Это и десятая юбилейная конференция, организованная Академией «Контенант», отразила тематику основной сферы деятельности ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» - ведущего предприятия отечественного оптико-электронного приборостроения.

В конференции приняли участие представители 60 учреждений, организаций, предприятий и университетов, в том числе предприятия Холдинга «Швабе»: АО «ЛЗОС», АО «НПО «ГИПО», АО «ПО «УОМЗ им. Э.С. Яламова», АО «Швабе-Исследования», АО «Швабе- Оборона и Защита» и др. С докладами выступили представители предприятий ракетно-космической промышленности: АО «РКЦ «Прогресс», ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», АО «НПО Лавочкина», ОАО «Корпорация Комета», ПАО «НПО «Алмаз». Всего на конференции было заслушано 65 докладов. Из них: 15 докладов специалистов ПАО КМЗ, 14 докладов ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана, 5 докладов специалистов АО «РКЦ «Прогресс» и 5 докладов специалистов АО ЛЗОС, причем из 65 докладов 21 доклад был посвящен приборам и технологиям дистанционного зон-

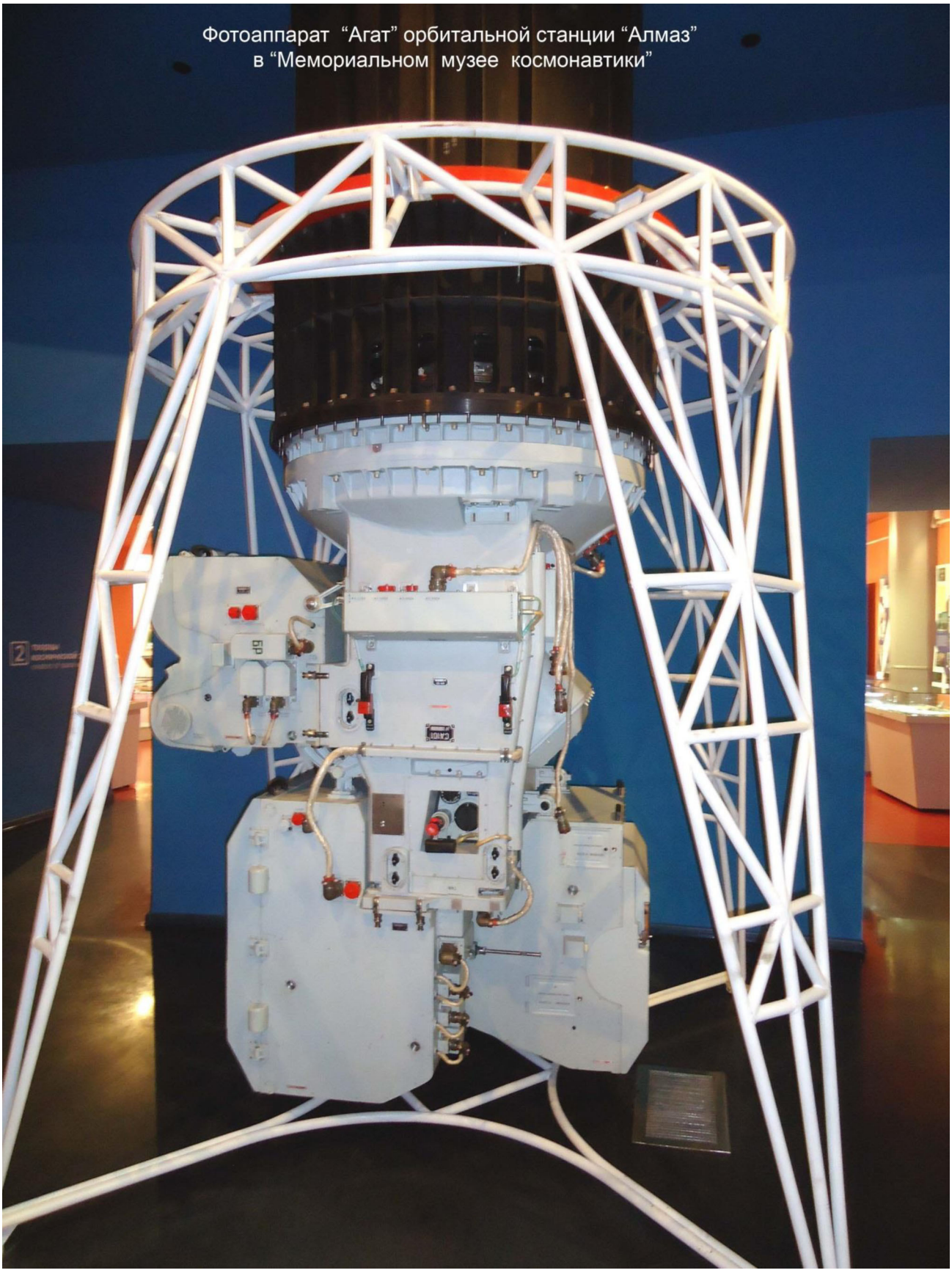


Рисунок 1.
Фотоаппарат «Агат»

дирования Земли и контроля космического пространства.

Эта статистика демонстрирует высокую активность МГТУ им. Н.Э. Баумана, направленную на укрепление и расширение научно-производственных связей с ПАО КМЗ. Она также показывает значительный научно-технический потенциал АО «РКЦ «Прогресс» и АО «ЛЗОС», традиционные крепкие связи этих предприятий с ПАО КМЗ, актуальность и востребованность космической тематики. Следует отметить, что АО «РКЦ «Прогресс» и АО «ЛЗОС» входят в состав общественной Академии «Контенант» и принимают деятельное участие в организации академических мероприятий.

От имени руководства ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» и руководства Холдинга «Швабе» с приветным словом выступил технический директор ПАО КМЗ Александр Александрович Журавлев, который отметил весомый вклад Академии «Контенант» в развитие научно-технического потенциала Красногорского завода и Холдинга, пожелал участникам Юбилейной Конференции активных творческих успехов, деловых контактов и благополучия.

С приветственным словом к участникам конференции обратился ведущий специалист, ветеран ОАО «ВПК «НПО машиностроения» Олег Петрович Дубенсков. В далекие 70-е годы «холодной войны» США с СССР ЦКБ «Машиностроения» В.Н. Челомея создало уникальную орбитальную космическую станцию «Алмаз», для которой Красногорский завод разработал и поставил комплекс оптической аппаратуры. Главным инструментом разведывательного комплекса «Алмаз» была оптико-фотографическая аппаратура «Агат» (главный конструктор – Герасимов Е.Н.), предназначенная для детальной съемки поверхности Земли. Экипаж космонавтов проводил съемку, проявку и обработку кусков экспонированной фотопленки, наиболее важные и интересные фотографии оперативно сканировал и передавал по радиоканалу.

Олег Петрович поздравил коллектив ПАО КМЗ с 75-летним Юбилеем, сообщил участникам конференции об открытии в Мемориальном музее космонавтики (Москва) экспозиции ОАО «ВПК «НПО машиностроения», в которой представлен фотоаппарат «Агат» (см. рисунок 1), пожелал коллективу ПАО КМЗ и всем участникам конференции здоровья, благополучия, выразил надежду на возрождение сотрудничества между нашими предприятиями.

В ходе пленарного заседания было заслушано восемь 8 докладов, из них 3 доклада специалистов ПАО КМЗ.

Пленарное заседание открыл доклад заместителя директора НТЦ ПАО КМЗ Сергея Николаевича Бездидько «Развитие новых направлений вычислительной оптики, обеспечивающих существенное повышение эффективности проектирования оптических систем». В доступной форме автор рассказал о современной методике построения конструкции оптической

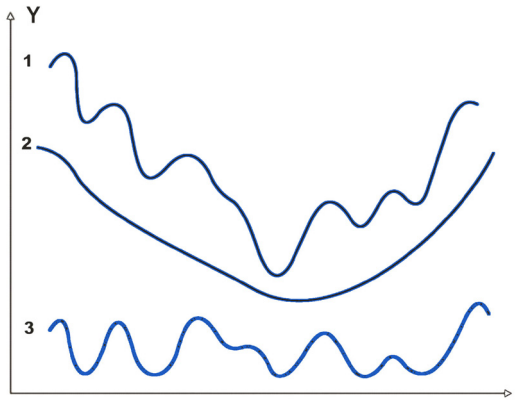


Рисунок 2.
Разделение вклада аберраций высших и низших порядков в оценочной функции

системы по заданному техническому заданию, раскрыл суть новых подходов к созданию эффективных программ оптимизации и анализа предельных свойств оптических систем.

В отличие от известного подхода, основанного на описании аберраций оптической системы с помощью полиномов Цернике, автором предложено определить полную систему полиномов, ортогональных в трехмерной области поле-зрачок $0 \le r \le 1$, $0 \le \rho \le 1$, $0 \le \varphi \le 2\pi$. При этом волновая аберрация может быть представлена в виде ортогонального разложения:

$$V=\sum_{l}\sum_{k}\sum_{m}A_{lkm}Z_{lkm}(r,\rho,\varphi)=\sum_{l}\sum_{k}\sum_{m}A_{lkm}\varepsilon_{m}R^{m}_{m+2l}(r)R^{m}_{m+2k}(\rho)\cos m\varphi$$

Использование таких ортогональных аберраций позволило выявить ранее ряд неизвестных аберрационных свойств оптических систем и обеспечить существенное повышение эффективности оптических расчетов, в том числе создать эффективные программы оптимизации.

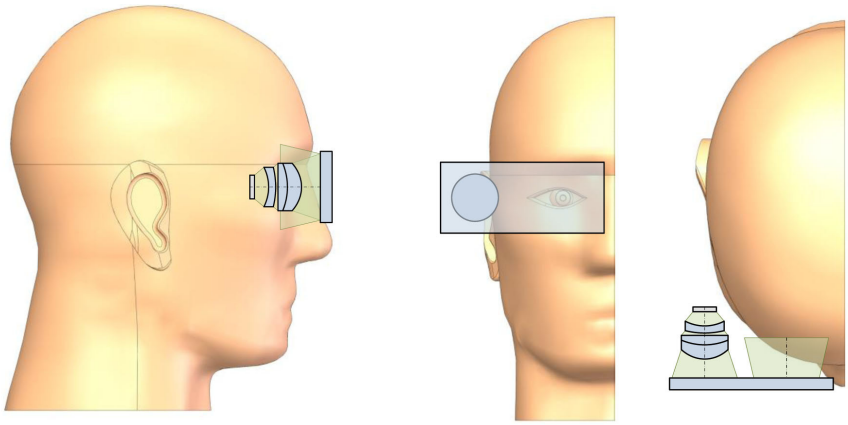
Рисунок 2 демонстрирует преимущество предложенного подхода. Использование вклада аберраций высших порядков (2) в качестве аберрационной части оценочной функции (1) в программах оптимизации позволяет значительно уменьшить число локальных экстремумов оценочной функции (за счет исключения из оценочной функции быстро изменяющихся аберраций низших порядков (3), ответственных за многоэкстремальность оценочной функции), существенно уменьшить локальную ограниченность программ оптимизации и создать программы псевдоглобальной оптимизации.

Изучение предельно достижимого качества изображения различных оптических систем заданного типа позволило показать, что предельно достижимые (минимальные) значения аберрационного функционала высших порядков имеют квадратичную зависимость от величины объема области поле зрачок, в то время как среднеквадратичное отклонение волнового фронта линейно зависит от объема области поле-зрачок. Эти исследования показали, что с помощью проведения специальной обработки данных, содержащихся в БД готовых оптических систем, возможно извлечь закодированные в ней сведения о предельно достижимых аберрационных характеристиках оптических систем различной сложности, взаимосвязи структурных и аберрационных характеристик, критериях оптимальности построения схем и т. п. и создать Базу Знаний, обеспечивающую дальнейшую формализацию эвристических этапов проектирования оптических систем.

Обстоятельный пленарный доклад заведующего кафедрой РЛ-2 МВТУ им. Н.Э. Баумана Николая Васильевича Барышникова был посвящен современным задачам взаимодействия Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана с предприятиями оптико-электронной отрасли.

Современное оптико-электронное направление в МГТУ им. Н.Э. Баумана обеспечивает кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы» (РЛ-2), которая развивает лучшие традиции кафедры «Оптико-механические приборы». Основатель кафедры в 1938 году - выдающийся оптик, крупнейший специалист в области оптического производства Турыгин Иван Афанасьевич (1904-1966 гг.). Формирование научной школы МГТУ им. Н.Э. Баумана по оптико-электронному и лазерному приборостроению неразрывно связано с именами крупных ученых-оптиков, профессоров Фрейберга Сергея Ивановича (1887 – 1957 гг.) и Лазарева Леонида Павловича (1914 – 1999 гг.).

Сегодня кафедра РЛ-2 совместно с факультетом «Оптико-электронного приборостроения» НИИ радиоэлектроники и лазерной техники, учебно-научной лабораторией «Оптико-голографические системы», научно-образовательным центром «Фотоника и ИК техника» подготавливает специалистов по специальности «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения», бакалавров и магистров по специальностям «Оптотех-



Характеристики:

- Угловое поле – до 70°.
- Диаметр выходного зрачка – более 16...18 мм.
- Компактный самостоятельный модуль – не зависит от типоразмера шлема и защитного козырька.
- Возможно изготовление в виде очков.

Рисунок 3.
Предложение кафедры РЛ-2 по созданию нашлемных систем индикации на базе волноводной пластины с голограммными элементами

ника» и «Лазерная техника и лазерные технологии», обучает аспирантов по специальности «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии».

В 2016-2017 гг. кафедра РЛ2 разработала и реализовала 7 программ повышения квалификации и профессиональной переподготовки специалистов промышленности, которые с успехом были реализованы на отечественных предприятиях ОАО ВОМЗ, ПАО РОМЗ, АО НПК СПП и др.

Кафедра РЛ-2 поддерживает и развивает актуальные научные направления:

– лазерные системы дистанционного мониторинга,

– лазерные оптические системы, вариообъективы, системы на основе градиентной оптики,

– расчет, изготовление и контроль оптических систем на основе ДОЭ и ГОЭ,

– системы технического зрения, видеоаналитические системы,

– цифровая обработка оптических сигналов,

– проблемы управления оптико-электронными приборами.

В докладе Н.В. Барышникова были представлены новые разработки и предложения кафедры РЛ-2 к предприятиям оптико-электронной отрасли по совместному продвижению следующих перспективных проектов:

– сканирующий дальномер – 3D и 2D камера,

– лазерная система обнаружения препятствий,

– нашлемные системы индикации на базе волноводной пластины с голограммными элементами (см. рисунок 3),

– перспективные оптико-электронные обзорно-поисковые системы,

– импортозамещение интерферометра Физо для контроля качества оптического тракта.

Пленарный доклад «Проблемные вопросы внедрения промышленного производства инновационных широкоспектральных оптико-электронных изделий» представил главный оптик ПАО КМЗ Богдан Николаевич Сеник.

Создание современных конкурентоспособных оптических систем ИК диапазона требует:

– применения широкой номенклатуры оптических материалов: монокристаллического германия, кремния, бескислородных марок стёкол ИКС, CaF_2, ZnSe, ZnS и др.

– использования в оптических системах нетрадиционных оптических элементов (асферических, киноформных, асферико-киноформных);

– повышения точностных геометрических параметров и определения фактических показателей преломления и дисперсии в диапазоне от 3 до 5 мкм, с точностью до четвёртого знака после запятой,

– использования технологий насыпной сборки объективов.

Промышленное производство тепловизионных объективов по указанным технологическим направлениям сдерживает решение следующих вопросов:

1. Отсутствие измерений фактических показателей преломления и дисперсии основных оптических материалов, используемых в оптических трактах с точностью до четвёртого знака после запятой после изготовления заготовок изготовителем и предприятием потребителем (отсутствие метрологического оборудования и методик измерения вышеуказанных параметров).

2. Отсутствие стандартов на конструкцию киноформных элементов, их точностных параметров, методик измерения этих параметров и метрологическая база.

3. Оптимизация технологических процессов изготовления киноформных элементов, активного контроля параметров на этапе изготовления.

4. Отработка технологий нанесения просветляющих покрытий с максимальной равномерностью толщины по всей площади оптического элемента, максимальная минимизация толщины конструкции оптических покрытий.

5. Разработка методик автоколлимационной вточки асферико-киноформных элементов.

Аналитический обзор «Новых тенденций развития космических систем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения» был представлен на пленарном заседании Заместителем генерального директора АО «РКЦ «Прогресс», директором, главным конструктором филиала АО «РКЦ «Прогресс» -НПП «ОПТЭКС» Александром Ивановичем Баклановым.

На основе обширного анализа отечественных и зарубежных публикаций автором сделаны следующие выводы о развитии современных средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ):

– наблюдается неуклонный рост космических систем ДЗЗ, ежегодно на орбиту выводится два-три десятка спутников ДЗЗ и метеонаблюдений,

– доминирующими становятся системы высокого и сверхвысокого пространственного разрешения,

– неуклонно повышается информационная производительность систем ДЗЗ,

– создаются группировки коммерческих спутников, оснащенных оптико-электронной аппаратурой высокого разрешения, позволяющие существенно повысить периодичность наблюдения,

– стремительно нарастает тенденция создания коммерческих систем ДЗЗ с аппаратурой видеонаблюдения.

На рисунке 4 представлены два основных относительно новых тренда эволюции коммерческих систем ДЗЗ.

В пленарном докладе начальника СКБ-1, главного конструктора космических и авиационных систем ДЗЗ ПАО КМЗ Сергея Алексеевича Архипова «Современная гиперспектральная аппаратура дистанционного зондирования Земли» с различных точек зрения рассмотрены перспективы гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования Земли.

Бурное развитие электроники, вычислительной техники в конце 20 века, изобретение ПЗС-приемников изображения привело к слому парадигмы изображающего прибора (фотоаппарата), как аналога человеческого глаза. Современная цифровая съемочная система позволяет

Рисунок 4.
Первый тренд – группировки спутников обеспечивающих повышенную прериодичность наблюдения.
Второй тренд – группировки спутников, обеспечивающих видеосъемку

увидеть мир реальных излучений (тепловизор, видеоспектрометр) и понять, что в этом мире происходит (цифровая обработка изображений, геоинфоормационные системы, гиперспектральные технологии). Тенденции развития методов автоматической обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) позволяют практически исключить человека из процесса получения новых знаний о Земле, создают в конечном итоге «искусственный глаз» для искусственного интеллекта. Такова философская точка зрения на общие тенденции развития изображающих приборов, среди которых гиперспектральная аппаратура выполняет роль своеобразного «переводчика». Гиперспектральные данные дают возможность с минимальной погрешностью сопоставлять многозональные снимки, полученные в различное время, различными оптико-электронными комплексами ДЗЗ.

С потребительской точки зрения целевые задачи ДЗЗ по крупному можно разделить на две группы: А – задачи космической разведки, Б – задачи исследования Земли из космоса.

Исторически задачи группы А всегда решались в первую очередь, особенно на начальной стадии становления технологий наблюдения Земли из космоса (видовая разведка). Однако сегодня, когда пространственное разрешение 5-10 м относительно легко реализуется в широкозахватной оптико-электронной аппаратуре ДЗЗ, группа задач Б существенно возросла.

Практически для всех наук о Земле приоритеты качества данных дистанционного зондирования (ДДЗ) определяются возможностью глобального покрытия, наличия долговременных и сопоставимых рядов в архивах ДДЗ, повышенной точностью радиометрической калибровки Ключевую роль в решении задач группы Б играет гиперспектральная аппаратура, которая, в отличие от многозональной оптико-электронной аппаратуры, регистрирует на каждом пикселе спектральную плотность энергетической яркости, а не эффективную энергетическую яркость излучения, что позволяет потребителям строить долговременные ряды ДДЗ, пополнять банки ДДЗ с учетом их фенологии (см. рисунок 5).

С точки зрения разработчика оптико-электронной аппаратуры для создания конкурентоспособной отечественной гиперспектральной аппаратуры (ГСА) ДЗЗ требуется неотлож-

Рисунок 5.
Приоритеты качества данных дистанционного зондирования Земли для двух групп А и Б целевых задач ДЗЗ

ное решение следующих технологических проблем:

– создание крупноформатных высокоскоростных матричных фотоприёмных устройств для области спектра (0,4-2,5) мкм,

– проработка новых схемотехнических решений различных типов ГСА на базе зеркальной оптики, классических и интерференционных спектрометров,

– создание стендового оборудования для аттестации радиометрических и фотограмметрических параметров ГСА,

– разработка регламентов технического контроля стабильности параметров ГСА в эксплуатации, проведения периодического контроля и калибровок информационного тракта,

– разработка технологий радиометрической калибровки ГСА в эксплуатации, включая использование тестовых полигонов, естественных источников излучения, технологии сличения ОЭА, установленной на различных КА.

С общесистемной, государственной точки зрения для развития потенциальных возможностей гиперспектральных технологий следует:

1. создать и пополнять отечественную базу данных эталонных сигнатур с учетом их фенологии для использования ее в качестве «языка», связывающего данные, получаемые всеми отечественными комплексами ДЗЗ,

2. разработать и внедрить специализированное программное обеспечение для обработки и анализа гиперспектральных данных ДЗЗ в тематических задачах,

3. разработать Комплексную Программу, в рамках которой:

– сформулировать задачи, для решения которых может быть использована гиперспектральная информация ДЗЗ;

– разработать технологии контроля и поддержания измерительных характеристик гиперспектральной аппаратуры на всём интервале её эксплуатации;

– разработать технологии тематической обработки и применения гиперспектральных данных;

– создать инфраструктуру, обеспечивающую распространение и использование гиперспектральных данных при решении тематических задач.

В пленарном докладе начальника отделения АО «НПО «ГИПО» Анатолия Васильевича Луки-

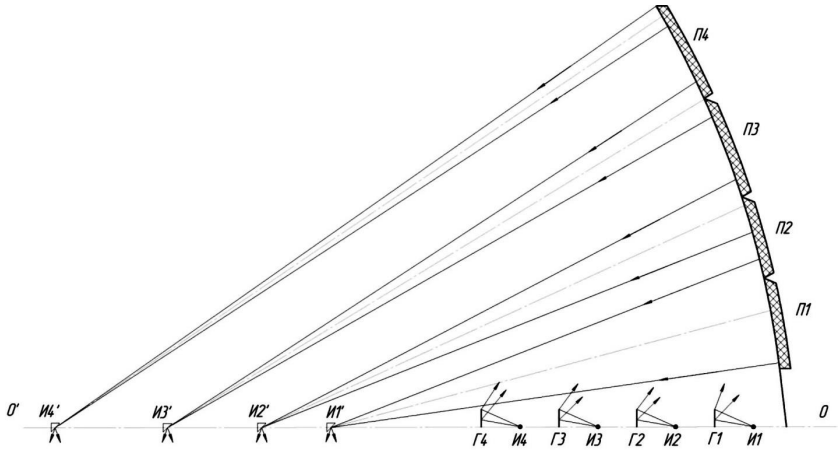


Рисунок 6.
Принцип лазерно-голографического контроля процесса позиционирования панелей составного главного зеркала.
Голограммы Г1 - Г4 в отраженном свете формируют геометрические волновые фронты кольцевой формы в выбранных для контроля зонах панелей каждого яруса П1 - П4; И1 - И4 – «точечные» источники света; И1΄- И4΄ – совокупность изображений «точечных» источников света

на «Система осевых синтезированных голограмм, как основа прецизионного контроля процессов сборки и юстировки составных частей телескопов» был представлен значительный научно-технический задел АО «НПО «ГИПО» по разработке, изготовлению и методам контроля качества синтезированных голограммных оптических элементов (СГОЭ).

Неуклонный рост габаритов астрономических зеркал и перспективных оптических систем наземного применения требует решения комплекса сложнейших технических и технологических задач. Эти сложности многократно возрастают для телескопов космического базирования. В рамках проекта «Миллиметрон» АО «НПО «ГИПО» предложена новая концепция прецизионного технологического и аттестационного контроля в целом процессов сборки и юстировки составных зеркал телескопов на основе использования системы осевых СГОЭ и когерентных свойств полупроводниковых лазерных источников излучения.

Рисунок 6 иллюстрирует суть предлагаемой концепции, в основе которой лежит преодоление противоречия: «необходимо иметь крупногабаритный СГОЭ для контроля полного зрачка телескопа, но, в то же время, крупногабаритный СГОЭ невозможно изготовить с требуемой точностью», разрешается путем разделения СГОЭ на составные части, скомпонованные в оригинальную схему контроля локальных зон, покрывающих полноразмерный зрачок телескопа.

Предложенная концепция открывает путь изготовления и эксплуатации перспективных крупногабаритных телескопов с составными зеркалами, а также возможность создания компактных лазерно-голографических контрольных средств, имеющих высокую устойчивость к внешним воздействиям, малое энергопотребление, в целом пригодных для функционирования в составе телескопов космического базирования.

Логическим продолженным доклада А.В. Лукина стал пленарный доклад специалистов АО ЛЗОС «Асферизация высокоасферичных внеосевых выпуклых элементов из астроситалла с асферичностью до 20 мм», который сделал начальник отдела АО ЛЗОС Александр Павлович Семенов.

Среди отечественных приборостроительных предприятий АО ЛЗОС сегодня – безусловный лидер в области внешнеэкономической деятельности.

Предприятие изготовило и поставило крупногабаритную оптику в рамках 120 междуна-

Рисунок 7.
Рост асферичности зеркал – основная тенденция современного телескопостроения

родных проектов для десятков телескопов мира по заказам Великобритании, США, Германии, Италии, Испании, Греции, Китая, Бельгии, Индии и других стран. С начала 90-х годов прошлого века суммарная площадь телескопов мира выросла в семь раз, что позволяет человечеству решать принципиально новые задачи исследования Вселенной, и в этом технологическом прорыве немалая заслуга АО ЛЗОС.

Неуклонная тенденция развития современного телескопостроения – увеличение асферичности зеркал (см. рисунок 7) – бросает очередной «технологический вызов», делает практически невозможным использование традиционных технологий, требует разработки и внедрения новых методов изготовления и доводки формы поверхности крупногабаритной оптики. С этой нетривиальной задачей успешно справились специалисты АО ЛЗОС, создав надежный отечественный технологический задел по перспективной крупногабаритной оптике. В рамках Проекта «Миллиметрон» АО ЛЗОС изготавило матрицы из Астроситалла в виде сегментов размером около 1400-1600 мм. Матрицы служат для прессования элементов составного главного зеркала из углепластика Характерная особенность - высокая асферичность сегментов (от 1.3 до 20 мм) с отклонением от требуемой параболической формы менее 10 мкм.

Допускаемые отклонения для всего главного зеркала обсерватории «Миллиметрон» диаметром 10 м составляют менее 100 микрон при асферичности 140 мм. Асферическая поверхность матриц формировалась фрезерованием кольцевым алмазным инструментом под управлением ЧПУ. Фрезерование проводилось в два этапа – грубый съем, когда инструмент снимал до 2 мм за проход, и тонкая обработка, когда съем не превышал 0.5 мм. Такой подход позволил также снизить глубину нарушенного слоя. Как показали дальнейшие измерения, была получена асферческая поверхность, отличающаяся от номинальной не более, чем на 100 микрон. Общее время фрезерования асферической поверхности детали составило от 2-х недель до 2

Рисунок 8.
Доводка формы сегмента для проекта «Миллиметрон»

месяцев. На финишной стадии компьютерно-управляемого процесса шлифования и полирования для контроля сегмента используется координатно-измерительная машина КИМ-1400 и измерительный комплекс ATOS III. Шлифование и полирование осуществляется с использованием компьютерного управления.

Для обработки применяется гибкий инструмент с экспериментально определенным профилем съема, который сохраняется неизменным при контакте с асферической поверхностью (см. рисунок 8).

Не менее интересные и актуальные доклады были представлены участниками конференции на секционных заседаниях.

В секции 1 «Вопросы разработки оптико-электронных приборов» был заслушан 31 доклад, в том числе: ПАО КМЗ – 9, МГТУ – 8 докладов; по космической тематике 15 докладов, из них 4 доклада специалистов АО «РКЦ «Прогресс».

Следует отметить 4 секционных доклада, посвященных проблемам контроля космического пространства, выполненные на высоком научно-техническом уровне, доклады специалистов кафедры РЛ-2 МГТУ им. Н.Баумана по проблематике создания вариообъективов, приборов высокоточного контроля оси вращения, нашлемных систем индикации.

С особым интересом были заслушаны доклады представителей лидера российской микроэлектроники – Группы компаний «Ангстрем» «Новые архитектурно-схемные и приборно-технологические возможности на основе кремниевых субмикронной и МОЭМС технологии для создания мобильных интеллектуальных устройств машинного зрения больших форматов в

широком спектральном диапазоне длин волн» и «Проект фотонного аналого-цифрового преобразователя», раскрывающих элементный базис для будущих отечественных проектов в области оптико-электронного приборостроения.

В секции 2 «Технологии производства оптико-электронных приборов и комплексов» было заслушано 26 докладов, в том числе: ПАО КМЗ – 3, МГТУ – 5, АО ЛЗОС – 4 доклада.

Огромный интерес вызвал у слушателей доклад специалистов АО ЛЗОС «Выполнение комплекса работ по восстановлению и улучшению оптических характеристик главного зеркала телескопа Большого Телескопа Азимутального», демонстрирующий высочайший научно-технический, профессиональный и технологический потенциал предприятия.

Доклады по технологиям получения высококачественных оптических поверхностей оптических элементов из поликристаллического селенида цинка и карбида кремния, доклад по прецизионной очистке оптических деталей отразили направленность отечественных предприятий на развитие и освоение новых, конкурентоспособных на мировом рынке, нетрадиционных материалов и технологических процессов.

Особо следует отметить совместный доклад новосибирских специалистов ИАиЭ СО РАН и ОАО ПО НПЗ «Прецизионная лазерная технологическая рабочая станция для производства шкал, сеток, фотошаблонов». Презентуемый в докладе технологический комплекс прецизионной обработки оптических элементов позволяет получать характеристики оптических функциональных деталей, соответствующие лучшим зарубежным образцам.

Все материалы по подготовке конференции размещались на сайте Академии «Контенант» в интернете, участники конференции получили сборник тезисов докладов. В конференции приняли участие 24 оператора научной роты войск ВКО во главе с лейтенантом И.С.Остроумовым, молодые специалисты предприятия, студенты Красногорского государственного колледжа и факультета «Оптико-электронного приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Юбилейная научно-практическая конференция, посвященная 75-летию ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» состоялась. Конференция прошла на высоком научно-техническом уровне, отразила значительный научный рост предприятий, организаций, университетов за последние годы, укрепила веру и стремление специалистов оптико-электронной отрасли к каждодневной творческой работе по совершенствованию и развитию научно-технического потенциала России.

УДК 681.384.31

российский индекс научного цитирования Science Index

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

ЯКУШЕНКОВ Ю.Г.

Московский Государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК)

E-mail: yakush@miigaik.ru

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

Ключевые слова: оптико-электронные приборы и комплексы, ьногодиапазонные (многоспектральные) системы, системный подход.

THE TENDENCIES OF ELECTRO-OPTICAL DEVICES AND SYSTEMS DEVELOPMENT WITHIN THE FRAME-WORK OF SYSTEM APPROACHING FOR THEIR DESIGNING

YAKUSHENKOV YURI GR.

Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK)

E-mail: yakush@miigaik.ru

A short list of modern tasks for electro-optical devices and systems (EODS) designers is given. Some particular features of modern stage of EODS designing based on system approaching are marked. The main tendencies of development for 3-rd generation EODS worked in two or more spectral bands and combined matrix photodetectors are considered. The problems of multiband (multispectral) and adaptive EODS improving are considered shortly. Removals of any methods and processing algorithms of exit signals EODS (images) are provided.

Ключевые слова: electro-optical devices and systems, multiband (multispectral) system, system approaching.

ВВЕДЕНИЕ

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

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

• анализ и описание принципов построения и работы ОЭПК (системы) в целом; выбор модели системы;

• установление сходства и различия изучаемой системы и других систем;

• перенос по определенным правилам свойств выбранной модели на свойства изучаемой системы.

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

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

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

• поиск движущихся и неподвижных объектов (целей) на больших площадях (в больших угловых полях) и определение их координат;

• целеуказание и передача данных о координатах целей другим системам и операторам, например, в систему наведения высокоточного оружия;

• круглосуточная разведка, обнаружение и целеуказание в условиях интенсивной маскировки и активного противодействия;

• обнаружение минных полей;

• автоматическое сопровождение движущихся и стационарных целей;

• автоматическая обработка сигналов для выдачи привязанной к карте информации на экран оператора и в систему автоматического обнаружения объектов;

• обнаружение факелов ракет и других излучателей;

• обнаружение и классификация химических, в частности взрывчатых, и отравляющих веществ.

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

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

• разработка методики выбора оптимальных спектральных рабочих диапазонов для систем конкретного назначения;

• развитие методов компьютерного моделирования сложных ОЭПК и условий их функционирования;

• определение корреляционных связей между сигналами, получаемыми в различных спектральных диапазонах;

• классификация различных объектов (материалов, покрытий, образований), обнаруживаемых или наблюдаемых с помощью ОЭПК;

• использование различий в поляризационных характеристиках отдельных объектов и фонов, на которых они наблюдаются.

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

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

При реализации некоторых ОЭПК, построенных по принципу корреляционной обработки принимаемых сигналов, возможно нарушение алгоритма обработки из-за экранирования обнаруживаемого, наблюдаемого или исследуемого объекта или сбоя изображения. В этих случаях полезно иметь систему опорных точек (реперов), распределенных по полю обзора (сцене). Трудности ее практической реализации состоят в невозможности сопровождения движущихся объектов, а также в зависимости векторов направлений на заданный объект от этих реперов.

Для устранения этих проблем возможно разделение ОЭПК на два канала. Первый может содержать реперы, размещенные по всей сцене, а второй состоит из реперов, расположенных в небольшом окне с центром в заданной точке расположения объекта. Здесь оказывается эффективным ряд методов пространственно-временно́й фильтрации [8-12].

Все шире используются методы пространственно-временно́й фильтрации сигналов от объектов на фоне помех. В литературе [3,10,11 и др.] содержатся описания этих методов и оценки их эффективности. Так, в [12] приводятся данные о результатах моделирования процесса обнаружения и селекции одного или нескольких (≤ 10) движущихся объектов на фоне помех с помощью многоэлементных ФПУ. Они показали, что вероятность ложных тревог при использовании описанных выше алгоритмов и методов может быть сделана очень малой (порядка $10^{-4}\ldots10^{-6}$ при числе кадров n=10 и $10^{-12}\ldots10^{-15}$ при n=20).

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

С учетом разнообразия условий работы ОЭПК весьма актуальным является создание адаптивных ОЭС-3, позволяющих сохранять высокие значения показателей качества и эффективности в самых различных условиях их эксплуатации, а также при совершенствовании их элементной базы [3,10,11]. Перспективной может оказаться ОЭС-3 для определения координат объектов, в которой при случайных изменениях чёткости изображения кадра (сцены) и кадровой частоты и

ограничении скорости считывания сигнала ФПУ оптимальные их значения определяются путем выравнивания оценок дисперсий межэлементных и межкадровых разностей. Для увеличения времени наблюдения с близкими значениями оценок указанных дисперсий пороги переключения можно снизить путём увеличения инерционности тракта измерения дисперсий [13].

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

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

Алгоритмическая (электронная) стабилизация изображения позволяет улучшить масс-энергетические и стоимостные характеристики комплексов, в составе которых работают многие ОЭПК. Она позволяет преобразовать нестабилизированную последовательность кадров (видеосигналов), подверженных межкадровым пространственным смещениям, к выходной последовательности кадров, в которой нежелательные смещения изображения скомпенсированы в инерциальном пространстве в «подвижном» окне. В ОЭПК с электронной стабилизацией приходится применять ФПУ повышенного разрешения и широкопольные объективы с хорошим разрешением.

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

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

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

Основными трудностями на пути реализации этого алгоритма работы оптико-электронного комплекса являются недостаток априорной информации для построения

достаточно адекватных имитационных компьютерных моделей [14,15], наличие возможных искажений и деформаций текущего изображения в пространственной, спектральной и временной областях; наличие помех в изображении сцены и затенения объекта.

В этой связи остаются актуальными такие направления исследований как:

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

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

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

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

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Список литературы:

1. Технология системного моделирования / под ред. С.В.Емельянова и др. – М.: Машиностроение; Берлин: Техник, 1988. – 520 с.
2. *Щепетов А.Г.* Основы проектирования приборов и систем: учебник для вузов. – М.: Академия, 2011. – 368 с.
3. *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.* Введение в проектирование оптико-электронных приборов: системный подход. Учебник / Под ред. Ю.Г.Якушенкова – М.: Университетская книга, 2016.- 488 с.
4. *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.* Двух- и многодиапазонные оптико- электронные системы с матричными приемниками излучения. – М.: Университетская книга; Логос, 2007. – 192 с.
5. Инфракрасные системы 3-го поколения / Тарасов В.В., Торшина И.П., Якушенков Ю.Г.; под общ.ред. Ю.Г.Якушенкова. - М.: Логос, 2011.- 240 с.
6. *Sood A.K., Richwine K., Puri Y.R. et al.* Multispectral EO/IR sensor model for evaluating UV, visible, SWIR, MWIR and LWIR system performance // SPIE Proc., 2009. V. 7300, P. 73000H – 1…12.
7. Патент РФ на изобретение №2604898. Способ формирования спектрозональных видеосигналов: /Ковин С.Д., Сагдуллаев Ю.С., заявл.26.06.2015; опубл. 20.12.2016. Бюл.№35
8. *McAulay A., Kadar I.* Neural networks for adaptive shape tracking // SPIE Proc, 1989. V. 1099. P. 74 – 82.
9. *Якушенков Ю.Г.* Теория и расчет оптико-электронных приборов: учеб- ник - М.: Логос, 2011. – 568 с.

10. *Driggers R.G., Cox P., Edwards T.* Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems. – Boston, London: Artech House, 1998. – 427 p.

11. *Гонсалес Р., Вуд Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.

12. *Patterson T.J., Chabries D.M., Christiansen R.W.* Image processing for target detection using data from a staring mosaic infrared sensor geosynchronous orbit // Optical Engineering, 1986. V.25,№1. P.166-172.

13. *Умбиталиев А.А., Пятков В.В., Цыцупин А.К., Левко Г.В., Морозов А.В*. Оптико-электронная система измерений координат объектов с адаптацией параметров разложения. – Измерительная техника, 2017, №4, С.С.42-45.

14. *Демин А.В., Которский Н.С.* Имитационное моделирование информационно-измерительных и управляющих систем. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. – 139 с.

15. Торшина И.П. Компьютерное моделирование оптико-электронных систем первичной обработки информации. – М.: Университетская книга; Логос, 2009. – 248 с.

16. Бехтин Ю.С., Емельянов С.Г., Титов Д.В. Теоретические основы цифровой обработки изображений встраиваемых оптико-электронных систем. - М.: Аргамак-медиа, 2016.-296 с.

17. Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Фрактальные методы сегментации текстурных изображений. //»Известия вузов. Приборостроение», 2013, т.56, №5, -С.63-71

Bibliography:

1. Technology of System Modeling/Ed. by S.V. Emelyanov et al.- Moscow, Mashinostroenie Publisher; Berlin, Technique, 1988.-520 p. (rus.)

2. *Schepetov A.G.* Designing Devices and Systems Basis: textbook.- Moscow, Academy, 2011.- 368 p. (rus.)

3. *Tarasov V.V., Yakushenkov Yu. G.* Introduction into Electro-Optical Devices Designing: System Approaching. Textbook/Ed. by Yu.G. Yakushenkov.- Moscow, University Book. Logos.- 2016.- 488 p. (rus.)

4. *Tarasov V.V., Yakushenkov Yu. G.* Two- and Multiband Electro-Optical Devices with Matrix Photodetectors. - Moscow, University Book. Logos.- 2007.- 192 p. (rus.)

5. Infrared Systems of 3-rd Generation/ Tarasov V.V., Torshina I.P., Yakushenkov Yu. G.; Ed. by Yu.G. Yakushenkov.- Moscow, University Book. Logos.- 2011.- 240 p. (rus.)

6. *Sood A.K., Richwine K., Puri Y.R. et al.* Multispectral EO/IR sensor model for evaluating UV, visible, SWIR, MWIR and LWIR system performance // SPIE Proc., 2009. V. 7300, P. P. 73000H – 1…12.

7. RF Patent № 2604898. Method of Spectrozone Signal Forming:/ Kovin S.D., Sagdullaev Yu.S. , declared 26.06.2015; publed 20.12.2016. Bull.№35 (rus.)

8. *McAulay A., Kadar I.* Neural networks for adaptive shape tracking // SPIE Proc, 1989. V. 1099. P. 74 – 82.

9. *Yakushenkov Yu. G*. Electro-Optical Theory and Design: : textbook.- Moscow, Logos, 2011.- 568 p. (rus.)

10. *Driggers R.G., Cox P., Edwards T.* Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems. – Boston, London: Artech House, 1998. – 427 p..

11. *Gondzales R.C., Woods R.E.* Digital Image Processing – .Moscow, Technosphere, 2005.- 1072 p. (rus.)

12. *Patterson T.J., Chabries D.M., Christiansen R.W.* Image processing for target detection using data from a staring mosaic infrared sensor geosynchronous orbit // Optical Engineering, 1986, V.25,№1, P.P.166-172.

13. Umbetaliev A.A. et al. Electro-Optical System for Object Coordinate Measurements with Adaptation of Decomposition's Parameters. – Measurement Technology, 2017, № 4, P.P.42-45 (rus.)

14. *Dyemin A.V., Kotorsky N.C.* Imitation Modeling of Information-Measuring and Control Systems. – S.- Pb.: IFMO, 2007.-139 p.

15. *Torshina I.P.* Computer Modeling of Electro-Optical Preliminary Data Processing Systems. - Moscow, University Book. Logos.- 2009.- 248 p. (rus.)

16. *Behtin Yu.S., Emelyanov S.G., Titov D.V.* Theoretical Base of Digital Image Processing in Inserted Electro-Optical Systems.- Moscow, Argamak-Media, 2016.- 296 p. (rus.)

17. *Fisenko V.T., Fisenko T.Yu.* Fractal Methods of Texture Images. - - Institution of Higher Learning News. Priborostroenie.-2013, vol.56, №5, P. P.63-71 (rus.)

УДК 621.397.61

российский индекс научного цитирования Science Index

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УЗКОПОЛЬНЫХ КАНАЛОВ НАБЛЮДЕНИЯ В АВИАЦИОННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ

МАЛЫГИН М.С., ШЛЫЧКОВ В.И.

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

E-mail: mihail.malygin@gmail.com

В статье рассматриваются способы автоматической фокусировки изображений с использованием: термокомпенсации, фокусировки на «бесконечность» и коэффициента резкости. При термокомпенсации используются возможности линейного расширения материалов. Фокусировка на «бесконечность» выполняется с помощью предварительной калибровки по температуре. Для оценки резкости в принимаемом изображении введен коэффициент, учитывающий соотношение низкочастотных и высокочастотных составляющих в пространственном спектре изображений. Эффективность работы алгоритма автоматической фокусировки повышается при контрастировании и дифференцировании принимаемых изображений.

Ключевые слова: резкость изображения, автофокусировка, коэффициент резкости.

THE RESEARCH OF EFFECTIVNESS APPLICATION NARROW FIELD OF VISION CHANNELS FOR SURVEILLANCE IN AIRCRAFT OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS

MALYGIN M.S., SHLYCHKOV V.I.

JSC «Production association «Ural Optical & Mechanical Plant» named after Mr. E.S. Yalamov», Russia, Ekaterinburg

E-mail: mihail.malygin@gmail.com

Abstract. *The paper presents automatic focusing ways of images with using: thermal compensation, focusing to «infinity» and sharpness coefficient. Opportunities of linear extension materials are used by the thermal compensation. The focusing to «infinity» is carried out by using a temperature preliminary calibration. Sharpness assessment in the receivable image the coefficient is introduced which takes into account correlation between low-frequency and high-frequency components in spatial spectrum of images. Automatic focusing algorithm of the effectiveness increases thanks to contrasting and differentiation of receivable images.*

Keywords: sharpness image, autofocusing, sharpness coefficient.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение дальностей распознавания и обнаружения в авиационных оптико-электронных системах требует уменьшения размеров полей зрения телевизионных и тепловизионных каналов до долей градуса и применения ПЗС-матриц с большим количеством пикселов. Например, поля зрения телевизионных (ТВ), тепловизионных (ТПВ) каналов в системе «Damocles» Франция (1×0,75)°, «Litening» Израиль (0,7×0,7)°. Однако, применение длиннофокусных объективов с узкими полями зрения, ограничивают: дефокусировка изображения, вызванная изменением окружающей температуры, широкополосная и синусоидальная вибрации. Устранение дефокусировки изображений требует ввода в состав приемного объектива подфокусирующих элементов. Следует отметить, что в отличие от широко используемой в фото и видеоаппаратуре опции автофокусировки, когда объект съемки находится на расстоянии от единиц до десятков метров, в данном случае ставится задача обеспечить максимальное разрешение при работе с объектами, находящимися на расстоянии от сотен метров до нескольких километров.

Существующие способы автоматической фокусировки изображения можно разделить на активные и пассивные. Активные способы требуют измерения дальности до объекта наблюдения и корректировки положения оптических элементов или приемника изображения в зависимости от измеренного расстояния. Для измерения расстояния используют лазерные дальномеры. Пассивные способы фокусировки могут выполняться, как в плоскости принятого оптического изображения $f = (x, y)$, так и его пространственно-частотного спектра $F = (w_x, w_y)$. Переход от изображения к спектру выполняется с использованием быстрого преобразования Фурье [1]. Поиск сфокусированного (резкого) изображения может выполняться в плоскости изображения (x, y) по известным формулам численного дифференцирования или его спектра (w_x, w_y). Как показали экспериментальные исследования, алгоритмы в плоскости изображения (x, y) плохо работают в условиях воздействия вибраций. К настоящему времени основным способом автоматической фокусировки является частотный анализ, считываемого с приемника изображения видеосигнала $f(t)$. Суть способа состоит в измерении интенсивности амплитуды высокочастотных компонент спектра видеосигнала $F(w_t)$. Этот способ широко используется в видеоаппаратуре, когда объект наблюдения находится на расстоянии от единиц до десятков метров и широко известен, как опция «автофокусировки». Для случая работы ТВ и ТПВ каналов с объектами наблюдения, находящимися на расстоянии от сотни метров до нескольких километров, эффективен переход в плоскость (w_x, w_y) пространственных частот инвариантной к смещениям $f = (x, y)$ изображения.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ФОКУСИРОВКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА РЕЗКОСТИ

Одним из факторов, определяющим качество воспроизводимого ТВ и ТПВ каналами авиационных оптико-электронных системах изображений является составляющая, содержащая мелкие детали. Под мелкими подразумеваются детали в изображении размеры, которых сопоставимы с размерами чувствительного элемента в приемнике оптического изображения. Увеличение размаха видеосигнала от мелких деталей в изображении, уменьшение длительности фронтов, повышение коэффициента модуляции от периодических структур позволяют повысить резкость изображения и получить максимальную информацию. Задача анализа резкости возникает при автофокусировке изображений.

Для количественной оценки расфокусировки принятого оптического изображения введен [2] коэффициент резкости K_R изображения который рассчитывается в соответствие с соотношениями:

$$K_R = \frac{\sum\limits_{HF} F_{p,q}}{\sum\limits_{LF} F_{p,q}}$$

$$\sum_{HF} F_{p,q} = \sum_{p=0}^{N-1}\sum_{q=0}^{N-1}\left|F_{p,q}\right| - \sum_{p=\frac{N}{2}-1-\frac{M}{2}}^{\frac{N}{2}-1+\frac{M}{2}}\sum_{q=\frac{N}{2}-\frac{M}{2}}^{\frac{N}{2}-1+\frac{M}{2}}\left|F_{p,q}\right|$$

$$\sum_{LF} F_{p,q} = \sum_{p=\frac{N}{2}-\frac{M}{2}}^{\frac{N}{2}-1+\frac{M}{2}}\sum_{q=\frac{N}{2}-\frac{M}{2}}^{\frac{N}{2}-1+\frac{M}{2}}\left|F_{p,q}\right|$$

где: $\sum_{HF} F_{p,q}$ - сумма коэффициентов Фурье для области высоких частот (HF),

$\sum_{LF} F_{p,q}$ - сумма коэффициентов Фурье для области низких частот (LF),

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

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

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

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

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

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

В качестве примера на рис. 1 представлена функциональная схема устройства автофокусировки [3].

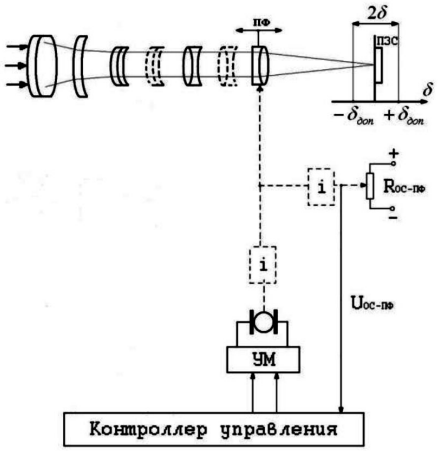


Рисунок 1.
Устройство автоматической фокусировки: ПФ - подвижный оптический элемент для подфокусировки кинематически связанный с исполнительным двигателем, $R_{ОС-ПФ}$ - сопротивление обратной связи, УМ- усилитель, КУ - контроллер управления, 2δ - глубина резкости объектива

По команде «автофокусировка» КУ изменяет положение оптического элемента в приводе ПФ с шагом Δδ и для каждого шага рассчитывает коэффициент резкости изображения Кр. После сканирования привод устанавливается в положение с наибольшим Кр.

Экспериментальные исследования показали неустойчивую автофокусировку ТВ и ТПВ каналов при работе по объектам, расположенным на однородных фонах. Для повышения в пространственно-частотного спектрах высокочастотных составляющих однородных фонов оцифрованное входное оптическое изображение контрастируется и дифференцируется, например, оператором Собела [3]. В таблице 1 приведены результаты вычисления K_R для некоторых классов изображений.

Таблица 1.

Динамика изменения коэффициента резкости в зависимости от используемого алгоритма автофокусировки

№	Алгоритм	Тип изображения		
		Линия горизонта	Облачная поверхность	Строения
1	K_p	4915	2647	4038
2	Контрастирование, K_p	5566	4323	7781
3	Контрастирование и дифференцирование оператором Собела, K_p	9280	12124	17038

Из приведенных в таблице 1 данных следует, что применение контрастирования и дифференцирования $f = (x, y)$ изображения увеличивают значения коэффициентов резкости для всех классов изображений. Работа алгоритмов для класса изображений «Линия горизонта» приведены в таблице 2. Экспериментальные исследования показали усредненное время автофокусировки (2-3) с.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ФОКУСИРОВКА НА «БЕСКОНЕЧНОСТЬ»

Для сокращения времени установки ПФ в плоскость наилучшей установки приемника использована калибровка по температуре. Величина смещения плоскости приемника от окружающей температуры и размеров поля зрения приведена на рис. 2.

Способ фокусировки на «бесконечность» выполняется в лабораторных условиях по телевизионной испытательной таблице (ТИТ) на коллиматоре. Фокусировка включает ручную установку (калибровку) подфокусирующего элемента ПФ (см. рис. 3) в положение X[n], где n – номер шага, при котором обеспечивается максимальное разрешение при окружающей температуры T[n]. Калибровка выполняется в термокамере.

По результатам калибровки формируется и запоминается массив значений T[n] - калибровочных точек в запоминающем устройстве и соответствующих U[n] напряжений от потенциометрического датчика $R_{ОС-ПФ}$ при которых обеспечивается максимальное разрешение. Функциональная схема автоматической фокусировки на «бесконечность» [4] представлена на рис. 3

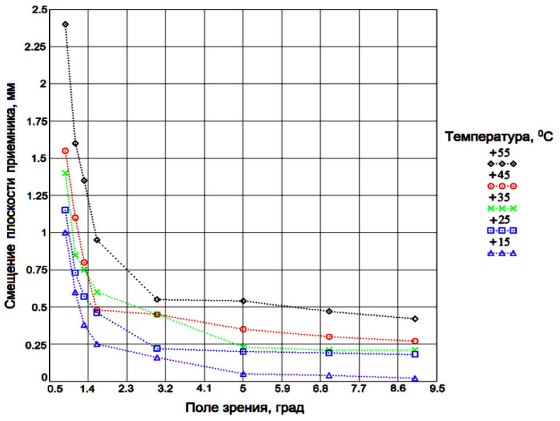


Рисунок 2.
Зависимость величины дефокусировки изображения от размеров поля зрения и окружающей температуры

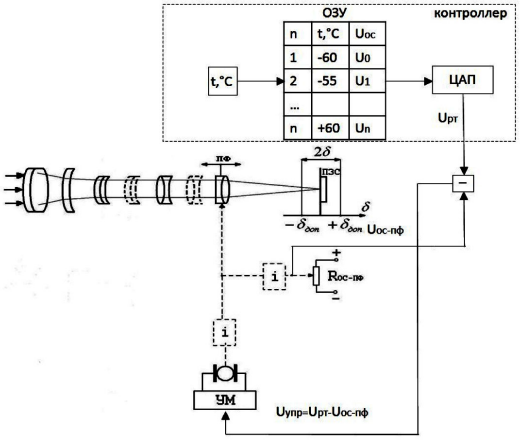
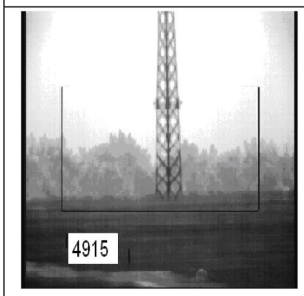
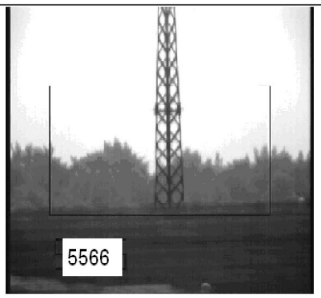
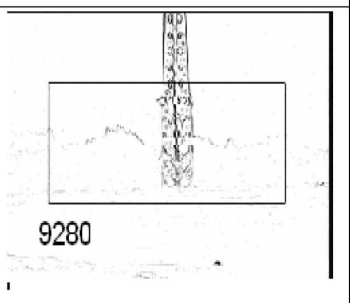


Рисунок 3.
Устройство автоматической фокусировки (АФ) на «бесконечность»:
ПФ - подвижный оптический элемент для подфокусировки кинематически связанный с исполнительным двигателем, $R_{ОС-ПФ}$ - сопротивление обратной связи, УМ- усилитель, КУ-контроллер управления, 2δ- глубина резкости объектива, t°C – датчик температуры, UPT –напряжение сформированное контроллером для текущей температуры t°C, $U_{ОС-ПФ}$ – напряжение обратной связи от потенциометрического датчика $R_{ОС-ПФ}$

Таблица 2.
Измеренные коэффициенты резкости и результаты работы алгоритмов для класса изображений «линия горизонта»

Исходное изображение	Контрастированное	Дифференцированное
		

При включении устройства АФ управляющее напряжение $U_{УПР} = U_{РТ} – U_{ОС-ПФ}$ через усилитель мощности УМ устанавливает привод ПФ в объективе ТВ блока в положение соответствующее наибольшему разрешению практически мгновенно.

Кроме температурной составляющей на разрешение в принимаемом оптическом изображении влияют механические воздействия, расстояние до объекта, состояние атмосферы. В связи с этим [4] для оптимизации положения подфокусирующего элемента (ПФ) рассчитываются коэффициенты K_{Ri} где i - номер шага по приближению или удалению от ПЗС матрицы 1<i<3 относительно точки калибровки по температуре, с коэффициентом резкости K_{Rt}, и выбирается положение с $K_{Ri} = K_{Rmax}$

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ФОКУСИРОВКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОКОМПЕНСАТОРОВ

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

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

где: Δ- расчетное перемещение объектива, мм;

ΔТ - диапазон изменения температуры, °С;

L - длина пластины полиамида, мм;

α - коэффициент линейного расширения материала, 1/°С.

При разработке конструкции были рассмотрены несколько материалов. Их свойства сведены в таблицу 3 [5].

Проведенные расчеты показали наиболее целесообразным выбор полиамида. Были изготовлены пластины из полиамида и разработана конструкция с их использованием в ТВ блоке. Конструкция устройства с автофокусировкой схематически показана на рис. 4 и содержит пластину из полиамида на концах которой размещены объектив с ПФ и ПЗС приемник.

По результатам испытаний коэффициент модуляции на отметке 500 телевизионных

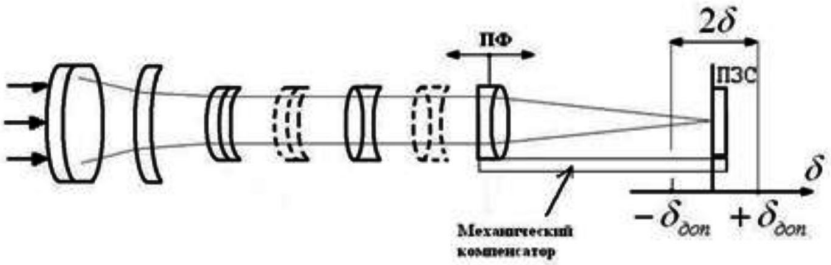


Рисунок 4.

Устройство автоматической фокусировки с механическим компенсатором

ПФ - подвижный оптический элемент для подфокусировки кинематически связанный с ПЗС приемником, 2δ- глубина резкости объектива

Таблица 3.

Свойства материалов

№	Физическая величина	Материал				
		Титан (ВТ1-0)	Алюминий (АМг6)	Резина (ИРП1226)	Полиамид (ПА6)	
1	Коэффициент линейного расширения α, 1/°С	$8{,}5 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$65 \cdot 10^{-6}$	Ниже 0°С	Выше 0°С
					$80 \cdot 10^{-6}$	$70 \cdot 10^{-6}$
2	Модуль упругости Е, МПа	110000	71000	8	1200	

линий (ТВЛ) составил 30-40%, а разрешение 550-600 ТВЛ для ТВ камеры, формирующей видеосигнал по ГОСТ 7845-92 с числом элементов разложения 752х582 при работе в диапазоне от минус 40°С до +55°С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Быстродействие автоматической фокусировки на «бесконечность» с дополнительным вычислением коэффициента резкости в поле зрения 0,5 градуса для цифровой ТВ камеры с числом элементов разложения 1024х768 составило 1-1.5 с, а разрешение 750-800 ТВЛ при работе в диапазоне окружающих температур от минус 40 о С до + 55о С

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям, грант №12152ГУ/2017 от 28.07.2017 г.

Список литературы

1. *Даджион Д., Мерсеро Р.* Цифровая обработка многомерных сигналов. //пер.с англ / Под ред. Ярославского Л.П.- Мир , 1988 г., 488 с.

2. *Шлычков В.И.* Анализ резкости изображения // Техника средств связи сер. Техника телевидения – 2011, Вып.1. - с.91-97.

3. Устройство автоматической фокусировки. Патент РФ № 73577/ Шлычков В.И. , Макаров К.В. Опубл. БИ № 14 2008г.

4. Устройство автоматической коррекции резкости изображений: Патент РФ № 167844 /Кошелев А.В., Шлычков В.И., Маркушин Г.Н., Артюхин Д.Е. Опубл. БИ №1 .2017 г.

5. *Долматов С.В., Шлычков В.И.* Исследование эффективности способов коррекции дефокусировки изображений. Итоги диссертационных исследований. Том 4, с.133-138, М. 2013 г.

References

1. *Dadzhion D., Mersero R.* Digital multidimensional signals processing (Tsifrovaya obrabotka mnogomernykh signalov), Moscow, Mir Publ. (translation by Yaroslavskiy), 1988, 488 p

2. *Shlychkov V.I.* Analysis of sharpness of images// Technika communication facilities. Series. Technica television - 2011 №1 p.91-97

3. Device of automatic focus/ Patent RU 73577 // ShlychkovV.I. , Makarov K.V. Bulletin of inventions №14 2008

4. Device of automatic correction sharpness of images. Patent RU 167844 // Koshelev A.V., Shlychkov V.I., Markushin G.N., Artuhin D.E. Bulletin of inventions №1 2017

5. *Dolmatov S.V., Shlychkov V.I.* Analysis efficiency ways correction of images. Sums of dissertations V. 4 M. 2013, p `133-138

УДК УДК 528.8

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРА С АКУСТООПТИЧЕСКИМ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫМ ФИЛЬТРОМ В НЕКОЛЛИМИРОВАННЫХ ПУЧКАХ ДЛЯ БПЛА

КАЛИННИКОВ Ю.К., КАЧАРАВА А.Я., ПОЛЯКОВ М.П.

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Московская обл.

E-mail: polyakov@kbsp.ru

Статья посвящена разработке видеоспектрометра для БПЛА и оценке качества получаемых им гиперспектральных изображений. Диспергирующим элементом в схеме рассматриваемого видеоспектрометра является акустооптический перестраиваемый фильтр, работающий по схеме с неколлинеарным взаимодействием. Особенностью разработанного прибора является расположение акустооптической ячейки в телецентрическом ходе лучей, а промежуточного изображения объекта исследования – в центре акустического столба. В статье приведены сравнительные параметры приборов, построенных по данной схеме и приборов, построенных по классической схеме с АОФ расположенным в параллельном ходе апертурных лучей. Приведены особенности данных схем и возможности их применения.

Ключевые слова: акустооптический перестраиваемый фильтр, телецентрический ход лучей, дифракционные аберрации АОПФ, пространственное разрешение, видеоспектрометр.

RESEARCH OF IMAGE QUALITY OF ACOUSTO-OPTICAL IMAGING SPECTROMETER WITH ACOUSTO-OPTICAL TUNABLE FILTER IN NONCOLLIMATED BEAMS FOR UAV

YU. K. KALINNIKOV, A. IA. KACHARAVA, M. P. POLIAKOV

VNIIFTRI, Moscow region, Russia

E-mail: polyakov@kbsp.ru

Abstract. *The article is devoted to the development of the imaging spectrometer for UAV and assessing the quality of the obtained hyperspectral images. The dispersing element in the scheme of the considered imaging spectrometer is the acousto-optic tunable filter operates according to the scheme with non-collinear interaction.*

The feature of the developed device is the location of the acousto-optic cell in the telecentric ray path, and the intermediate image of the object of research – in the center of the acoustic col-umn. The article provides comparative characteristics of the devices constructed according to the scheme and devices, built on the classical scheme with the AOTF is located in parallel to the course of aperture rays. Given the features of these schemes and their possible applications.

Keywords: acousto-optic tunable filter, telecentric passage of rays, the diffraction aberration AOTF, the spatial resolution, the imaging spectrometer.

ВВЕДЕНИЕ

Перестраиваемые акустооптические фильтры широко используются во многих областях науки и техники и решают различные задачи спектрального анализа. Приборы выполненные с применением акустооптических кристаллов в качестве диспергирующих элементов обладают рядом важных качеств:

1. Высокая светосила.
2. Большое угловое поле.
3. Произвольная адресация и адаптационная способность спектральных каналов.
4. Высокое пространственное разрешение.
5. Малые габариты и масса.
6. Наличие только двух порядков дифракции – нулевого и минус первого (при дифракции Брэгга), что уменьшает помеховое излучение.
7. Возможность селекции по поляризации света.

В статье рассмотрены некоторые схемы гиперспектральных акустооптических ОЭП и предложена перспективная схема, обеспечивающая повышенное качество изображения без потери спектрального разрешения.

ОБЗОР СХЕМ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ОЭП

В основном спектральные приборы проектируются таким образом, чтобы диспергирующий элемент (призма, дифракционная решётка) располагался в параллельном ходе апертурных лучей (коллимированные пучки). При такой компоновке схемы диспергирующий элемент не вносит аберраций, изменяющих структуру световых пучков и снижающих качество изображения и разрешающую способность [1]. Для видеоспектрометра одинаково важно обеспечение необходимого и достаточного уровня качества изображения и разрешающей способности как в спектральной (по длинам волн излучения) области: спектральное разрешение , так и в пространственной области: пространственное разрешение . Размещение призм и дифракционных решёток в сходящихся пучках апертурных лучей (неколлимированные пучки) приводит к значительному росту аберраций [1], что существенно снижает разрешающую способность. Впервые теоретически и экспериментально исследовано качество спектральной фильтрации оптических изображений АОФ с неколлинеарным взаимодействием на кристалле парателлурита в работах [2,3], в этих работах установлено, что при работе АОФ как в коллимированных, так и в неколлимированных пучках возникают специфические дифракционные аберрации, из-за которых снижается пространственное разрешение в направлении дифракции. В этих статьях указаны причины и вычислены величины дифракционных аберраций в АОФ. Они оказались зависящими от величины спектрального разрешения и кристаллографического среза АОФ. Этот эффект особенно велик для АОФ низкого и среднего спектрального разрешения, которые часто используются в видеоспектрометрах. В результате, без использования специальных мер компенсации, количество разрешаемых точек в отфильтрованном изображении часто ограничено несколькими десятками, реже сотнями. В работах были предложены способы борьбы с этими явлениями. Один из них - использование второго АОФ для компенсации дифракционной аберрации при работе в параллельном пучке апертурных лучей. Он активно используется в разнообразных конструкциях и позволяет получить практически дифракционное качество изображения на выходе двойного монохроматора. Но этот способ имеет свои недостатки: усложнение конструкции, уменьшение угловой апертуры системы, низкий коэффициент пропускания, при работе в коллимированном пучке имеется резкая зависимость коэффициента передачи от угла падения света, что приводит к неравномерности качества и освещенности изображения. Второй способ уменьшения дифракционных аберраций – формирование промежуточного изображения внутри АОФ, а точнее в центре акустического столба. Этот способ по разным причинам до настоящего времени в реальных разработках не применялся. Однако, именно применение этого способа в сочетании с использованием теле-

центрического хода лучей в АОФ позволяет при относительной простоте системы использовать всю возможную апертуру (линейную и угловую) АОФ, сделать изображения однородным по качеству в пределах углового поля зрения, обеспечить высокое, как пиксель-ограниченное, так и дифракционно-ограниченное качества изображений объектов в АОФ низкого и среднего спектрального разрешений.

Для уменьшения влияния дифракционных аберраций АОФ в 2009г. была разработана оптическая схема малогабаритного видеоспектрометра ближнего ИК диапазона спектра, в котором АОФ находится в телецентрическом ходе лучей, а изображение объекта – на незначительном удалении от акустооптического фильтра (рис. 1).

В 2014-2015 гг. для высокоразрешающего эшелле-спектрометра ближнего ИК диапазона спектра, предназначенного для исследования атмосферы Марса с его орбиты (работающий в настоящее время проект ЭкзоМарс-2016), был разработан АОФ-преселектор для предварительного выбора исследуемого спектрального диапазона, что позволяет устранить наложение порядков дифракции эшелле-решётки. Акустооптический фильтр расположен вплотную к изображению объекта, сформированному на входной щели эшелле-спектрометра.

В результате, по высоте щели сформировано качественное отфильтрованное изображение, которое после дифракции на решётке эшелле используется для картографирования высотного профиля концентрации примесей в атмосфере или, при работе в надире, высокоточного спектрального картографирования поверхности Марса в конфигурации «pushbroom». На рис. 2 представлена оптическая схема преселектора.

В 2010-2013гг. в ООО «КБСП» авторами была разработана оптическая схема (рис. 3) и изготовлены образцы полевого видеоспектрометра (ПВС) ближнего ИК диапазона спектра, в котором АОФ находится в параллельном ходе апертурных лучей.

При исследовании изображений, полученных ПВС, было подтверждено снижение пространственного разрешения в направлении дифракции, связанное с дифракционными аберрациями АОФ.

В 2013-2016 гг. в ООО «КБСП» авторами была разработана оптическая схема (рис. 4) и изготовлен образец видеоспектрометра ВДСП, в котором АОФ находится в телецентрическом ходе лучей, а промежуточное изображение строится в центре акустического столба. Приёмник излучения – кремниевая ПЗС-матрица элементов с размером пиксела . По теореме Котельникова граничная пространственная частота (частота Найквиста)

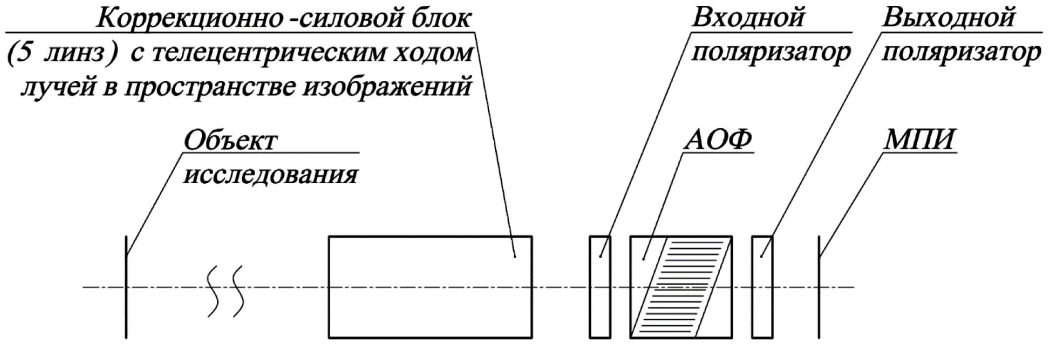


Рисунок 1.
Оптическая схема малогабаритного полевого видеоспектрометра
Данная схема имеет следующие параметры:
Фокусное расстояние: f ′ = 21 мм.
Относительное отверстие: 1:2,8.
Угловое поле зрение: 2ω = 30°.
Спектральный рабочий диапазон: λ = 0,9÷1,7 мкм.
Полная длина системы (до плоскости изображения): 58 мм.

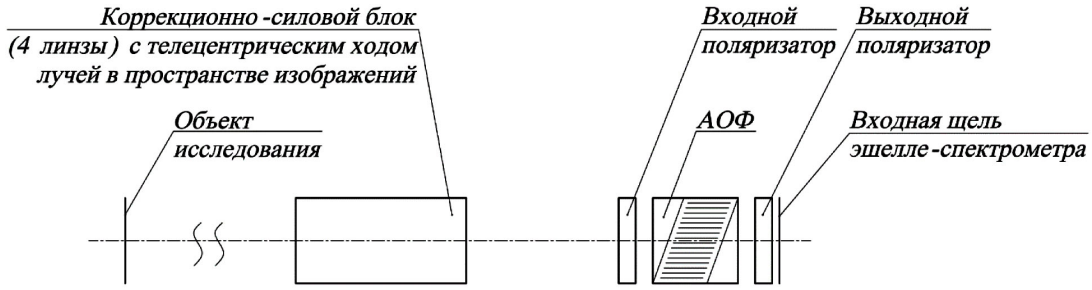


Рисунок 2.
Оптическая схема преселектора видеоспектрометра
Данная схема имеет следующие параметры:
Фокусное расстояние: f ′=120 мм.
Относительное отверстие: 1:6.
Угловое поле зрение: 2ω = 2°×0,023°.
Спектральный рабочий диапазон: λ = 0,75÷1,7 мкм.

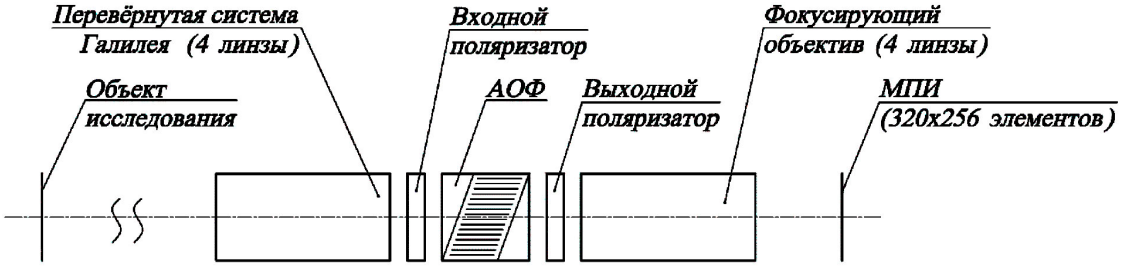


Рисунок 3.
Оптическая схема полевого видеоспектрометра
Данная схема имеет следующие параметры:
Фокусное расстояние f ′ = 21 мм.
Относительное отверстие: 1:3,5.
Угловое поле зрение: 2ω = 30°.
Спектральный рабочий диапазон: λ = 0,9÷1,6 мкм.
Расчётные монохроматические МПФ на частоте Найквиста v_m=17 мм$^{-1}$ не менее 0,65.

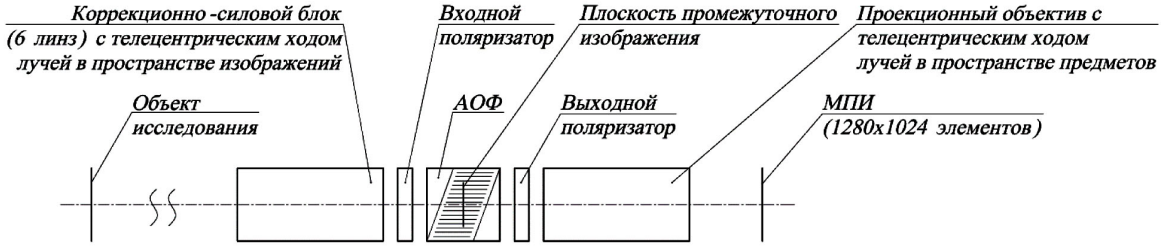


Рисунок 4.
Оптическая схема видеоспектрометра ВДСП
Данная схема имеет следующие параметры:
Диапазон длин волн: 470÷780 нм.
Спектральное разрешение (с системой электронного управления полосой пропускания): от 0,3 нм до 2,2 нм на длине волны 470 нм и от 1,33 нм до 3 нм на длине волны 750 нм.
Эквивалентное фокусное расстояние: 15,6 мм.
Относительное отверстие: 1:2,8.
Угол обзора (угловое поле зрения): 18°×23° (30°).
Количество элементов в МПИ: 1280×1024 пикселей, размер пиксела: 4,65×4,65 мкм×мкм.
Мгновенный угол обзора (мгновенное угловое поле зрения): 0,3 мрад.
Скорость формирования кадров: до 30 кадров/сек.
Ширина полосы съёмки при высотах 300÷500 м: 120÷200 м.
Габариты и масса макета: 200×45×50 мм, не более 400 грамм.
Энергопотребление (оценочное) системы: не более 4 Вт.

данной матрицы составляет. При проектировании были обеспечены монохроматические МПФ не менее 0,5 на граничной пространственной частоте при высокой степени коррекции хроматических и дифракционных аберраций АОФ.

Во всех рассмотренных выше схемах гиперспектрометров диспергирующими элементами являются акустооптические фильтры, выполненные из парателлурита.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ВДСП

Для оценки качества изображения видеоспектрометра ВДСП макетный образец работал в двух режимах – с имитатором АОФ (рис. 5) и с АОФ в рабочем режиме (рис. 4). Имитатор АОФ – плоскопараллельная пластина, выполненная из парателлурита, с толщиной равной длине АОФ, аттестованная по качеству изображения на оптической скамье. Так как имитатор АОФ работает в статическом режиме (как плоскопараллельная пластина, свет не взаимодействует со звуком), то сравнивая изображения полученные с имитатором и с акустооптическим фильтром в рабочем режиме, можно оценить влияние дифракционных аберраций, вносимых АОФ в рабочем режиме, на разрешающую способность. Стоит отметить, что акустооптический фильтр используемый в ВДСП по своим геометрическим параметрам является точной копией АОФ использованного в ПВС. Основные параметры АОФ приведены в таблице 1.

Для оценки разрешающей способности ВДСП использовались радиальная и штриховая миры (рис. 6). Миры устанавливались на расстоянии 2 м от первой поверхности коррекционно-силового блока. Так как АОФ в рабочем режиме выделяет узкую спектральную полосу, то при работе схемы ВДСП с имитатором были получены изображения как в широкой спектральной полосе, так и с использованием узкополосных интерференционных фильтров (рис. 7). Изображения полученные с использованием имитатора и с акустооптическим фильтром в рабочем режиме приведены на рис. 8.

Произведя анализ полученных изображений можно сделать следующие выводы:

Разрешающая способность ВДСП составляет 80 мм$^{-1}$ (при контрасте в изображении на пределе разрешения 0,26), что близко к частоте Найквиста выбранного матричного

Таблица 1.
Основные параметры АОФ используемых в ВДСП и ПВС

	Λ Длина волны рабочая, нм	Δλ Полоса пропускания, нм	F Частота возбуждения, МГц	± Δφ Угловая апертура, град	N Эффективность, %/Вт
ВДСП	750	1.33	153,4	4,6	150
	650	0.93	181	4,4	213
	550	0.6	222.5	4	330
	450	0.3	293,6	3,6	600
ПВС	1500	6,2	73	4,8	33
	1300	4,6	84,8	4,5	45
	1100	3,2	101	4	64
	900	2,0	125,5	3,7	100

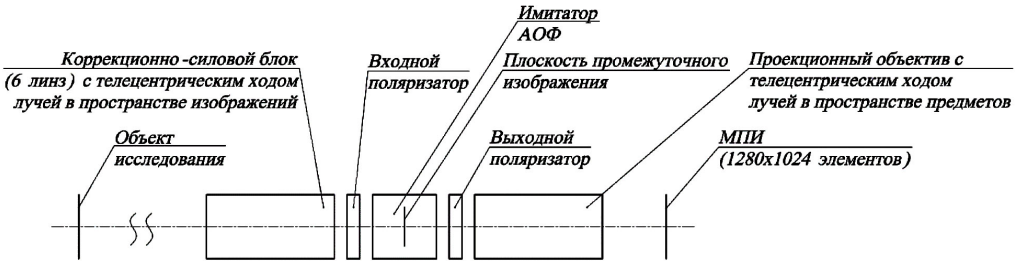


Рисунок 5.
Оптическая схема ВДСП с имитатором акустооптического фильтра

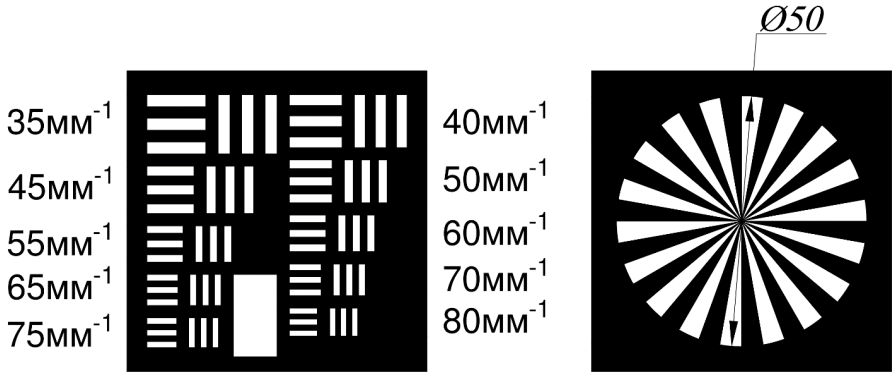


Рисунок 6.
Миры используемые для проверки разрешающей способности ВДСП (пространственная частота элементов штриховой миры указана для плоскости изображения, диаметр радиальной миры указан для плоскости объекта)

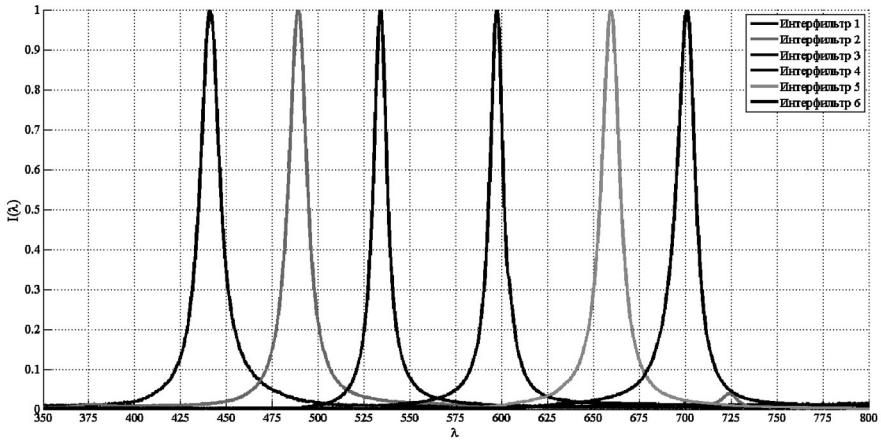


Рисунок 7.
Спектральные характеристики пропускания интерференционных фильтров

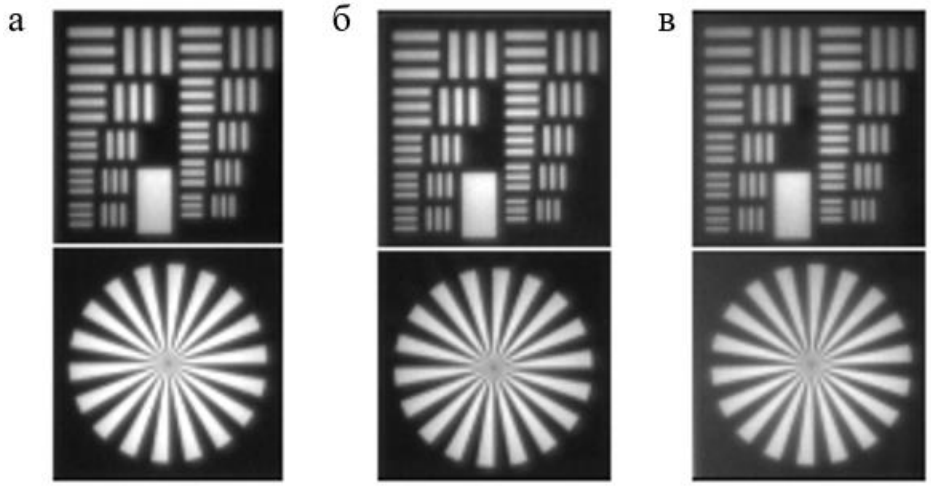


Рисунок 8.
Изображения мир полученные ВДСП:
а – с имитатором АОФ без интерференционного фильтра,
б - с имитатором АОФ с интерференционным фильтром,
в – с АОФ в рабочем режиме

приёмника излучения, которая составляет 108 мм$^{-1}$.

АОФ в рабочем режиме не снижает качество изображения по сравнению со статическим режимом, асимметрия качества изображения отсутствует, следовательно, при работе акустооптического фильтра выбранной геометрии в телецентрических пучках дифракционные аберрации снижаются в достаточной степени, для получения высокого качества изображения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы был спроектирован и изготовлен макет видеоспектрометра для БПЛА.

Проведено исследование изображений ВДСП с имитатором АОФ и с АОФ в рабочем режиме.

На основании проведенного исследования можно сделать вывод о том, что применение методов компенсации дифракционных аберраций АОФ при расположении АОФ в телецентрическом ходе лучей позволяет реализовать высокое качество изображения объекта исследования, в отличие от схем, в которых одиночный АОФ находится в параллельном ходе апертурных лучей. Схема с АОФ в телецентрическом ходе лучей может быть рекомендована для создания высокоразрешающих видеоспектрометров не только с пиксель-ограниченным, но и с дифракционно-ограниченным и факсимильным качеством изображения объектов.

Разработанное устройство может быть использовано, например, в области сельского хозяйства для проведения контроля за состоянием посевов: определения густоты, уровня развития посевов, уровня увлажнения, достаточности концентрации минеральных и органических удобрений, поражённости посадок растений болезнями и вредителями, для мониторинга экологического состояния лесов и рек, а также в других областях науки и техники.

Список литературы:

1. *Пейсахсон, И.В.* Оптика спектральных приборов: учеб. пособие / И. В. Пейсахсон 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: «Машиностроение», 1975. – 312 с.

2. *Епихин, В.М.* Компенсация спектрального дрейфа угла дифракции неколлинеарного акустооптического фильтра / В. М. Епихин, Ю. К. Калинников // Журнал технической физики. – 1989. Т. 59. В. 2. С. 160-163.

3. *Калинников, Ю.К.* Использование акустооптических фильтров для фильтрации изображения / Ю. К. Калинников, Л. Я. Стаценко // Журнал технической физики. – 1989. Т. 59. В. 9. С. 153-156.

УДК 504.064.36

российский индекс научного цитирования Science Index

ДИСТАНЦИОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

ФЕДОТОВ Ю.В., БУЛЛО О.А., БЕЛОВ М.Л., ГОРОДНИЧЕВ В.А.

НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

E-mail: gorod@bmstu.ru, ekomonit@bmstu.ru, belov@bmstu.ru

Статья посвящена разработке технического облика лазерного флуориметра для дистанционного оперативного контроля состояния растительности. Проведенные исследования показывают, что лазерный флуориметр при длине волны возбуждения флуоресценции 532 нм и регистрации флуоресцентного излучения в узких спектральных диапазонах шириной 10 нм с центральными длинами волн 685 и 740 нм позволяет эффективно проводить дистанционное обнаружение стрессовых состояний растений, вызванных разными причинами.

Ключевые слова: лазерный метод, флуоресценция, растения, обнаружение стрессовых состояний.

LASER FLUORESCENCE REMOTE SENSING FOR DETECTION OF PLANT STRESS

FEDOTOV YU.V., BULLO O.A., BELOV M.L., GORODNICHEV V.A.

Radioelectronics and Laser Technology Research Institute of Moscow State Technical University n.a. Bauman

E-mail: gorod@bmstu.ru, ekomonit@bmstu.ru, belov@bmstu.ru

Main technical features of laser fluorometer for vegetation monitoring is considered. It is shown that laser fluorometer allows efficiently to detect a vegetation for different stress situations at wavelength of fluorescence excitation 532 nm and measurement of fluorescence intensity in narrow spectral bands with spectral width 10 nm and central wavelengths 685 and 740 nm.

Ключевые слова: laser method, fluorescence, vegetation, detection of plant stress.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день актуальной является проблема экологического мониторинга природной среды (см., например, [1-3]).

Наиболее перспективными методами экологического мониторинга природной среды являются дистанционные лазерные методы. Дистанционные лазерные методы могут использоваться независимо от времени суток и обладают высокой пространственной разрешающей способностью (из-за небольшой расходимости лазерного пучка).

Перспективным направлением лазерного дистанционного зондирования в настоящее время является контроль состояния растительности (см., например, [4-6]).

Аномально высокая или аномально низкая температура, недостаток питательных веществ, засуха или избыток воды, засоление почвы или наличие в ней различных загрязнителей и т.п. приводят к невозможности нормального роста растений (стрессовым состояниям растений). Причем, такие стрессовые состояния сложно обнаружить на ранних стадиях по внешнему виду растений.

Эффективным дистанционным (неконтактным) методом обнаружения стрессовых состояний растительности является метод, основанный на регистрации формы спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений. Этот метод основан на том, что для растений, находящихся в стрессовых состояниях, вызванных различными причинами, процесс фотосинтеза нарушается и спектр флуоресценции растения (обусловленный флуоресценцией хлорофилла) искажается (по сравнению со спектром растения в нормальном состоянии).

На рис. 1-3 приведены примеры спектров растений в нормальном и стрессовом состояниях при различных длинах волн возбуждения.

На рис. 1 показаны спектры флуоресценции контрольного экземпляра сои (кривая 2) и экземпляра сои, высаженного в почве при недостатке калия (кривая 1) для длины волны возбуждения 337 нм.

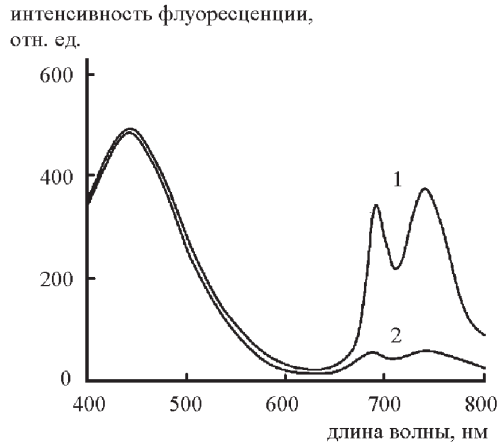


Рисунок 1.
Спектры флуоресценции сои

Рис. 2 иллюстрирует влияние стресса растения на спектр его флуоресценции при длине волны возбуждения 355 нм.

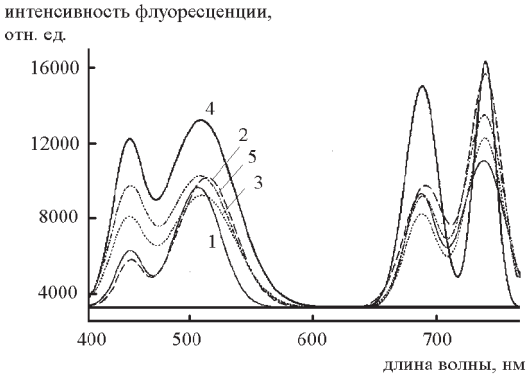


Рисунок 2.
Спектр флуоресценции пшеницы

На рис. 2 показан спектр флуоресценции контрольного (здорового) образца пшеницы (1) и образца пшеницы, обработанного кадмием (2 - 5). Спектры 2 – 5 отличаются концентрацией кадмия, вносимого при обработке. Для спектра 2 концентрация кадмия составляла 0,01 ммоль Cd, для 3 - 0,10 ммоль Cd, для 4 – 1,00 ммоль Cd, для 5 – 2,00 ммоль Cd.

Рис. 3 показывает влияние нефтяных загрязнений почвы на спектр флуоресценции растительности при длине волны возбуждения 532 нм. Здесь представлены спектры флуоресценции кедра, 1 – контрольный образец кедра; 2 – образец кедра, при внесении нефтепродуктов в почву.

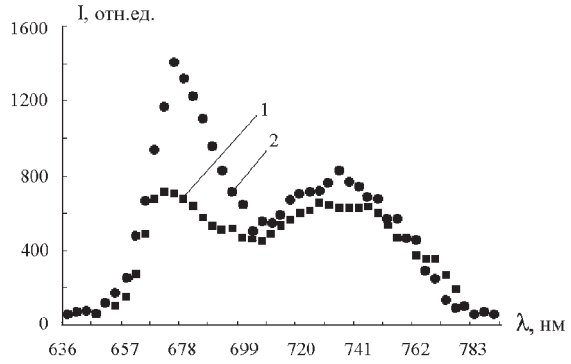


Рисунок 3.
Влияние нефтяных загрязнений почвы на спектр флуоресценции растительности

Флуоресценция хлорофилла является сегодня единственным показателем, который позволяет исследовать в живых растениях протекание фотохимических реакций, связанных с работой фотосистемы 2 – системы, наиболее чувствительной к факторам внешней среды (см., например, [7,8]).

Методики мониторинга на основе лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) целых растений и их фрагментов, а также технические средства для таких исследований активно разрабатываются, начиная с восьмидесятых годов прошлого века (см., например, [9-14]). В настоящее время в разных странах ведется накопление данных по изменению спектров флуоресценции различных растений и разрабатываются алгоритмы их интерпретации согласно физиологическим особенностям растений.

Статья посвящена разработке технического облика флуориметра для дистанционного оперативного контроля состояния растительности.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ЛАЗЕРНОГО ФЛУОРИМЕТРА

Функциональная схема лазерного флуориметра для контроля состояния растительности содержит следующие основные блоки:

- лазер для возбуждения флуоресценции;
- передающая оптическая системы для формирования необходимого размера лазерного пятна на земной поверхности;
- приемный блок, включающий оптическую приемную систему, спектральные фильтры и дихроические зеркала (обеспечивающие выбор необходимых спектральных каналов регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения), фотоприемники;
- блок обработки (включая аналого-цифровые преобразователи), выдачи и хранения данных измерений (при дистанционных самолетных измерениях в блоке осуществляется составление карты состояния растений по трассе полета);
- поворотное устройства приемо-передатчика лазерного флуориметра, обеспечивающий необходимое пространственное сканирование подстилающей земной поверхности поперек направления полета авиационного носителя;
- блок управления лазерного флуориметра.

К настоящему времени накоплены экспериментальные данные по спектрам флуоресценции различных видов здоровой растительности и растительности в различных стрессовых ситуациях. Эти экспериментальные данные были получены различными авторами, на разной аппаратуре, при разных длинах волн возбуждения (266, 275, 280, 300-400, 308, 325, 327, 337, 340, 355, 360, 380, 395, 396,397, 400, 400-450, 404, 405, 408, 422, 425, 428, 436, 440, 450, 452, 460, 470, 440-500, 480, 488, 500, 515, 525, 532, 535, 550, 590, 600, 627, 630, 633, 635 нм).

Наибольшее число работ посвящено исследованию лазерно-индуцированной флуоресценции растительности при использовании для возбуждения флуоресценции лазеров на длинах волн 337 (азотный лазер), 355 и 532 нм (третья и вторая гармоники лазера на итрий-алюминиевом гранате (ИАГ), активированном ионами неодима).

Наиболее перспективным для создания бортовой аппаратуры лазерным источником представляется твердотельный импульсный лазер на длине волны 532 нм. Он имеет преимущество (при разработке аппаратуры для дистанционного зондирования) как перед азотным лазером на 337 нм (в бортовой аппаратуре лучше использовать твердотельные лазеры), так и перед лазером на 355 нм (третья гармоника лазера на ИАГ имеет меньшую

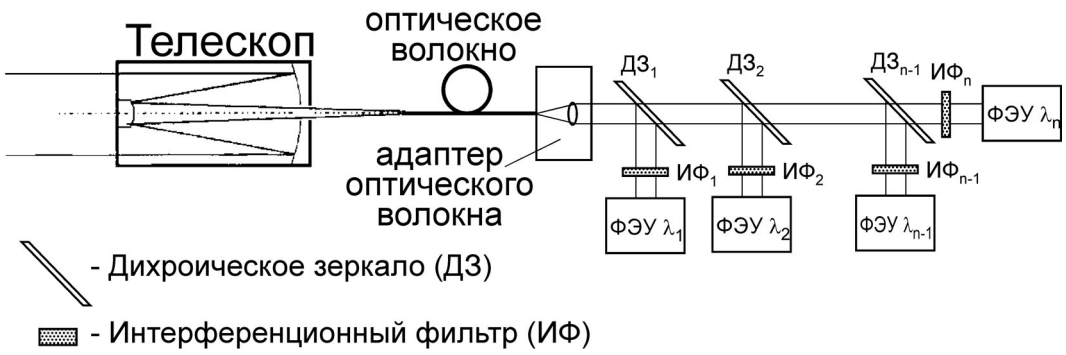


Рисунок 4.

Оптическая схема приемного блока лазерного флуориметра

энергию в импульсе, чем вторая). Кроме того, эффективность возбуждения флуоресценции на длине волны 532 нм существенно больше, чем на длинах волн 355 и 337 нм (см., например, [15]).

Частота повторения лазера определяется спецификой решаемой задачи (и скоростью полета авиационного носителя) и может варьироваться от единиц килогерц до сотен или десятков герц.

В случае дистанционных самолетных измерений схема зондирования - моностатической с совмещенными источником и приемником излучения.

На рис. 4 приведена оптическая схема приемного блока лазерного флуориметра для дистанционного контроля состояния растительности.

В фокальной плоскости телескопа приемной оптической системы располагается оптическое волокно, транспортирующее излучение к системе спектрального разделения. Выходящее из оптического волокна излучение коллимируется адаптером оптического волокна. Параллельный пучок разделяется на спектральные каналы системой из дихроических зеркал и интерференционных фильтров.

В данной схеме не требуется использование высокоточных юстировочных механизмов, так как поля зрения всех детекторов одинаковы и тождественны полю зрения всей системы, задаваемому диаметром и положением входной апертуры оптического волокна относительно приемного телескопа. Размер фотокатодов ФЭУ достаточно большой, так что несложно обеспечить полное перекрытие параллельного пучка (сформированного адаптером оптического волокна) светочувствительной площадкой приемника. Отметим что, оптическая система, построенная по данной схеме, будет устойчива к вибрационным нагрузкам.

Применение оптического волокна с разным диаметром ядра позволяет менять угол поля зрения приемной оптической системы. Использование оптического волокна позволяет разнести приемную оптическую систему и систему спектрального разделения, что упрощает юстировку, настройку и работу с оптическими элементами лидара.

Таким образом, эта схема флюоресцентного лидара позволяет осуществлять спектральное разделение принимаемого излучения с большой эффективностью. Схема проста в реализации и надежна в эксплуатации. А также обладает большой гибкостью, позволяющей провести экспериментальные исследования по оптимизации параметров схемы.

На рис. 4 представлен приемный блок лазерного флуориметра, обеспечивающий регистрацию излучения n в спектральных каналах. В наиболее простом варианте аппаратуры для дистанционного мониторинга состояния растительности (например, с летательного аппарата) лазерный флуориметр может регистрировать лазерно-индуцированное флуоресцентное излучение растений только в двух спектральных диапазонах (ширина этих спектральных диапазонов определяется необходимым уровнем регистрируемого флуоресцентного сигнала).

На сегодняшний день в большинстве экс-

периментальных работ регистрация лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения растительности проводится в двух узких (с шириной 5…20 нм) спектральных диапазонах с центральными длинами волн 680…690 нм и 730…740 нм.

Анализ спектров флуоресценции растений в нормальном и различных стрессовых состояниях показывает, что наиболее перспективными для задачи обнаружения стрессовых состояний растений являются спектральные диапазоны с центральными длинами волн 685 и 740 нм. В качестве параметра, который используется для оценки состояния растительности, берется отношение интенсивностей лазерно-индуцированной флуоресценции в этих спектральных диапазонах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ЛАБОРАТОРНОМ ОБРАЗЦЕ ЛАЗЕРНОГО ФЛУОРИМЕТРА

На рис. 5 приведены результаты обработки измеренных на лабораторном образце лазерного флуориметра спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений в нормальном и стрессовом состояниях (размер серии измерений для каждого растения и каждого вида стресса в среднем ~ 10).

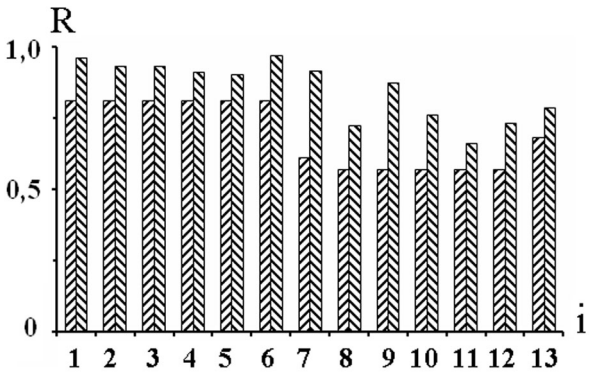


Рисунок 5.
Результаты обработки измеренных спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений

Здесь показаны средние значения величины R (отношения интенсивностей флуоресценции в узких спектральных диапазонах шириной 10 нм с центральными длинами волн 685 и 740 нм) для нормального состояния растений (первый столбец данных на рисунке для каждой серии измерений) и для стрессовых состояний, вызванных разными причинами (второй столбец данных на рисунке для каждой серии измерений) для разных i (i – номер серии измерений).

На рисунке разные номера i соответствуют разным растениям и разным стрессам. Номера 1-7 – данные измерений для кресс-салата при стрессовых состояниях, вызванных примятию листьев (1), обрезанию листьев (2), повреждению корневой системы растения (3), избыточным поливом растений в течение 11 дней (4), избыточным поливом растений в течение 17 дней (5), избыточным поливом растений в течение 24 дней (6), отсутствием полива в течение 11 дней. Измерения спектров флуоресценции кресс-салата при механических повреждениях (примятии, обрезании листьев и обрезании корней) проводились в интервале времени от 20 мин до 40 минут после механического повреждения.

Номера 8-13 – данные измерений для газонной травы (выращенной из газонной смеси Декора Aros) при стрессовых состояниях, вызванных добавление в почву разных загрязнителей - медного купороса $CuSO_4$ (5 г, разбавленные в 200 мл воды, на 3 образца; габаритные размеры горшка, в который высаживался о образец, 9x9x10см), железного купороса $FeSO_4$ (10 г, разбавленные в 200 мл воды, на 3 образца) и соли NaCl (5 г на каждый образец). Номера 8 и 9 на рисунке соответствуют измерениям через 2 и 4 недели соответственно после внесения в почву соли NaCl. Номера 10 и 11 - измерениям через 2 и 4 недели соответственно после внесения в почву железного купороса $FeSO_4$. Номер 12 – измерению через 4 недели после внесения в почву медного купороса $CuSO_4$. Номер 13 на рисунке - данные измерений для газонной травы при стрессовом состоянии, вызванном обрезанием корней. Измерения спектров флуоресценции травы в нормальном состоянии проводилось до подрезания корней, а в стрессовом состоянии - в интервале времени от 25 до 45 минут после подрезания корней.

Из рис. 5 видно, что средние значения величины R для нормального состояния всегда

меньше значений величины R для стрессовых состояний растений, вызванных разными причинами (механическими повреждениями, внесением в почву загрязнителей, избытка или недостатка количества воды).

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект 1965/14).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статья посвящена разработке технического облика флуориметра для дистанционного оперативного контроля состояния растительности. Проведенные исследования показывают, что лазерный флуориметр при длине волны возбуждения флуоресценции 532 нм и регистрации флуоресцентного излучения в узких спектральных диапазонах шириной 10 нм с центральными длинами волн 685 и 740 нм позволяет эффективно проводить дистанционное обнаружение стрессовых состояний растений, вызванных разными причинами.

Список литературы:

1. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды / В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов, В.А. Городничев, Б.В. Стрелков. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 528 с.

2. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.

3. Optical Methods for Water Pollution Monitoring / A. Utkin [et al.] // URL. http://www.cieo.ualg.pt/discussionpapers/8/article10.pdf (дата обращения 25.08.2016).

4. *Бункин Ф.В., Бункин А.Ф.* Лидарное зондирование водоемов, почвы и растительности // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 1. С. 63 - 68.

5. Laser remote monitoring of the plant photosynthetic activity / R. Barbini, F. Colao, R. Fantom, F. Palucci, S. Ribezzo // SPIE. 1995. Vol. 2585. P. 57 - 65.

6. Helicopter-based lidar system for monitoring the upper ocean and terrain surface / Lee K.J., Park Y., Bunkin A., Nunes R., Pershin S., Voliak K. // Applied Optics. 2002. Vol. 41. No 3. P. 401-406.

7. Нестеренко Т.В., Тихомиров А.А., Шихов В.Н. Индукция флуоресценции хлорофилла и оценка устойчивости растений к неблагоприятным воздействиям // Журнал общей биологии Том 68, 2007. № 6, ноябрь-декабрь. С. 444-458.

8. Структурная организация фотосинтетического аппарата растений. Режим доступа: http://lsdinfo.org/strukturnaya-organizaciya-fotosinteticheskogo-apparata-rastenij (дата обращения 14.09.2016).

9. Hoge F.E., Swift R. N., Yungel J. K. Feasibility of airborne detection of laser-induced fluorescence emissions from green terrestrial plants // Applied Optics. 1983. Vol. 22. No 19. P. 2991 - 3000.

10. Optical and fluorescence properties of corn leaves from different nitrogen regimes / E. Middleton, J.E. McMurtrey, P.K. Entcheva Campbell, L.A. Corp, L.M. Butchera, E.W. Chappellea // Proc. of SPIE. 2003. Vol. 4879. P. 72 - 83.

11. Matvienko G., Timofeev V., Grishin A., Fateyeva N. Fluorescence lidar method for remote monitoring of effects on vegetation // Proc. of SPIE. 2006. Vol. 6367. P. 63670F-1 - 63670F-8.

12. Фатеева Н.Л. Дистанционная диагностика состояния растений на основе метода лазерно-индуцированной флуоресценции: дис. … канд. физ.-мат. наук. Томск, 2006. 123 с.

13. Лысенков В.С., Вардуни Т.В., Сойер В.Г., Краснов В.П. Флуоресценция хлорофилла растений как показатель экологического стресса: теоретические основы применения метода // Фундаментальные исследования. 2013. №4. С. 112-119.

14. Федотов Ю.В., Булло О.А., Матросова О.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Устойчивость результатов лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 01. С. 80-84.

15. Fluorescence sensing systems: In vivo detection of biophysical variations in field corn due to nitrogen supply / Corp L.A., McMurtrey J.E., Middleton E.M., Mulchi C.L., Chappelle E.W., Daughtry C.S.T. // Remote Sensing of Environment. 2003. Vol. 86. P. 470-479.

ПРОЕКТ ФОТОННОГО АЦП

ЯКУШЕНКОВ П.О.

АО «Ангстрем», г. Москва

E-mail: loss24680@yandex.ru

Показаны преимущества аналого-цифрового преобразователя на фотонной интегральной схеме по сравнению с АЦП на транзисторной электронике. Рассмотрены некоторые схемы реализации фотонного АЦП, их сравнения, а так же варианты проектирования, моделирования и реализации фотонного АЦП на существующей в России технологической базе.

Ключевые слова: фотонный АЦП, электрооптический модулятор, лазер, фотоприемник, САПР, материалы A_3B_5.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) – это прибор, принимающий аналоговый сигнал и выдающий набор цифр. Суть аналого-цифрового преобразования заключается в дискретизации сигнала во времени и квантовании его по амплитуде или мощности (рис. 1). Дискретизация сигнала обеспечивает не сплошной, а побитовый поток информации, а квантование придает каждому биту одно из дискретных значений (обычно 0 или 1).

Наибольшая частота электронных АЦП, изготавливаемых в России, близка к 500 МГц. Процесс повышения производительности АЦП в настоящее время замедлился, поскольку не удалось снизить флуктуации электронного генератора импульсов, используемого для дискретизации аналогового сигнала, и улучшить быстродействие АЦП. В то же время экспериментально обосновано, что фотонные АЦП (ФАЦП) позволяют на оптической несущей получить значительно более высокую частоту выборки аналогового сигнала, чем это может обеспечить транзисторная электроника. Создание из электрооптических модуляторов фотонного АЦП может обеспечить аналого-цифровое преобразование с частотой порядка 10 ГГц.

Известны различные схемы реализации ФАЦП: с увеличением частоты выборки за счет задержки (рис. 2); с оптическим демультиплексированием сигнала по длине волны в параллельные каналы (рис. 3); с оптическими частотными каналами (рис. 4); ФАЦП с модуляторами с различными длинами электродов для обеспечения нужной передаточной характеристики для обеспечения нужной

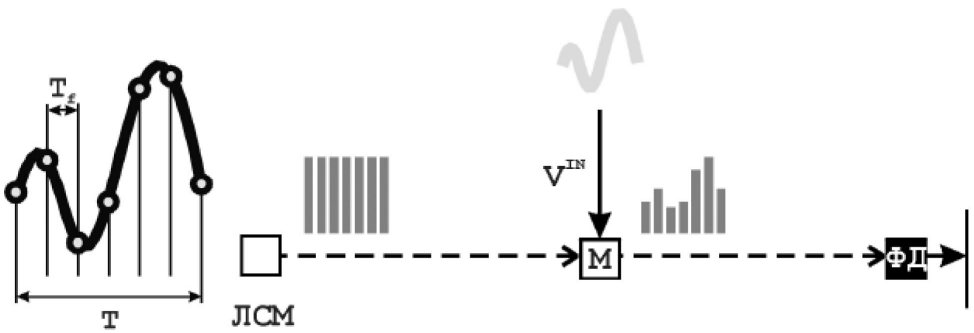


Рисунок 1.

ЛСМ – генератор импульсов для дискретизации, М – модулятор и ФД – приемник сигнала обеспечивают квантование [1]

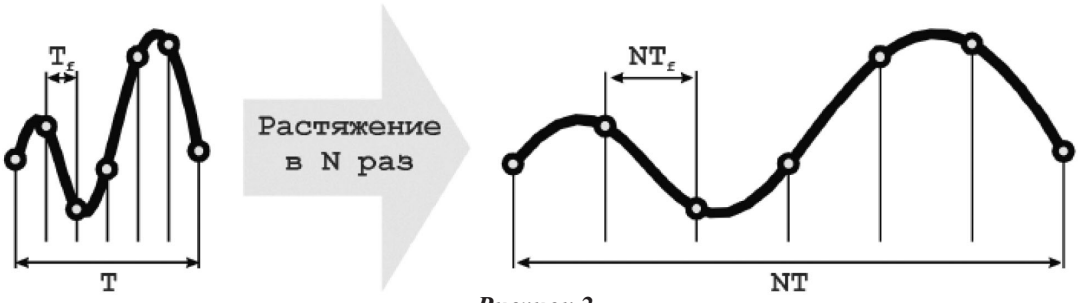


Рисунок 2.

Возможность увеличения частоты выборки за счет задержки [1]

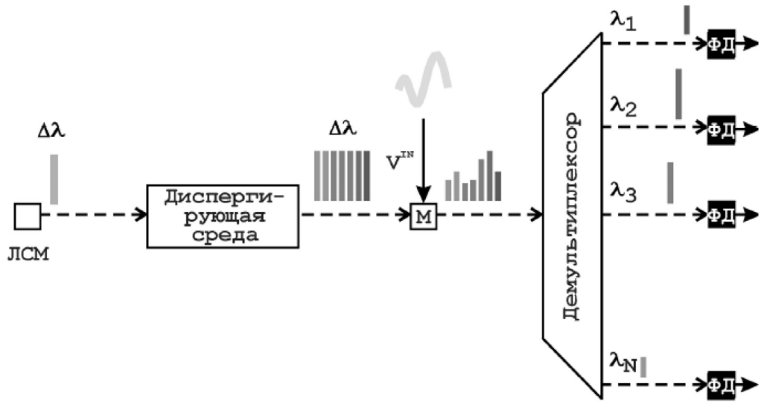


Рисунок 3.

ФАЦП с демультиплексированием по длине волны в параллельные каналы [1]

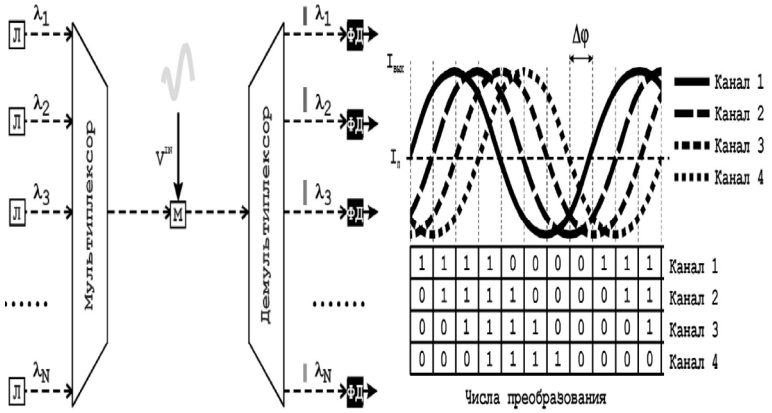


Рисунок 4.

ФАЦП с оптическими частотными каналами и их передаточная характеристика [1]

цифры на выходе (рис. 5), которая так же может быть обеспечена и отклонением луча из-за нелинейных эффектов и пропусканием его через транспаранты с периодическими щелями и фотодетекторами, настроенными на разные диапазоны, с мультиплексированием и демультиплексированием оптической несущей.

Для реализации ФАЦП на фотонной интегральной схеме (ФИС) наиболее оптимальна последняя схема, т. к. в ней используется одна длина волны, количество компонентов в ней минимально, а модуляторы с различными длинами электродов обеспечивают сразу же необходимые выходные характеристики и не надо для этого делать на чипе еще и электронную схему.

ФАЦП НА ФОТОННОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЕ

Остановимся на схеме реализации ФАЦП, которую можно будет реализовать на фотонной интегральной схеме (ФИС) в виде одного чипа.

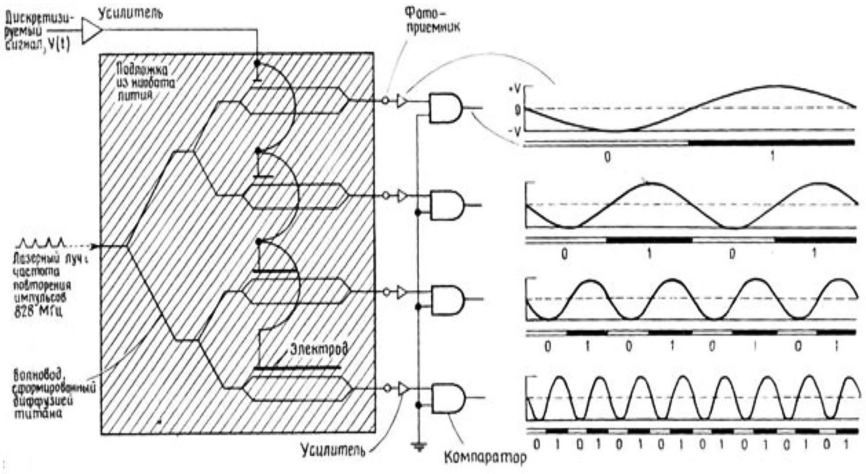


Рисунок 5.
ФАЦП с модуляторами с различными длинами электродов и их выходные сигналы [3]

Основными элементами чипа являются - импульсный лазер, электрооптический модулятор и фотоприемник, изготовленные на единой схеме в интегральном исполнении (как рис. 5, но с лазером и приемником на той же интегральной схеме).

Для обеспечения быстрого аналого-цифрового преобразования можно использовать быстродействующие импульсные высокочастотные лазеры с частотой импульсов порядка ГГц и быстрые фотоприемники в интегральном исполнении на материалах А3В5 для диапазона длин волн в районе 1,55 мкм (популярная в ВОЛС длина волны), изготавливаемые в НПО «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха.

Для обеспечения быстрого аналого-цифрового преобразования необходим модулятор с большой частотой переключения, для чего нужно, чтобы быстро перезаряжалась емкость на электродах. Для этого целесообразно использовать материалы с высокой подвижностью, такие, как материалы группы А3В5. На сегодняшний день лучшим вариантом электрооптического модулятора является модулятор типа Маха-Цендера (рис. 6). Однако в нашей стране электрооптические модуляторы Маха-Цендера пока делаются только на ниобате лития («ПНППК»), который закупается за границей.

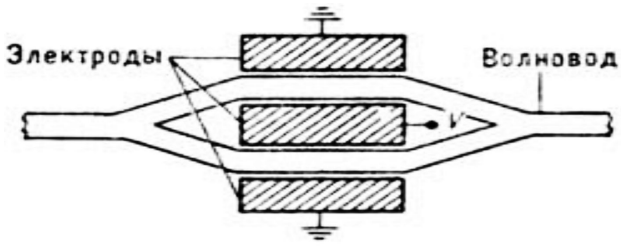


Рисунок 6.
Электрооптический модулятор типа Маха-Цендера [3]

Для реализации ФАЦП на интегральной схеме необходимо создать электрооптический модулятор типа Маха-Цендера в интегральном исполнении, который можно интегрировать вместе с лазером и фотоприемником и который обеспечит частоту переключения от 10 до 100 ГГц. Гетероструктуры из материалов А3В5 можно выращивать, не закупая материалы за границей, а технологические операции с гетероструктурами можно выполнять на существующей технологической базе.

За границей уже делают интегральные электрооптические модуляторы типа Маха-Цендера на InP и GaAs, например Teraxion, Oclaro, aXenics. Более того, уже производятся линейки лазер-модулятор-фотоприемник в интегральном исполнении на единой схеме [2]. Для ФАЦП по сути надо сделать несколько таких параллельных линеек.

Для создания ФАЦП предстоит спроектировать и промоделировать его топологию в САПРе, разработать технологический маршрут для ее реализации, вырастить необходимую гетероструктуру и провести технологические операции согласно маршруту.

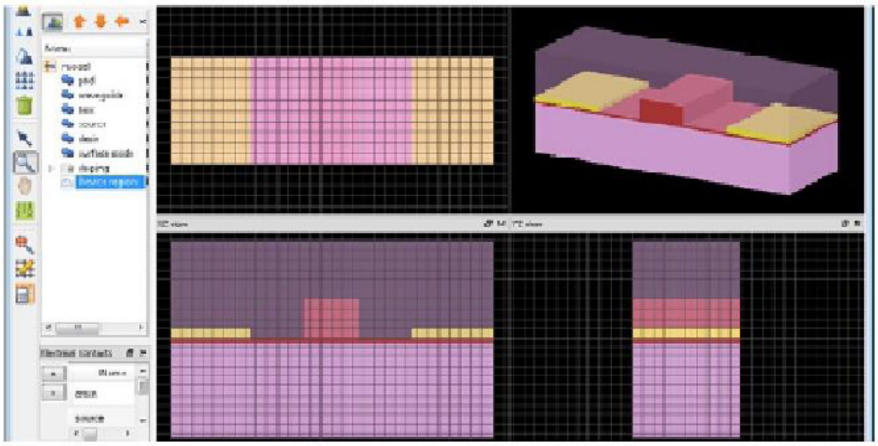


Рисунок 7.

Электрооптический модулятор типа Маха-Цендера, промоделированный в САПР Lumericle

В последнее время многие компании стали выпускать САПР для ФИС, например Lumerical, COMSOL, PhoeniX, Optiwave. Для проектирования нами был выбран САПР Lumerical [4]. Эта система совместима с Cadence Virtuoso, на котором проектируется сейчас большинство электронных схем, а так же включает в себя несколько пакетов: FDTD Solutions, в котором можно моделировать различные волноводы, разветвители и другие волноводные структуры из различных материалов; DEVICE, в котором можно моделировать различные приборы; INTERCONNECT для проектирования многих элементов на единой схеме и MODE Solutions в котором можно моделировать плазмонные волноводы, фотонные кристаллы и др. На рис. 7 показан промоделированный в САПР Lumerical простой вариант электрооптического модулятора типа Маха-Цендера.

После проектирования и моделирования топологии необходимо подобрать нужную гетероструктуру и технологические операции с ней (такие как травление, осаждение, литография, МЛЭ...), которые нужны для реализации ФАЦП.

Для реализации топологии сверхбыстродействующего ФАЦП не обязательно обладать самыми современными в мире технологическими нормами, как Intel (13 нм).

Необходимые технологические операции можно выполнить и на имеющимся в России оборудовании (например Corial); ведь Intel нужна такая норма для реализации быстродействующих переключателей - чем меньше длина, тем быстрее переключается транзистор, однако электрооптический модулятор типа Маха-Цендера даже размером до нескольких мм может переключаться со скоростями порядка 10 ГГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый ФАЦП может иметь быстродействие около 10 ГГц. Реализовать топологию ФАЦП на материалах А3В5 (вырастить для этого гетероструктуру и провести с ней необходимые технологические операции) можно полностью в России. Имея фотонный АЦП, можно будет разрабатывать цифровые фотонные схемы, включая цифровые оптические процессоры.

Список литературы:

1. *Р.С. Стариков.* Фотонные АЦП - ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2015.

2. ‘InP-Based Photonic Integrated Circuits’, Goldren, 2008.

3. *Якушенков П.О., Балаклейский Н.С.* Фотонные интегральные схемы. – Сб. докладов6-ой Международной конференции по фотонике и информационной оптике.- М., 02 февраля 2017 г., ННИЯУ «МИФИ» с. 146-148.

4. www.lumerical.com.

УДК 551.501

российский индекс научного цитирования Science Index

ОЦЕНКА ЛАЗЕРНЫХ КОНТРАСТОВ «ПЛЕНКА НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ – ЧИСТАЯ ВОДНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ» НА БЕЗОПАСНЫХ ДЛЯ ЗРЕНИЯ ДЛИНАХ ВОЛН В УФ И БЛИЖНЕМ ИК СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНАХ

ГОРОДНИЧЕВ В.А., БЕЛОВ М.Л., ВСЯКОВА Ю.И., КРАВЦОВ Д.А., МИХАЙЛОВСКАЯ М.Б.

НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

E-mail: gorod@bmstu.ru, ekomonit@bmstu.ru, belov@bmstu.ru

Проведен сравнительный анализ лазерных контрастов «пленка нефтяного загрязнения - чистая водная поверхность» на безопасных для зрения лазерных длинах волн зондирования 0.355 и 1.54 мкм. Показана перспективность использования длины волны 0,355 мкм для зондирования нефтяных загрязнений на водной поверхности, так как из-за периодических колебаний коэффициента отражения для длине волны 1.54 мкм лазерный контраст «пленка нефтяного загрязнения - чистая водная поверхность» на этой длине волны оказывается больше лазерного контраста «нефтяное загрязнение – чистая водная поверхность» на длине волны 0.355 мкм только при толщинах нефтяной пленки порядка 40 мкм и более.

Ключевые слова: лазер, нефтяные загрязнения, дистанционный метод, обнаружение.

ESTIMATION OF LASER CONTRAST «OIL POLLUTION FILM – CLEAN WATER SURFACE» FOR EYE-SAFE SOUNDING WAVELENGTHS IN UV AND NEAR MIDDLE IR BANDS

GORODNICHEV V.A., BELOV M.L., VSYAKOVA YU.I., KRAVTSOV D.A., MIKHAYLOVSKAYA M.B

Radioelectronics and Laser Technology Research Institute of Moscow State Technical University n.a. Bauman

E-mail: gorod@bmstu.ru, ekomonit@bmstu.ru, belov@bmstu.ru

Comparative analysis of laser contrast «oil pollution film – clean water surface» for eye-safe sounding wavelengths 0.355 и 1.54 μm is considered. It is shown that wavelength 0,355 μm is particularly promising for remote sensing of oil pollution on water surface, as laser contrast «oil pollution film – clean water surface» at the wavelength 1.54 μm is more laser contrast «oil pollution film – clean water surface» at wavelength 0.355 μm only for oil film thickness 40 μm and more because of periodic motion of reflection coefficients for wavelength 1.54 μm.

Keywords: llaser, oil pollution, remote sensing method, detection.

ВВЕДЕНИЕ

Нефть является одним из основных загрязнителей поверхности морских и озерных акваторий (см., например, [1,2]).

Загрязнения нефтью и нефтепродуктами водной поверхности оперативно обнаруживаются методами дистанционного зондирования (самолетными и спутниковыми), позволяющими инспектировать акватории морей и озер за небольшой промежуток времени.

Наиболее перспективными методами обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности являются лидарные методы, основанные на дистанционном импульсном лазерном зондировании водной поверхности и регистрации отраженного от поверхности лидарного сигнала или лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения [3-6]. Эти методы могут использоваться в любое время суток и в широком диапазоне состояний земной атмосферы. Они обладают высокой пространственной разрешающей способностью (могут обнаруживать нефтяные загрязнения небольшого размера).

Преимуществом метода лазерного зондирования, основанного на регистрации отраженного от поверхности лидарного сигнала, является возможность его использования при большой высоте носителя и соответственно при широкой полосе сканирования на водной поверхности.

Данная статья посвящена разработке лазерного метода обнаружения пленок нефтяных загрязнений на водной поверхности на безопасных для зрения длинах волн с авиационного носителя.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основой лидарного обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности является существование контраста между мощностью лазерного сигнала, регистрируемой приемником от чистой водной поверхности и поверхности с нефтяным загнязнением. Контраст обусловлен двумя причинами (см., например, [4]): нефтяное загрязнение (нефтяная пленка) имеет другой коэффициент отражения, чем граница «воздух-вода» и нефтяное загрязнение сглаживает волнение водной поверхности.

Использование систем лазерного зондирования связано с определенной опасностью для органов зрения человека [7]. Хотя чувствительность тканей глаза сравнительно мало отличается от чувствительности других тканей, в частности кожи и слизистых оболочек, однако в силу фокусирующих свойств оптической системы глаза плотность излучения на сетчатке резко возрастает. Именно поэтому структуры глаза, и в первую очередь сетчатка, являются основным критическим органом по отношению к лазерному излучению.

Излучение с длинами волн 0,18 – 0,38 мкм и свыше 1,4 мкм воздействует на передние среды глаза и является более безопасным, чем излучение с длинами волн 0,38 – 1,4 мкм [7]. Длина волны лазерного зондирования определяется конкретной задачей зондирования, однако, требование безопасности для глаз часто приводит к необходимости выбора между ультрафиолетовым (0,18 – 0,38 мкм) и ближним инфракрасным (свыше 1,4 мкм) спектральным диапазонами.

В ближнем инфракрасном диапазоне возможные длины волн зондирования ограничены окнами прозрачности атмосферы 1,5 - 1,8 мкм и 2,1 - 2,4 мкм (в основном из-за поглощения парами воды и углекислым газом). Здесь возможными источниками лазерного излучения являются оптические параметрические генераторы, лазеры на эрбиевом стекле, лазеры на алюмо-иттриевом гранате с легированием гольмием и др.

В ультрафиолетовом диапазоне из-за сильного поглощения кислородом и озоном реальной альтернативой ближнему инфракрасному диапазону может быть только длина волны 0,355 мкм (третья гармоника лазера на иттрий-алюминиемом гранате, активированном ионами неодима).

Однако, для большинства задач контроля нефтяных загрязнений на водной поверхности требуемые лазеры должны иметь энергию в импульсе порядка 5 - 50 мДж (в зависимости от высоты полета носителя и ширины

Таблица 1.

Примеры лазерных источников на длине волны 0,355 мкм

Модель лазера и/ или ссылка	Максимальная частота повторения импульсов, Гц	Энергия импульса, мДж	Длительность импульса, нс
TRL-HR 250-100 [8]	100	45	9
TRL-HR 120-200 [8]	200	20	9
LPY702-100 [8]	100	20	10-12
LPY742-200 [8]	200	50	8-10
NL233 [9]	100	35	5-7
LS-2138/100 [10]	100	40	14-16
LS-2149/300 [10]	300	5	12
LS-2149/1k [10]	до 1000	2	12
LQ629 [11]	100	50	9-12

Таблица 2.

Примеры лазерных источников на длине волны ~1,54 мкм

Модель лазера и/или ссылка	Длина волны, мкм	Максимальная частота повторения импульсов, Гц	Энергия импульса, мДж	Длительность импульса, нс
Оптические параметрические генераторы на Nd:YAG лазере (на иттрий-алюминиевом гранате с легированием ионами неодима) [12]				
IFL-N5030-OPO	1,57	30	50	7-10
Оптические параметрические генераторы на Nd:YLF лазере (на фториде иттрия-лития с легированием неодимом) [13]				
DP10-OPO	1,5-2,0	100	4	6-10
DP20H-OPO	1,5-2,0	1000	4	6-10
Лазеры на Er:glass (эрбиевое стекло)				
[14]	1,54	1 - 20	7	< 25
[15]	1,54	10,20	10	25

полосы пространственного сканирования), длительность импульсов – от единиц до 10…20 нс и частоту повторения – сотни герц.

Для длин волн зондирования 0,355 мкм и ~1,54 мкм такие лазеры вполне доступны. В таблицах 1,2 приведены примеры таких лазеров [8-15] для частот повторения импульсов 100 Гц и выше.

Из таблиц 1,2 видно, что подходящие по характеристикам для дистанционного зондирования лазеры (если не принимать во внимание их стоимость, габариты и вес, которые не указаны в таблицах и будут улучшаться по мере развития технологий), можно подобрать как на длине волны 0,355 мкм, так и на длине волны ~ 1,54 мкм (хотя, для длины волны 0,355 мкм выбор на сегодняшний день более широкий).

Исследование лазерных контрастов «пленка нефтяного загрязнения - чистая водная поверхность» проводилось ранее в оптическом диапазоне и для некоторых лазерных длин волн в ряде работ (см., например, [4-6]). Однако, оценка лазерных контрастов на безопасных для зрения длинах волн ранее не проводилась.

В статье проводится сравнительный анализ лазерных контрастов «пленка нефтяного загрязнения - чистая водная поверхность» на безопасных для зрения лазерных длинах волн зондирования в УФ (0,355 мкм) и ближнем ИК (~1,54 мкм) спектральных диапазонах.

ЛАЗЕРНЫЙ КОНТРАСТ «ПЛЕНКА НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ - ЧИСТАЯ ВОДНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ»

Контраст K “пленка нефтяного загрязнения - чистая водная поверхность”, характеризующий различие в отражательных свойствах чистой и покрытой нефтяной пленкой поверхности воды, обычно определяется следующим образом:

$$K = \frac{P_{oil}}{P_W}$$

P_W - мощность лазерного сигнала, регистрируемого приемником лидара от чистой поверхности воды;

P_{oil} - мощность сигнала, регистрируемого приемником лидара от поверхности воды, покрытой пленкой нефти.

Используя выражение для мощности лазерного эхо-сигнала [4], можно получить формулу для контраста K “нефтяное загрязнение - чистая водная поверхность” в общем случае наклонного моностатического зондирования морской поверхности:

$$K = \frac{V_2^2}{V_1^2}\exp\{-\frac{q_x^2}{2q_z^2}[\frac{1}{\gamma_{2x}^2}-\frac{1}{\gamma_{1x}^2}]\}\frac{(\gamma_{1x}^2\gamma_{1y}^2)^{1/2}}{(\gamma_{2x}^2\gamma_{2y}^2)^{1/2}} \quad (1)$$

$$[\frac{\tau^2c^2/16+2\sigma_1^2+\sin^2\theta/(C_s+C_r)}{\tau^2c^2/16+2\sigma_2^2+\sin^2\theta/(C_s+C_r)}]^{1/2}$$

где

$q_x = 2\sin\theta$; $q_z = 2\cos\theta$

σ^2, $\gamma_{x,y}^2$ - дисперсии высот и наклонов взволнованной морской поверхности;

V^2- коэффициент отражения Френеля для плоского (без волнения) участка морской поверхности при зондировании в надир (вертикально вниз);

τ - длительность лазерного импульса;

θ - угол зондирования (между направлением оптической оси лидара и направлением в надир) ;

$C_{s,r} = (\alpha_{s,r}L)^{-2}$ - (для прозрачной земной атмосферы) ;

$2\alpha_{s,r}$ - уголы расходимости источника и поля зрения приемной оптической системы;

L – высота полета носителя.

Величины V,γ,σ с индексом 1 относятся к чистой (без нефтяного загрязнения) морской поверхности, а с индексом 2 - к морской поверхности с нефтяным загрязнением (нефтяной пленкой). При получении формулы (1) считалось, что $\theta << 1$ и $\alpha_{s,r}^2 < \gamma_{x,y}^2$, θ^2, а скорость приводного ветра невелика, так что пена на морской поверхности не образуется.

Отметим, что выражение (1) получено при использовании формул для средней (за много посылок лазерных импульсов) мощности в моменты максимумов принимаемых лидарных сигналов.

Одним из сомножителей в формуле (1) является $\frac{V_2^2}{V_1^2}$ - отношение коэффициента отражения V_2^2 нефтяного загрязнения (пленки нефти) к коэффициенту отражения V_1^2 чистой (без нефтяного загрязнения) морской поверхности.

В случае облучения участка водной поверхности с пленкой нефти, ориентированного перпендикулярно направлению облучения, (именно такие участки водной поверхности возвращают отраженное излучение обратно на приемник лидара) формула для V_2^2 имеет следующий вид (см., например, [6]):

$$V_2^2 = \left|\frac{(Z_1+Z_2)(Z_2-Z_3)e^{-i\alpha(\lambda)d}+(Z_1-Z_2)(Z_2+Z_3)e^{+i\alpha(\lambda)d}}{(Z_1+Z_2)(Z_2+Z_3)e^{-i\alpha(\lambda)d}+(Z_1-Z_2)(Z_2-Z_3)e^{+i\alpha(\lambda)d}}\right|^2 \quad (2)$$

где $Z_j = \frac{1}{m_j}$ - волновое сопротивление j-ой среды;

$\alpha(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda}m_2$;

$m_j = n_j + k_j$ - комплексный показатель преломления j-ой среды;

n_j, k_j – показатели преломления и поглощения j-ой среды (для воздуха $m_1 = n_1 = 1$);

d - толщина нефтяной пленки.

Индексы 1,2,3 относятся к воздуху, нефти и воде.

Величина V_2^2 представляет собой коэффициент отражения трехслойной системы «воздух - пленка нефти - вода» и сложным образом (из-за интерференции излучения, отраженного от границ раздела «воздух – пленка нефти» и «пленка нефти – вода») зависит от длины волны излучения λ, оптических характеристик характеристик воды и нефтепродукта, толщины пленки d.

Сразу после разлива нефти на водной поверхности (например, при аварии на нефтепроводе или нефтехранилище, круше-

нии нефтеналивного судна и т.п.) толщина пленки может составлять несколько сантиметров. Из-за растекания нефти по поверхности моря толщина пленки уменьшается до 1…0,1 мм. С течением времени нефтяное пятно на морской поверхности подвергается, с одной стороны, переносу под действием течений и ветра, а с другой стороны – множеству процессов трансформации (см., например, [4]).

Одним из важных вопросов в проблеме загрязнения нефтепродуктами водной поверхности является вопрос о толщине нефтяного пятна (слика), при достижении которой пятно нефтяного загрязнения перестает существовать как единое целое (см., например, [4]).

В зависимости от сорта нефти эта толщина обычно оценивается в пределах от 4 до 100 мкм.

Однако, имеются многочисленные результаты измерений (самыми различными методами) толщины пленок различных нефтей и нефтепродуктов как в натурных, так и в лабораторных условиях, в которых была получена гораздо меньшая (чем 4 мкм) толщина пленок нефтепродуктов – до 0,1 мкм (см., например, [3]).

Величина V_1^2 представляет собой коэффициент отражения двухслойной системы «воздух - вода» (чистой без нефтяного загрязнения морской поверхности) и определяется следующей формулой вид (см., например, [6]):

$$V_1^2 = \frac{(1-n_3)^2 + k_3^2}{(1+n_3)^2 + k_3^2} \qquad (3)$$

Спектральная зависимость V_1^2 определяется спектральной зависимостью показателей преломления и поглощения воды.

В работе проводилось математическое моделирование контраста

$K_V = \frac{V_2^2}{V_1^2}$ (отношение коэффициента отражения пленки нефти к коэффициенту отражения чистой без нефтяного загрязнения морской поверхности) на длинах волн лазерного зондирования 0,355 и 1,54 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ КОНТРАСТОВ «ПЛЕНКА НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ - ЧИСТАЯ ВОДНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ»

Математическое моделирование контраста

$$K_V = \frac{V_2^2}{V_1^2}$$

проводилось для лазерных длин волн зондирования 0,355 мкм (УФ спектральный диапазон) и 1,54 мкм (ближний ИК диапазон). Значения показателей преломления и поглощения воды и нефти на разных длинах волн были взяты из работы [16]. Значение толщин пленок нефти на морской поверхности задавалось в диапазоне 0,1-100 мкм.

На рис. 1 и 2 приведены зависимости коэффициента отражения V_2^2 от толщины пленки нефтяного загрязнения d для безопасных для зрения длин волн зондирования 0.355 мкм и 1.54 мкм (коэффициенты отражения двухслойной системы «воздух - вода» для этих длин волн равны 0.023 и 0.016, соответственно).

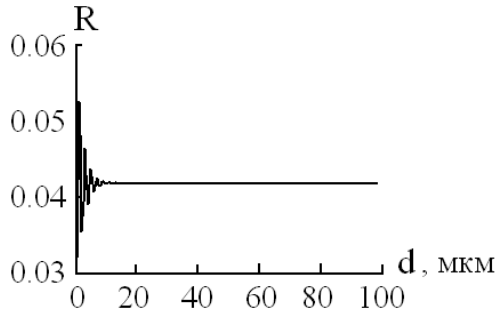


Рисунок 1.
Зависимость коэффициента отражения от d для длины волны 0.355 мкм

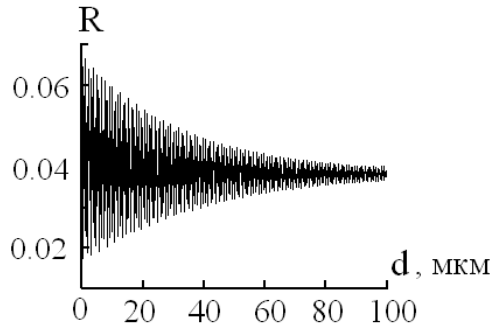


Рисунок 2.
Зависимость коэффициента отражения от d для длины волны 1.54 мкм

Из рисунков видно, что при увеличении толщины нефтяной пленки коэффициент отражения приближается (колебательно) к некоторому постоянному значению. Это постоянное значение равно коэффициенту отражения двухслойной среды «воздух-нефть» (0.042 и 0.038 для длин волн зондирования 0.355 мкм и 1.54 мкм, соответственно).

На рис. 3,4 для этих же длин волн (0.355 мкм и 1.54 мкм) приведены зависимости лазерного контраста «пленка нефтяного загрязнения - чистая водная поверхность»

$K_V = \frac{V_2^2}{V_1^2}$ (вызванного различием коэффициентов отражения водной поверхности, покрытой пленкой нефтепродукта, и чистой водной поверхности) от толщины пленки нефтяного загрязнения d.

Из рис. 3,4 видно, что при увеличении толщины пленки нефтяного загрязнения значения лазерных контрастов

$K_V = \frac{V_2^2}{V_1^2}$ приближаются (колебательно) к некоторым постоянным значениям.

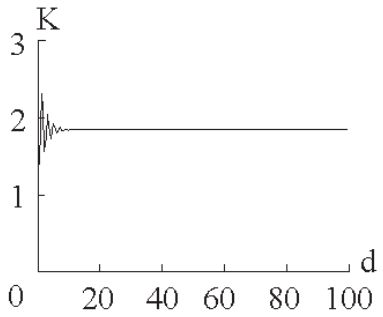


Рисунок 3.
Зависимость лазерного контраста от **d**
для длины волны 0.355 мкм

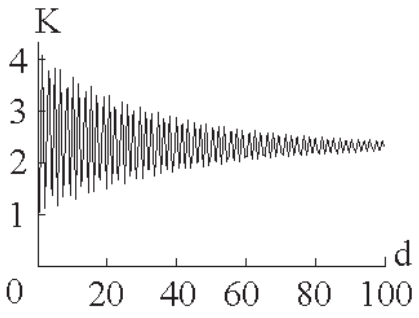


Рисунок 4.
Зависимость лазерного контраста от **d**
для длины волны 1.54 мкм

Эти постоянные значения равны лазерным контрастам для двухслойной среды «воздух-нефтяное загрязнение» на соответствующих длинах волн зондирования. Для длин волн зондирования 0.355 и 1.54 мкм эти лазерные контрасты двухслойной среды «воздух-нефтяное загрязнение» соответственно равны 1.84, 2.3. Т.е. контраст в случае очень толстых пленок для длин волн зондирования 1.54 мкм больше, чем для 0.355 мкм.

Однако, рис. 1 – 4 показывают перспективность использования именно длины волны 0,355 мкм для зондирования нефтяных загрязнений на водной поверхности: из-за больших периодических колебаний коэффициента отражения для длине волны 1.54 мкм лазерный контраст «пленка нефтяного загрязнения - чистая водная поверхность» на этой длине волны оказывается всегда больше лазерного контраста «нефтяное загрязнение – чистая водная поверхность» на длине волны 0.355 мкм только при толщинах нефтяной пленки порядка 40 мкм и более. Поэтому, для задачи обнаружения пленок нефтепродуктов на водной поверхности в реальных условиях (когда толщина пленки может составлять единицы и даже десятые доли мкм) длина волны зондирования 0,355 мкм является предпочтительной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведен сравнительный анализ лазерных контрастов «пленка нефтяного загрязнения - чистая водная поверхность» на безопасных для зрения лазерных длинах волн зондирования 0.355 и 1.54 мкм. Показана перспективность использования длины волны 0,355 мкм для зондирования нефтяных загрязнений на водной поверхности, так как из-за больших периодических колебаний коэффициента отражения для длине волны 1.54 мкм лазерный контраст «пленка нефтяного загрязнения - чистая водная поверхность» на этой длине волны оказывается всегда больше лазерного контраста «нефтяное загрязнение – чистая водная поверхность» на длине волны 0.355 мкм только при толщинах нефтяной пленки порядка 40 мкм и более.

Список литературы:

1. *Немировская И.А.* Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Изд-во Научный мир. 2013. 432 с.

2. Загрязнение морей и океанов. Режим доступа: http://www.o8ode.ru/ article/planetwa/ zagraznenie_morei_i_okeanov.htm (дата обращения 20.09.2016).

3. *Measures R.M.* Laser remote sensing. Fundamentals and applications. Krieger Publishing Company. Malabar. Florida. 1992. 510 p.

4. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды / В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов, В.А. Городничев, Б.В. Стрелков. М.:Из-во МГТУ,2002,528 с.

5. *Стрелков Б.В., Белов М.Л., Тухватулина С.А., Городничев В.А.* Лазерный метод обнаружения нефтяных загрязнений на взволнованной морской поверхности, использующий угловое сканирование // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 7. Режим доступа: http://technomag.edu.ru/doc/413496.html (дата обращения 26.09.2016).

6. *Козинцев В.И., Городничев В.А., Белов М.Л., Смирнова О.А., Березин С.В., Хрусталева Ю.М.* Лазерный метод дистанционного контроля толщины пленки нефтепродуктов на взволнованной морской поверхности // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2005, Т.3, N4-5, С.54-59.

7. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. ГОСТ 31581-2012. М.: Стандартинформ, 2013.

8. Litron laser. Режим доступа: http://www.litronlasers.com/ (дата обращения 20.09.2016).

9. Ekspla. Режим доступа: http://www.ekspla.com/products (дата обращения 20.09.2016).

10. Lotis TII. Режим доступа: http://www.lotis-tii.com/rus/index.php (дата обращения 20.09.2016).

11. Solar laser systems. Режим доступа: http://solarlaser.com/ru/ (дата обращения 20.09.2016).

12. Solar laser systems. Режим доступа: http://sm-laser.by/ifl-n5030-opo/ (дата обращения 20.09.2016).

13. Opo series. Режим доступа: http://www.nanointek.ru/assets/files/OPO.pdf (дата обращения 20.09.2016).

14. Оптика лазеров. 1.5 мкм частотный лазер на эрбиевом стекле с диодной накачкой. Режим доступа: http://www.npkgoi.ru/?module=articles&c=profil&b=14&a=1 (дата обращения 20.09.2016).

15. Лазеры и оптические системы. Режим доступа: http://www.los.su/ru/produktsiya.html (дата обращения 20.09.2016).

16. *Гардашов Р.Г., Гуревич И.Я., Шифрин К.С.* Отражение излучения от взволнованной морской поверхности, покрытой нефтяной пленкой. В кн.: Оптика океана и атмосферы, Баку: Изд-во Элм. 1983. С.33-44.

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

БАКЛАНОВ А.И.

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

E-mail: optecs@mail.ru

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

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

Начало XXI века стало началом эпохи коммерциализации космических систем ДЗЗ высокого разрешения. Восемнадцать лет назад (24 сентября 1999 г.) на орбиту был выведен первый коммерческий оптико-электронный спутник высокого разрешения «Ikonos-2» (США). Потребителям во всём мире впервые стали доступны цифровые изображения земной поверхности с пространственным разрешением 1 метр и мультиспектральные с разрешением 4 метра.

Спутник успешно отработал более 15 лет (до 31.03.2015 г). Последующие годы стали периодом становления мировой группировки таких систем. Гражданские космические оптико-электронные спутники высокого разрешения появились не только у США (Quickbird-2, WorldView-I, GeoEae-1, WorldView-2, WorldView-3, WorldView-4), но и у Израиля (EROS-A, EROS-B), России (Ресурс-ДК1, Ресурс-П №1, Ресурс-П №2, Ресурс-П №3), Кореи (KompSat-2, KompSat-3, KompSat-3A), Индии (CartoSat-1, CartoSat-2, CartoSat-2A. CartoSat-2B), Франции (Pleiades -1A, Pleiades -1B, Spot-6, Spot-7) и ряда других стран. Характеристики некоторых космических аппаратов с аппаратурой высокого и сверхвысокого приведены в таблице 1.

Далеко не все страны, имеющие в своём распоряжение космические средства наблюдения, обладают техническими возможностями для их создания. В таких случаях государство или компании выступают заказчиком разработки оптико-электронной аппаратуры или спутника целиком или даже покупают и адаптируют для своих потребностей уже ранее созданный аппарат.

Количество стран, имеющих собственные средства ДЗЗ исчисляется уже десятками, да и «клуб» государств, самостоятельно разрабатывающих спутники и оптико-электронную аппаратуру, не мал и включает: США, Россию, Францию, Китай, Индию, Израиль, Канаду, Японию, Италию, Великобританию, Германию, Корею. Свои разработки ведут Тайвань, Иран и некоторые другие страны. Разнообразие интересов, технических и экономических возможностей привело к появлению различных вариантов построения космических систем наблюдения.

Появляются новые идеи и примеры их реализации, особенно на базе микроспутников. Каковы же современные тенденции развития средств ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения? Какие новые идеи выдвигаются разработчиками? Какие новые инструменты планируется создать? Какие конфигурации спутниковых систем наблюдения предлагаются реализовать в ближайшем будущем? Как и в какие сроки предполагается их реализовать? Как это повлияет на рынок услуг в ДЗЗ? Попробуем рассмотреть, как новые идеи в построении систем космического наблюдения, появившиеся в последние годы, так и «старые» уже хорошо проверенные концепции.

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

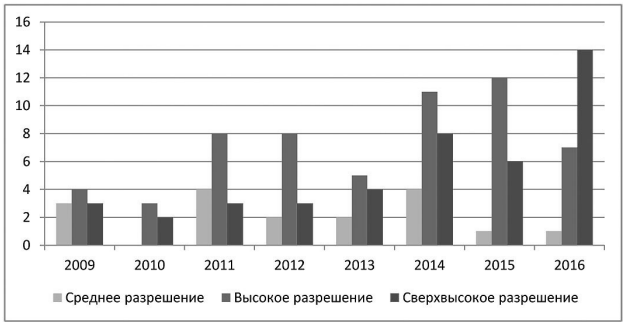


Рисунок 1.
Статистика запусков, по годам, спутников оптико-электронного наблюдения среднего, высокого и сверхвысокого разрешения

В этой статистике не учитываются запуски наноспутников Dove и Flock с оптико-электронной аппаратурой высокого разрешения, о которых ниже будет сказано отдельно. Видно, что доминирующими системами оптико-электронного наблюдения стали системы высокого и даже сверхвысокого разрешения. За последние годы на орбиту выведены десятки космических аппаратов с такой аппаратурой.

Характеристики некоторых таких аппаратов, выведенных на орбиту в период 2014-2016 гг. приведены в таблице 2.

ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Анализ показывает, что наиболее общей тенденцией является стремление к повышению разрешающей способности оптико-электронной аппаратуры спутников ДЗЗ. Это постоянный доминирующий лейтмотив развития космических оптико-электронных систем наблюдения, который нашел отражение практически во всех классах решаемых задач дистанционного зондирования: природопользовании, картографии, в решении задач сельского и лесного хозяйства, предупреждении и контроле чрезвычайных ситуаций и т.п. Точно также многие практические подходы, связанные с изменением схем наблюдения, высоты орбиты, конструктивных параметров аппаратуры, её габаритов, а также габаритов спутниковых платформ в первую очередь направлены на повышение разрешения. Это можно проследить по хронологии появления новых генераций спутников высокого и сверхвысокого разрешения как в отдельных группировках и странах, так и в целом. Возьмем только несколько примеров.

Первый коммерческий космический аппарат ДЗЗ «Ikonos-2» (1999 г., компания «Space Imaging») имел пространственное разрешение (проекцию пикселя на Землю) – 0,81 м., а КА «GeoEye-1» (2008 г.) созданный по заказу одноименной компании, ставшей наследницей «SpaceImaging» имеет разрешение 0,41 м. Налицо двойное улучшение разрешения. Конкурент «Space Imaging» компания «DigitalGlobe» стартовала в 2001 году со спутником «Quickbird-2» с разрешением 0,61м.

В 2007 г. на орбиту был выведен КА «WorldView-1» (разрешение 0,45 м), в 2008 КА «WorldView-2» (0,45 м.), а в 2014 и 2016 КА «WorldView-3» и «WorldView-3», с разрешением уже 0,31 м.

Надо отметить, что спутники «GeoEye-1» и «WorldView-1, 2, 3, 4» создавались после выдачи правительством США лицензии на коммерческие КА с разрешением до 0,25 м. и их аппаратура потенциально может реализовать эти характеристики на более низких орбитах.

Таблица 1.

Характеристики спутников ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения

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)

Таблица 2.

Характеристики некоторых таких аппаратов, выведенных на орбиту в период 2014-2016 гг.

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

Однако с коммерческой точки зрения требуется не только высокое разрешение, но и большая полоса захвата.

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

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

ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Увеличение пространственного разрешения и полосы захвата, как правило, ведёт к существенному возрастанию количества информации, передаваемой на наземные приёмные пункты и тесно связано с информационной производительностью оптико-электронной аппаратуры. Это является ещё одной доминантой, характерной для коммерческих систем ДЗЗ высокого разрешения. При этом следует выделять информационную производительность как самой съёмочной аппаратуры, так и скорость, и объём передаваемой цифровой информации на приёмные станции, а также производительность космических систем наблюдения в целом.

Традиционно производительность определяют, как площадь земной поверхности снимаемою и передаваемую на приемные станции за одни сутки. Тем не менее определяется она в первую очередь техническими характеристиками оптико-электронной аппаратуры и служебных систем спутника.

К уже упоминавшимся длине строки фотоприёмника детектора и полосе захвата, в первую очередь, следует добавить объём бортового запоминающего устройства и скорость сброса информации через радиолинию. При этом определяющим фактором может являться не только возможности бортовой аппаратуры и самого спутника, а сеть наземных станций, обеспечивающих как приём информации ДЗЗ, так и управление спутником (или группировкой спутников) и аппаратурой, установленной на нем.

Объём бортовой памяти оптико-электронных спутников, используемой для хранения снимков высокого и сверхвысокого разрешения, непрерывно растёт от поколения к поколению.

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

Историю эволюции основных информационных характеристик группировки американских спутников сверхвысокого разрешения, которая принадлежит сейчас компании DigitalGlobe можно проследить по данным таблицы 3. Группировка включает 5 спутников: «WorldView-1», «GeoEye-1», «WorldView-2», «WorldView-3» и «WorldView-4».

Таблица 3.

Информационные характеристики группировки спутников сверхвысокого разрешения компании DigitalGlobe

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

На сегодняшний день это крупнейшая мировая группировка спутников сверхвысокого разрешения, данные с которой формируют рынок услуг в этой области. Суточная производительность съёмки каждого из перечисленных космических аппаратов около 700 тысяч квадратных километров. В связи с обозначившейся конкуренцией на рынке данных высокого и сверхвысокого разрешения правомерно говорить о суммарной информационной производительности группировки спутников, принадлежащих одному оператору.

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

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

ГРУППИРОВКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СПУТНИКОВ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

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

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

решения и в высокопериодической съёмке и контроле как отдельных объектов, так и больших территорий, вплоть до постоянного обновления данных на всю Землю.

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

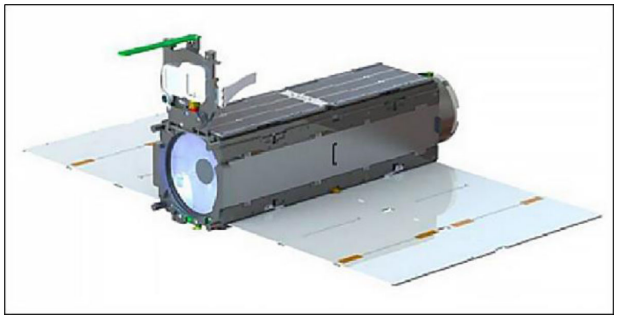


Рисунок 2.
Внешний вид спутника Dove (Flock)

В 2015 компания, переименованная в «Planet», выкупила у «Black Bridge» обанкротившуюся к тому времени группировку «RapidEye». Это объединение группировок одним оператором говорит не только о сохранении приоритетов сбора данных для сельского хозяйства, но и постановке новых задач, нацеленных на постоянный контроль промышленных объектов, транспортных сухопутных и морских перевозок и т.п. По заявлениям компании «Planet» именно за эти оперативные данные сегодня готовы платить заказчики. На конец февраля 2017 года на орбите работало уже 144 наноспутника Flock (Dove) различной модификации. На рисунке 3 «столбиками» показано количество ежегодно запускавшихся спутников типа Dove, а графиком количество реально работавших наноспутников из общего числа выведенных на орбиту.

На этом этапе было заявлено, что компания в этот период достигла своей основной цели и создала группировку, способную получать изображение каждой точки на Земле с разрешением до 3,7 м с интервалом не более 24 часов. «Селфи Земли каждые 24 часа». По замыслу группировка этих спутников массой 4,5 кг должна насчитывать более 200 аппаратов. И 14 июля 2017 года попутно с запуском КА «Канопус-В-ИК» на орбиту было доставлено ещё 48 кубсатов типа «Dove». В течение всего периода развертывания спутники выводились попутными запусками на орбиты близкие к основным космическим аппаратам, а также с МКС. В результате группировка существует на самых разных орбитах как по высоте, так и по наклонению. Пространственное разрешение также различное и составляет от 2,7 до 5 метров. Тем не менее основная (около 3/4) часть на солнечно синхронных орбитах и имеет разрешение около 3,7 метра. Планируется, что суточная производительность системы составит 150 млн. кв. км.

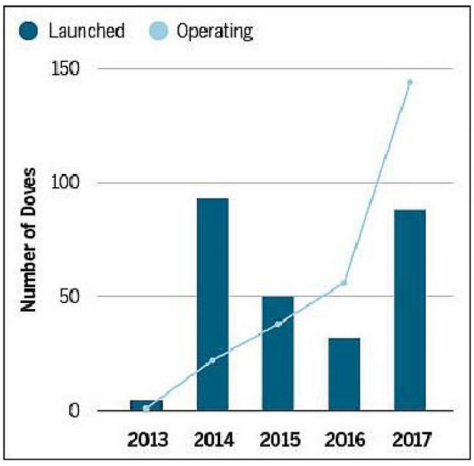


Рисунок 3.
График развертывания системы спутников Flock (Dove)

Полезная нагрузка типичного спутника «Dove» представляет собой телескоп Максутов-Кассегрен диаметром 90 мм и камеру на основе кадровой ПЗС матрицы с фильтром Байера, обеспечивающим классические R (610-700 нм), G (500-590 нм), B (420-530 нм)

диапазоны цветного изображения. Фокусное расстояние телескопа 1140 мм.

Интересно отметить, что собственно телескоп занимает 11/12 объёма всего спутника. По мере развития было создано три генерации полезной нагрузки. У первого поколения оптическая система содержала всего два оптических элемента и имела матрицу форматом 11 Мегапикселей. В дальнейшем телескоп получил конструкцию из углепластика, стал содержать уже 5 оптических элементов. Его поле зрения увеличилось, качество изображения значительно улучшилось и вместе с ним стала использоваться фотоприёмная матица форматом 29 Мегапикселей. В некоторых публикациях указывается, что ожидается генерация аппаратуры с дополнительным четвертым спектральным каналов в области ближнего ИК диапазона (760-900 нм). С высоты 475 км проекция пиксела составляет 3,73 метра, а размер снимаемого кадра 24,6 км х 16,4 км, т.е. 405 км$^{2.}$ Точность географической привязки – около 20 м (CE90).

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

Радиолиния передачи информации на Землю работает в X-диапазоне (8025-8400 МГц, линия «космос-Земля», 2 канала по 66,8 МГц) со скоростью от 12,5 до 120 Мбит/с. Высокочастотная мощность передатчика составляет 2 Вт. Микрополосковая антенна установлена на обратной стороне откидывающейся крышки телескопа. Возможно использование манипуляций: QPSK, 8-PSK, 16-APSK, 32-APSK. Помехоустойчивое кодирование от ¼ до 9/10. Аппаратура радиолинии выполнена из коммерчески доступных компонентов (разработанных для сотовой связи). Приём информации осуществляется на наземные станции с приемными антеннами диаметром 4,5...8 м. Для приёма целевой информации могут использоваться 36 антенн, размещённых в 12 районах Земного шара.

Потенциально созданная наземная сеть может принимать и обрабатывать до 6 Тбайт информации в сутки от 150 спутников. Все процессы по управлению группировкой спутников и приёмом информации максимально автоматизированы. По сообщениям компании для этого постоянно задействовано всего несколько человек.

В 2017 году компания Planet сделала следующий шаг в развитии своего бизнеса и приобрела у Google группировку спутников “SkySat” с разрешением лучше одного метра. В настоящее время на орбите находятся 5 таких КА (см. таблицы 1, 2). Масса каждого из первой пары спутников “SkySat-1” и “SkySat-2” около 90 кг. Последующие аппараты оснащаются двигательной установкой для поддержания орбиты и баллистического построения системы (рисунок 4).

Планируется, что в будущем группировка будет доведена до 12, или даже до 24 КА, что обеспечит возможность съемки любого объекта в средних широтах до 8-10 раз в сутки.

Рисунок 4.

Два поколения КА «SkySat»

Каждый SkySat оснащён телескопом по схеме Ричи-Кретьена Кассегрена с фокусным расстоянием 3,6 метра. В фокальной плоскости установлены 3 КМОП матричных фотоприёмника форматом 2560 х 2160 пикселей (5,5 Мегапикселей). Размер пикселей 6,5 мкм. Расположение матриц в фокальной плоскости показано на рисунке 5. Верхняя половина детектора используется для получения панхроматических изображений.

Нижняя разделена на 4 полосы, накрытые светофильтрами с синим, зелёным, красным и ближним-инфракрасным каналами. Проекция пикселей для первых двух аппаратов составляет 1,1 м. после наземной обработки передискретизации разрешение составляет 0,9 м. На последующих спутниках SkySat разрешение выше (0,7м) за счет снижения высоты орбиты.

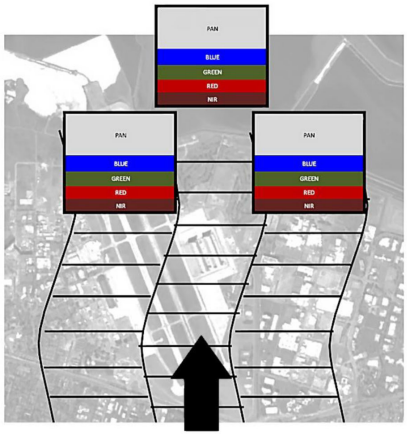


Рисунок 5.
Расположение КМОП матриц SkySat
и схема съёмки

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

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

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

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

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

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

Идея получила продолжение в микроспутнике DLR-Tubsat (1999 г.), который имел в своём составе уже три видеокамеры с разрешением 375, 120 и 6 метров.

Камеры были созданы на основе кадровых матриц ПЗС форматом 750x580 пикселей размером 8x8 мкм и отличались только характеристиками использованных объективов. Фокусное расстояние камеры с максимальным разрешением составляло 1000 мм, что обеспечило поле зрение видеокадра 6 км x 4,6 км при разрешении 6 метров. Данные непосредственно передавались на Землю в аналоговом виде в стандарте PAL.

Следующие модификации этого КА LAPAN-Tubsat, LAPAN-A2 (с разрешением 6 метра) создавались уже по заказу Индонезии. Индонезия отработала методики контроля судоходства с использованием видеосъёмки. При этом нужно иметь ввиду, что спутники, разработанные DLR, управляются и наводятся на объекты с помощью джойстика в режиме реального времени непосредственно в момент съёмки. Камера КА LAPAN-A2 имеет функции автоматического целеуказания для организации взаимодействия с системой управления во время съёмки.

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

Таблица 4.

Спутники ДЗЗ с аппаратурой видеонаблюдения

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

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

В 2015 Китай запустил одновременно два спутника Lingqia Video-A и Lingqia Video-B ориентированных только на видеосъёмку. Спутники оснащены камерами сверхвысокой чёткости 4К форматом 3840x2160 пикселей. Размер наблюдаемого кадра 4,3 x 2,4 км2 и длительность видеозаписи 120 секунд существенно превышают характеристики аппаратуры SkySat.

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

УДК 551.501

российский индекс научного цитирования Science Index

РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЭРОЗОЛЬНОГО ЛИДАРА В БЛИЖНЕМ УФ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ

ИВАНОВ С.Е., БЕЛОВ М.Л., ФИЛИМОНОВ П.А., ГОРОДНИЧЕВ В.А., МИХАЙЛОВСКАЯ М.Б.

НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

E-mail: ivanov_sergey2@mail.ru, belov@bmstu.ru, gorod@bmstu.ru, ekomonit@bmstu.ru

Статья посвящена энергетическому расчету аэрозольного лидара в ближнем УФ спектральном диапазоне. Приведены основные формулы, используемые для расчета энергетических характеристик аэрозольного лидара и характеристики земной атмосферы в ближнем УФ спектральном диапазоне. Проведена оценка отношения сигнал/шум для аэрозольного лидара на длине волны зондирования 0,355 мкм. Показано, что на расстояниях от лидара меньших 3 км основной составляющей шума является дробовой шум, вызванный самим лидарным сигналом. Однако, на расстояниях от лидара больших 4 км основной составляющей шума становится дробовой шум, вызванный фоновым излучением.

Ключевые слова: аэрозольный лидар, энергетические характеристики лидара, ближний ультрафиолетовый диапазон.

CALCULATION OF AEROSOL LIDAR ENERGY CHARACTERISTICS IN NEAR UV SPECTRAL BAND

S.E. IVANOV, M.L. BELOV, P.A. FILIMONOV, V.A. GORODNICHEV, M.B. MIKHAILOVSKAY

Radioelectronics and Laser Technology Research Institute of Moscow State Technical University n.a. Bauman

E-mail: ivanov_sergey2@mail.ru, belov@bmstu.ru, gorod@bmstu.ru, ekomonit@bmstu.ru

In this paper calculation of aerosol lidar energy characteristics is considered in near UV spectral band. Basic formulas for calculation of aerosol lidar energy characteristics and earth atmosphere parameters in near UV spectral band are given. Estimation of signal-to-noise ratio is conducted for aerosol lidar sounding wavelength 0,355 μm. It is shown that, fluctuation noise of lidar signal is main component of noise for distance from lidar less than 3 km. However fluctuation noise of background radiation is main component of noise for distance from lidar more than 4 km.

Keywords: aerosol lidar, lidar energy characteristics, near ultraviolet band.

ВВЕДЕНИЕ

Аэрозольные лидары, предназначенные для оперативного мониторинга атмосферы, позволяют дистанционно определять характеристики атмосферного аэрозоля и облачных образований в атмосфере (см., например, [1-6]). Также для некоторых практических приложений перспективными являются лидары для измерения скорости перемещения аэрозольных атмосферных неоднородностей (см., например, [7-9]).

В настоящее время существующие аэрозольные лидары (за редким исключением) работают в видимом или ближнем инфракрасном (ИК) спектральных диапазонах. Однако, интерес представляет и ближний ультрафиолетовый (УФ) спектральный диапазон 300 – 400 нм (прежде всего, с точки зрения безопасности для глаз и низких значений фоновой радиации).

Данная статья посвящена энергетическому расчету аэрозольного лидара в ближнем УФ спектральном диапазоне.

1. Основные формулы, используемые для расчета энергетических характеристик аэрозольного лидара в ближнем УФ спектральном диапазоне

Работа аэрозольных лидаров основана на регистрации приемником лидара мощности лазерного сигнала P(z), рассеянного (в сторону приемника лидара) аэрозольными частицами, присутствующими в атмосфере. Особенностью работы аэрозольных лидаров в ближнем УФ спектральном диапазоне является существенное влияние молекулярного рассеяния.

Мощность лазерного сигнала P(z) в приближении однократного рассеяния (в прозрачной атмосфере) в ультрафиолетовом спектральном диапазоне определяется выражением [7,10]:

$$P(z) = P_o K_t K_r c\tau_t r_r^2 (\beta(z)\chi_\pi(z) + \beta_M(z)\chi_{M\pi}(z)\, T_\nu(z) G(z)/8, \quad (1)$$

где

P_o – мощность лазерного источника лидара;

K_r, K_t – коэффициенты пропускания приемной (с учетом пропускания спектрального фильтра) и передающей оптической системы лидара;

c - скорость света;

τ_t – длительность импульса лазерного источника лидара;

r_r – эффективный радиус приемной апертуры;

$\beta(z)$ – показатель аэрозольного рассеяния атмосферы на расстоянии z от лидара;

$\beta_M(z)$ – показатель молекулярного рассеяния атмосферы на расстоянии z от лидара;

z – расстояние от лидара объема атмосферы, от которого в момент времени $t = \frac{2z}{c}$ приходит сигнал на приемник лидара;

$\chi_\pi(z)$ – индикатриса аэрозольного рассеяния «назад» (в сторону приемника лидара);

$\chi_{M\pi}(z)$ – индикатриса молекулярного рассеяния «назад» (в сторону приемника лидара);

$$T_\nu^{1/2}(z) = exp\left(-\int_0^z \varepsilon(x)dx - \int_0^z \kappa(x)dx - \int_0^z \beta_M(x)dx \right)$$

$T_\nu^{1/2}(z)$ - коэффициент пропускания атмосферы на трассе «лидар – объем атмосферы на расстоянии z от лидара»;

$\varepsilon(x)$ – профиль показателя аэрозольного ослабления атмосферы вдоль трассы зондирования (на длине волны излучения лидара);

$\kappa(x)$ – профиль показателя поглощения атмосферными газами вдоль трассы зондирования (на длине волны излучения лидара);

$G(z)$ – геометрическая функция лидара.

Для моностатической биаксиальной схемы зондирования с параллельными оптическими осями источника и приемника лидара геометрическая функция $G(z)$ имеет вид (в гауссовом приближении)

$$G(z) = \frac{\alpha_r^2}{r_r^2 + r_t^2 + z^2(\alpha_r^2 + \alpha_t^2)} \cdot \exp\{-\frac{b^2}{r_r^2 + r_t^2 + (\alpha_r^2 + \alpha_t^2)z^2}\}$$

где

b - база (расстояние между оптическими осями источника и приемника лидара);

$2\alpha_r, 2\alpha_t$ - полное поле зрения приемной оптической системы и полный угол расходимости излучения лидар;

r_t – эффективный радиус передающей апертуры.

Регистрация лазерного сигнала, обратно рассеянного земной атмосферой, проводится на фоне шумов, которые ограничивают возможности лидара. Суммарная мощность шумов определяется собственными шумами приемника лидара и дробовым шумом (который определяется самим регистрируемым сигналом и фоновым излучением).

В качестве фотоприемника для аэрозольных лидаров в УФ спектральном диапазоне, как правило, выбирают фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), т.к. он обладает небольшими собственными шумами и большой чувствительностью. Пороговая мощность ФЭУ определяется формулой [11,12] (формула не учитывает тепловые шумы нагрузочного сопротивления ФЭУ, которые практически не оказывают влияние на величину пороговой мощности в рассматриваемом спектральном диапазоне)

$$P_{\text{пор}} = \frac{\mu[2e(I_t + I_s + I_b)(1+B)\Delta f]^{\frac{1}{2}}}{S_k}, \quad (2)$$

где

μ - заданное отношение сигнал/шум;

$e = 1.6\times10^{-19}$ [А·с] - заряд электрона; (1+B)≅2.5;

Δf – эффективная полоса частот приемного устройства;

S_k – спектральная чувствительность фотокатода;

I_t – темновой ток фотокатода ФЭУ;

I_s - значение тока, обусловленного самим регистрируемым сигналом. $I_s = P(z)S_k$,

I_b - значение тока, обусловленного фоновым излучением.

Для лидара с узким полем зрения и узкополосным спектральным фильтром выражение для I_b имеет вид [13,14]:

$$I_b = K_r L_b S_r (\pi\alpha_r^2) S_k \Delta\lambda, \quad (3)$$

где

L_b - яркость фонового излучения (на длине волны излучения лидара);

S_r - эффективная площадь приемной апертуры;

$\pi\alpha_r^2$ - телесный угол поля зрения приемной системы;

$\Delta\lambda$ - полоса узкополосного спектрального фильтра.

Расчет яркости фонового излучения в земной атмосферой, представляет собой сложную задачу [13,14]. При высокой прозрачности земной атмосферы результаты, довольно близкие к реальным, могут быть получены в приближении однократного рассеяния для плоскопараллельной модели атмосферы. В частном случае зондирования в направлениях близких к горизонтальным в приземном слое атмосферы (например, для задачи контроля характеристик или скорости перемещения аэрозольных неоднородностей в приземном слое атмосферы) величина L_b равна [13]

$$L_b = 0{,}25\lambda_s S_\lambda \chi(\gamma) \frac{\cos\theta_o}{\cos\theta - \cos\theta_o} \{\exp[-\frac{\tau_o}{\cos\theta}] - \exp[-\frac{\tau_o}{\cos\theta_o}]\}, \quad (4)$$

где

$\cos\gamma = \cos\theta\cos\theta_o + \sin\theta\sin\theta_o\cos(\varphi - \varphi_o)$;

λ_S - отношение показателя рассеяния аэрозольной атмосферы к показателю ослабления. Для УФ спектрального диапазона $\lambda_S \cong 1$;

$\chi(\gamma)$ - индикатриса рассеяния атмосферы (γ - угол рассеяния);

πS_λ - спектральная солнечная постоянная на длине волны излучения лидара;

τ_o - оптическая толща всей земной атмосферы (в вертикальном направлении) на длине волны излучения лидара;

θ, φ - зенитный угол и азимут направления зондирования;

θ_o, φ_o - зенитный угол и азимут Солнца.

При расчете по формуле (4) для УФ диапазона оптическая толща τ_o состоит из суммы аэрозольной и молекулярной толщи атмосферы и оптической толщи поглощения атмосферного озона, а индикатриса $\chi(\gamma)$ рассеяния атмосферы определяется взвешенной суммой аэрозольной и молекулярной индикатрис рассеяния атмосферы [15].

Приведенные формулы (1) – (4) могут быть использованы для задачи энергетического расчета аэрозольного лидара в ближнем УФ спектральном диапазоне.

Конкретная формулировка такой задачи может быть различна.

Для оценки некоторого ключевого для разработчика параметра можно приравнять формулы (1) и (2) (при заданном в формуле (2) разработчиком отношении сигнал/шум) и найти оценку этого ключевого параметра при заданных остальных параметров источника излучения и приемника лидара и заданных характеристиках земной атмосферы. Таким ключевым параметром может быть:

- дальность зондирования (при заданных параметров источника и приемника лидара);
- энергия излучения в импульсе лазера (при заданной дальности зондировании и остальных параметров источника и приемника лидара);
- площадь приемного объектива (при заданной дальности зондировании, энергии излучения в импульсе лазера и остальных параметров источника и приемника лидара) и т.п.

Формулы (1) и (2) позволяют также провести оценку отношения сигнал/шум вдоль трассы зондирования (если в формуле (2) положить μ=1, то из нее получается выражение для мощности дробовых шумов).

При любой формулировке задачи энергетического расчета аэрозольного лидара необходимо корректно задать характеристики земной атмосферы в ближнем УФ спектральном диапазоне.

2. Характеристики земной атмосферы в ближнем УФ спектральном диапазоне

В ближнем УФ спектральном диапазоне ослабление излучения в земной атмосфере вызвано молекулярным рассеянием, поглощением озона и аэрозольным рассеянием. Приведем значения оптических характеристик атмосферы на наиболее перспективной для практических приложений длине волны зондирования в ближнем УФ спектральном диапазоне 0,355 мкм.

Молекулярное рассеяние в земной атмосфере хорошо изучено. В приземном слое атмосферы показатель молекулярного рассеяния $\beta_M(\lambda)$ равен [15]:

$$\beta_M(\lambda) = \beta_M(\lambda = 0{,}5 \quad \text{mkm})\left[\frac{0{,}5}{\lambda}\right]^4.$$

Здесь длина волны λ задана в микрометрах. На длине волны 0,355 мкм β_M=6,86·10^{-2} км$^{-1}$.

Основной вклад в молекулярное поглощение в ближнем УФ спектральном диапазоне дает озон. Рис. 1 [15] показывает зависимость суммарного показателя ослабления атмосферы в спектральном диапазоне 0,2 – 0,55 мкм из-за молекулярного рассеяния и поглощения ($\alpha = k + \beta_M$) в приземной чистой атмосфере при метеорологической дальности видимости 100 км (практически в отсутствие аэрозольного рассеяния).

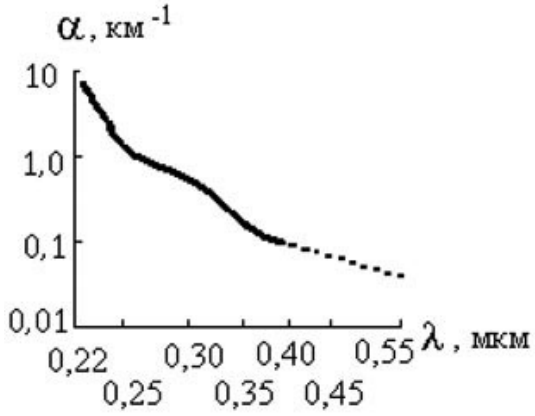


Рисунок 1.
Зависимость суммарного показателя ослабления атмосферы из-за молекулярного рассеяния и поглощения

Значение суммарного показателя ослабления атмосферы из-за молекулярного рассеяния и поглощения на длине волны 0,355 мкм равно $\alpha = 2 \cdot 10^{-1}$ км$^{-1}$.

Основным фактором, влияющим на рассеяние лазерного излучения в земной атмосфере на длине волн 0,355 мкм, является атмосферный аэрозоль.

Для оценки показателей аэрозольного ослабления и рассеяния для длины волны 0,355 мкм воспользуемся имеющимися в научно-технической литературе численными моделями оптических свойств атмосферы.

Значение показателя аэрозольного ослабления ε и показателя рассеяния «назад» $\beta_\pi = \beta\chi_\pi$ в приземном слое атмосферы на длине волны 0,355 мкм приведены в таблице 1 для трех моделей атмосферы. В таблице 1 приведены данные для модели континентального аэрозоля [16] (эта модель соответствует оптическому состоянию атмосферы с

метеорологической дальностью видимости ~ 15 км), для среднециклической модели аэрозоля [17] (эта модель соответствует оптическому состоянию атмосферы с метеорологической дальностью видимости ~ 35 км) и для фоновой модели аэрозоля [17] (эта модель соответствует оптическому состоянию атмосферы с метеорологической дальностью видимости ~ 60 км).

Спектральная солнечная постоянная на длине волны 0,355 мкм равна 0,116 Вт/см^2, оптическая толща земной атмосферы τ_O=0,92 (они используются при расчете спектральной яркости фонового излучения) [15].

3. Оценка отношения сигнал/шум для аэрозольного лидара на длине волны зондирования 0,355 мкм

Расчет отношения сигнал/шум проводился для лидара, у которого фотодетектором являлся модуль ФЭУ Н10721-210 [18] (со спектральной катодной чувствительностью S_k на длине волны 0,355 мкм – 100 мА/Вт. Δf =312,5 МГц. I_t =1 нА). Спектральная ширина фильтра приемной системы $\Delta\lambda$ полагалась 1,3 нм.

Расчет яркости фонового излучения проводился для безоблачной земной атмосферы при зенитном угле Солнца 45°, $\varphi = \varphi_o$. Трасса зондирования считалась горизонтальной, схема зондирования – моностатическая коаксиальная. Угол поля зрения приемной оптической системы полагался равным 2 мрад, диаметр приемного объектива - 0,3 м, коэффициент пропускания приемной оптической системы - 0,64, коэффициент пропускания передающей оптической системы - 0,95, энергия лазера в импульсе - 10 мДж, длительность импульса -10 нс, угол расходимости излучения лазера - 2 мрад.

Результаты расчетов отношения сигнал/шум μ от расстояния z (от лазерного локатора до рассеивающего объема атмосферы) вдоль трассы зондирования представлены на рис.2 для модели континентального аэрозоля.

На рисунке кривая 1 - это результаты расчетов при учете всех шумов, 2 - при учете всех шумов, но без дробового шума, вызванного самим лидарным сигналом; 3 - при учете всех шумов, но без дробового шума, вызванного фоновым (из-за рассеяния солнечного света на атмосферном аэрозоле) излучением.

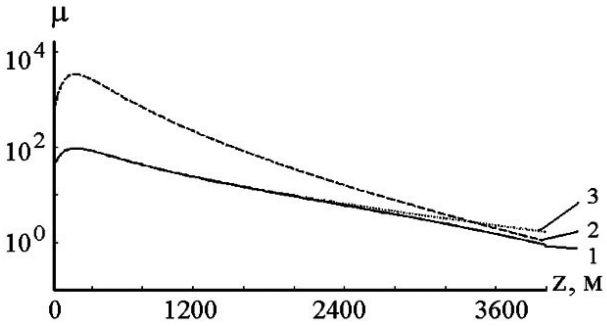


Рисунок 2.
Зависимость отношения сигнал/шум от расстояния z

Из рис. 2 видно, что на близких расстояниях z от лидара (меньших 3 км) основной составляющей шума (определяющей отношение сигнал/шум для лидара) является дробовой шум, вызванный самим лидарным сигналом. Однако, на расстояниях от лидара больших 4 км основной составляющей шума становится дробовой шум, вызванный фоновым излучением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статья посвящена энергетическому расчету аэрозольного лидара в ближнем УФ спектральном диапазоне. Приведены основные формулы, используемые для расчета энергетических характеристик аэрозольного ли-

Таблица 1. Показатели аэрозольного ослабления и рассеяния «назад»

λ, мкм	Показатель ослабления, км$^{-1}$	Показатель рассеяния «назад», км$^{-1}$
модель континентального аэрозоля	0,337	$7{,}69\ 10^{-3}$
среднециклическая модель аэрозоля	0,13	$1{,}11\ 10^{-3}$
фоновая модель аэрозоля	0,077	$5{,}1\ 10^{-4}$

дара и характеристики земной атмосферы в ближнем УФ спектральном диапазоне. Проведена оценка отношения сигнал/шум для аэрозольного лидара на длине волны зондирования 0,355 мкм. Показано, что на расстояниях от лидара меньших 3 км основной составляющей шума (определяющей отношение сигнал/шум) является дробовой шум, вызванный самим лидарным сигналом. Однако, на расстояниях от лидара больших 4 км основной составляющей шума становится дробовой шум, вызванный фоновым излучением.

Список литературы:

1. Аэрозольный лидар CATS. Режим доступа: http://www.laserportal.ru/content_956 (дата обращения 20.12.2016).

2. Лазерное зондирование атмосферы. Режим доступа: http://astro.bsu.edu.ru/lidar.htm (дата обращения 20.12.2016).

3. *Бурлаков В. Д., Долгий С. И., Невзоров А. В.* Трехчастотный лидар для зондирования микроструктурных характеристик стратосферного аэрозоля // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 6. С. 125–130.

4. *Алексеев В.А., Ляш А.Н., Першин С.М.* Лидарный мониторинг тектонической активности в Тамани по выбросам аэрозолей. Отработка метода. Режим доступа: http://www.iki.rssi.ru/earth/trudi/v-06.pdf (дата обращения 20.12.2016).

5. *Волков Н.Н.* Выбор параметров многоволнового аэрозольного лидара для дистанционного зондирования атмосферы. Отработка метода. // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, 2012, № 1 (77), С. 7-9.

6. Лазерные лидарные комплексы. Режим доступа: http://www.adventspb.ru/science/6/ (дата обращения 20.12.2016).

7. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра / Г.Г. Матвиенко, Г.О. Заде, Э.С. Фердинандов, И.Н. Колев, Р.П. Аврамова. Новосибирск: Наука, 1985. 223 с.

8. Применение корреляционных методов в атмосферной оптике/ В.М. Орлов, Г.Г. Матвиенко, И.В. Самохвалов, Н.И. Юрга, М.Л. Белов, А.Ф. Овчаренко. Новосибирск: Наука, 1983. 160 с.

9. *Козинцев В. И., Иванов С. Е., Белов М. Л., Городничев В. А*. Корреляционный лазерный метод с адаптивным выбором измерительной базы для оперативного измерения скорости ветра // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т.25. №2. С. 165-170.

10. *А.П. Филимонов, С.Е. Иванов, М.Л. Белов, В.А. Городничев.* Анализ зависимости зоны засветки приемника от параметров атмосферы и лазерного локатора в УФ спектральном диапазоне. Электронное научно-техническое издание “Наука и образование”. № 9, сентябрь 2016. http://technomag.neicon.ru/doc/845030.html / (дата обращения 20.12.2016).

11. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды / В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов, В.А. Городничев, Б.В.Стрелков. М.: Изд-во МГТУ, 2002. 528 с.

12. *Measures R.M.* Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications. Krieger Publishing Company, Melbourne, FL, United States, 1992. p. 524.

13. Основы импульсной лазерной локации / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов, В.А. Городничев, Б.В.Стрелков. М.: Изд-во МГТУ, 2010. Издание 2-е дополненное. 572 с.

14. Сигналы и помехи в лазерной локации / В.М.Орлов, И.В.Самохвалов, Г.М.Креков, В.Л. Миронов, Ю.С. Балин, В.А. Банах, М.Л. Белов, Ю.Д. Копытин, В.П. Лукин. М.: Радио и связь,1985. 264 с.

15. *Козинцев В.И., Белов М.Л., Городничев В.А., Стрелков Б.В*. Расчет яркости фона и ослабления лазерного излучения в ультрафиолетовой области спектра. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 66 с.

16. З*уев В.Е., Креков Г.М*. Оптические модели атмосферы. Ленинград: Гидрометеоиздат. 1986. 256 с.

17. *Креков Г.М., Рахимов Р.Ф*. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука. 1982. 198 с.

18. Photosensor modules H10720/H10721 series. Режим доступа: http://www.hamamatsu.com/eu/en/product/alpha/C/3044/H10721-210/index.html (дата обращения 20.12.2016).

УДК 504.064.36

российский индекс научного цитирования Science Index

ДВУХСПЕКТРАЛЬНЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

БЕЛОВ М.Л., ФЕСЕНКО Ю.С., ГОРОДНИЧЕВ В.А., НАЗАРОВ В.В.

НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

E-mail: gorod@bmstu.ru, ekomonit@bmstu.ru, belov@bmstu.ru

Рассмотрен двухспектральный рефлектометрический лазерный метод контроля состояния растительного покрова по данным измерений коэффициентов отражения. Проведено обоснование выбора двух длин волн лазерного зондирования в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Двухспектральный рефлектометрический лазерный метод представляет практический интерес для создания системы мониторинга растительности, которая может работать в широком диапазоне погодных условий независимо от времени суток при больших высотах полета носителя.

Ключевые слова: лазер, дистанционное зондирование, растительный покров, коэффициенты отражения.

TWO-WAVE REFLECTIVE LASER METHOD OF VEGETATION MONITORING

M.L. BELOV, YU.S. FESENKO, V.A. GORODNICHEV, V.V. NAZAROV

Radioelectronics and Laser Technology Research Institute of Moscow State Technical University n.a. Bauman

E-mail: gorod@bmstu.ru, ekomonit@bmstu.ru, belov@bmstu.ru

Two-wave reflective laser method of vegetation cover monitoring using reflection coefficients measurement data is considered. Rationale for choosing of two laser sounding wavelengths in visible and near IR spectral bands is formed. Two-wave reflective laser method is of main interest for vegetation monitoring system implementation which may work under a wide range of weather conditions the time of day notwithstanding at high altitude of delivery aircraft.

Keywords: laser, remote sensing, vegetation cover, reflection coefficients.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день лазерные оптико-электронные системы используются для решения многих практически важных задач - дальнометрии, связи, наведения, видения, дистанционного мониторинга и др. [1-3].

Перспективным направлением лазерного мониторинга является контроль состояния растительного покрова. Отсутствие или избыток влаги, болезни, неблагоприятные внешние факторы и т.п. приводят к невозможности нормального развития растений (к стрессовым состояниям растений). Поэтому разработка методов дистанционного контроля состояния растительности является в настоящее время актуальной.

Эффективным методом лазерного мониторинга состояния растительности является лазерный флуоресцентный метод [4-6]. Однако, недостатком лазерного флуоресцентного метода является небольшая (из-за небольшой величины сечения флуоресценции) дальность зондирования - порядка 100-150 м.

Одним из вариантов лазерной аппаратуры, позволяющей контролировать состояние растительности на большом расстоянии, является лазерная система, которая проводит мониторинг коэффициентов отражения растительного покрова.

Статья посвящена оценке возможности дистанционного зондирования состояния растительного покрова по данным измерений коэффициентов отражения. Такая задача представляет практический интерес для создания системы мониторинга растительности, которая может работать в широком диапазоне погодных условий независимо от времени суток при больших высотах полета носителя.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На отражательные спектральные характеристики растительного покрова оказывают сильное влияние вегетативный период развития, температура, болезни растений, солнечная радиация, тип почвы и ее загрязнения и т.п. [7].

Спектральные особенности коэффициента отражения растений в наибольшей степени проявляются в спектральной области перехода от видимого к ближнему инфракрасному диапазону. Для спектральной зависимости коэффициента отражения растений в неблагоприятных ситуациях характерно резкое падение коэффициента отражения в ближнем инфракрасном диапазоне [7].

Примеры спектров отражения разных видов растительности (как в нормальном состоянии в различные периоды вегетации, так и в стрессовом состоянии, вызванном болезнью растений) приведены на рисунках 1-4 [8].

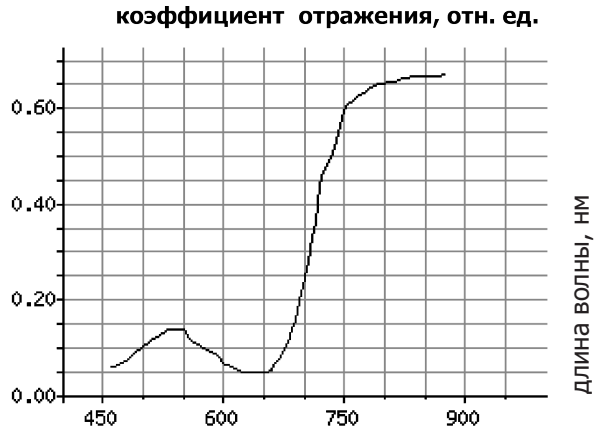


Рисунок 1.
Спектр отражения здоровых листьев огурца

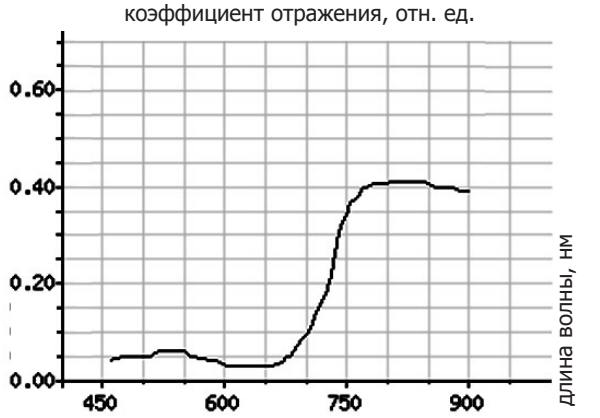


Рисунок 2.
Спектр отражения листьев огурца, поврежденных ложномучнистой росой

Здоровые растения имеют максимум спектральной отражательной способности в зеленой (0,52-0,58 мкм) области спектра, что объясняет зеленый цвет растений. Величина этого максимума спектральной отражательной способности зависит от концентрации фотосинтезирующих пигментов растений.

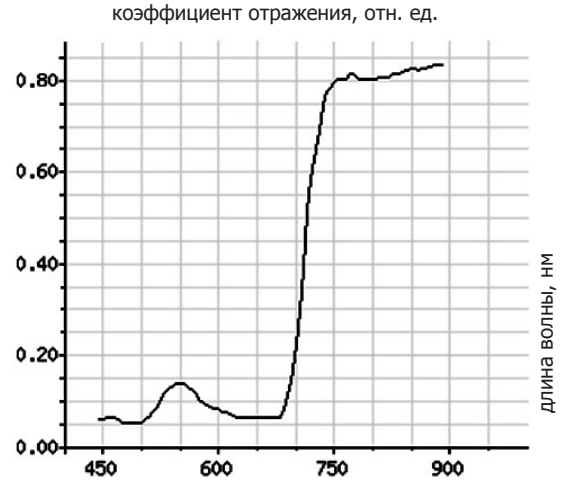


Рисунок 3.

Спектр отражения зеленых листьев бука

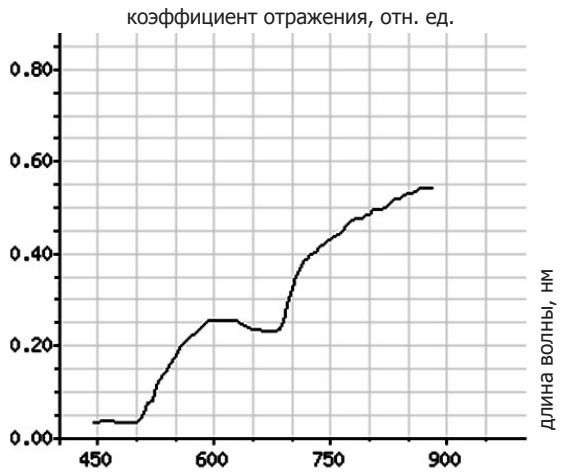


Рисунок 4.

Спектр отражения оранжевых листьев бука

В ближнем инфракрасном спектральном диапазоне (для длин волн более 0,75 мкм) значение спектральной отражательной способности растительности достигает максимальной величины.

Стрессовые ситуации (вызванные неблагоприятными условиями) и изменения периода вегетации растений приводят к изменению спектра отражения: исчезает или сглаживается максимум в зеленой спектральной области (растения перестают быть зелеными); спектральная зависимость коэффициента отражения имеет более плавный вид; «перепад» спектральной отражательной способности при переходе от красной спектральной области к ближней ИК спектральной области заметно уменьшается.

Изменение спектральной отражательной способности растительности, находящейся в неблагоприятных (для развития растений) ситуациях, является физической основой дистанционного рефлектометрического лазерного метода контроля состояния растительности.

Наиболее интересным для практических приложений вариантом лазерной аппаратуры, позволяющей дистанционно контролировать состояние растительного покрова, является лазерная система, которая проводит зондирование коэффициентов отражения растительности всего на двух длинах волн.

В статье проводится обоснование выбора длин волн зондирования для двухспектрального рефлектометрического лазерного метода контроля состояния растительного покрова.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ДЛИН ВОЛН ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ДВУХСПЕКТРАЛЬНОГО РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКОГО ЛАЗЕРНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Анализ спектров отражения разных видов растительности [8] (примеры которых приведены на рис. 1-4) показывает, контроль состояния растительности можно проводить использую две длины волны излучения: одну в зеленой области спектра (0,52-0,58 мкм) и другую - в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне (0,8…0,9 мкм).

В этих спектральных областях земная атмосфера характеризуется высокой прозрачностью (см. рисунок 5 [9]).

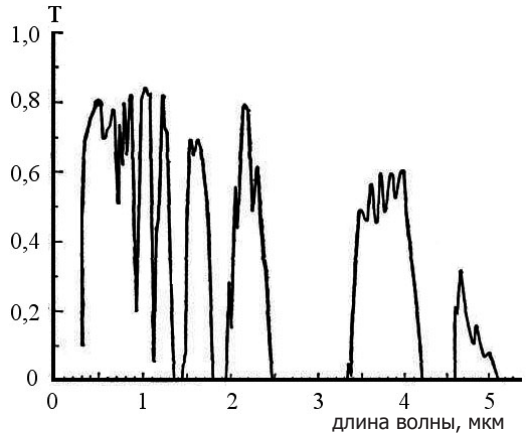


Рисунок 5.

Спектральная прозрачность земной атмосферы

В качестве лазерных источников с короткими импульсами и большой энергией в импульсе в зеленой области спектра может быть взят ИАГ-лазер с удвоением частоты и длиной волны 0,532 мкм, а в ближней инфракрасной области спектра – например, лазер на сапфире с титаном с длиной волны в диапазоне 0,8…0,9 мкм.

Количественные данные о высотном ходе коэффициентов ослабления земной атмосферы на длинах волн 0,53 и 0,86 мкм приведены в таблицах 1 – 4.

В таблице 1 приведены данные о высотном ходе в тропосфере коэффициента ослабления аэрозольной атмосферы для фоновой и среднециклической моделей атмосферы [10].

В таблицах 2-4 приведены данные о высотном ходе в тропосфере коэффициента молекулярного рассеяния атмосферы для разных сезонов и разных регионов [10,11]. Молекулярное поглощение на обеих длинах волн существенно меньше молекулярного рассеяния.

Данные, приведенные в таблицах, показывают, что на длинах волн 0,53 и 0,86 мкм основным фактором ослабления лазерного излучения в атмосфере является аэрозольное рассеяние. При этом для зондирования с высоты 1 км пропускание атмосферы на обеих длинах волн будет больше 0,9.

Возьмем отношение $R_{0,53/0,86}$ интенсивностей отраженного излучения на двух длинах волн 0,53 и 0,86 мкм в качестве идентифицирующего признака (растение в нормальной или неблагоприятной (для развития растений) ситуациях). Пример результатов расчета отношение $R_{0,53/0,86}$ по экспериментальным данным показан на рис. 6.

Таблица 1.
Коэффициент ослабления аэрозольной атмосферы [км$^{-1}$]

h, км	Фоновая модель атмосферы		Среднециклическая модель атмосферы	
	0,53 мкм	0,86 мкм	0,53 мкм	0,86 мкм
0,0	$6{,}92\ 10^{-2}$	$5{,}87\ 10^{-2}$	$1{,}08\ 10^{-1}$	$7{,}73\ 10^{-2}$
1,0	$2{,}77\ 10^{-2}$	$2{,}07\ 10^{-2}$	$5{,}88\ 10^{-2}$	$3{,}75\ 10^{-2}$
2,0	$1{,}03\ 10^{-2}$	$8{,}02\ 10^{-3}$	$2{,}28\ 10^{-2}$	$1{,}07\ 10^{-2}$
3,0	$4{,}69\ 10^{-3}$	$4{,}08\ 10^{-3}$	$9{,}27\ 10^{-3}$	$8{,}22\ 10^{-3}$
4,0	$9{,}36\ 10^{-4}$	$8{,}56\ 10^{-4}$	$9{,}68\ 10^{-4}$	$8{,}77\ 10^{-4}$
5,0	$3{,}80\ 10^{-4}$	$3{,}06\ 10^{-4}$	$3{,}96\ 10^{-4}$	$3{,}17\ 10^{-4}$

Таблица 2.
Коэффициенты молекулярного рассеяния [км$^{-1}$]. Тропическая атмосфера

Высота, км	λ =0,53 мкм	λ =0,86 мкм
0	$1{,}47\ 10^{-2}$	$1{,}89\ 10^{-3}$
0-1	$1{,}40\ 10^{-2}$	$1{,}81\ 10^{-3}$
1-2	$1{,}28\ 10^{-2}$	$1{,}64\ 10^{-3}$
2-3	$1{,}15\ 10^{-2}$	$1{,}49\ 10^{-3}$
3-4	$1{,}04\ 10^{-2}$	$1{,}34\ 10^{-3}$
4-5	$9{,}46\ 10^{-3}$	$1{,}22\ 10^{-3}$

Таблица 3.
Коэффициенты молекулярного рассеяния β_{sm} [км$^{-1}$]. Средние широты

Высота, км	λ =0,53 мкм	λ =0,86 мкм	λ =0,53 мкм	λ =0,86 мкм
	лето		зима	
0	$1{,}50\ 10^{-2}$	$1{,}93\ 10^{-3}$	$1{,}63\ 10^{-2}$	$2{,}09\ 10^{-3}$
0-1	$1{,}43\ 10^{-2}$	$1{,}84\ 10^{-3}$	$1{,}54\ 10^{-2}$	$1{,}98\ 10^{-3}$
1-2	$1{,}29\ 10^{-2}$	$1{,}66\ 10^{-3}$	$1{,}37\ 10^{-2}$	$1{,}77\ 10^{-3}$
2-3	$1{,}16\ 10^{-2}$	$1{,}50\ 10^{-3}$	$1{,}22\ 10^{-2}$	$1{,}58\ 10^{-3}$
3-4	$1{,}05\ 10^{-2}$	$1{,}36\ 10^{-3}$	$1{,}09\ 10^{-2}$	$1{,}41\ 10^{-3}$
4-5	$9{,}51\ 10^{-3}$	$1{,}22\ 10^{-3}$	$9{,}79\ 10^{-2}$	$1{,}28\ 10^{-3}$

Таблица 4.

Коэффициенты молекулярного рассеяния [км$^{-1}$]. Субарктические широты

Высота, км	λ =0,53 мкм	λ =0,86 мкм	λ =0,53 мкм	λ =0,86 мкм
	лето		зима	
0	$1{,}53\ 10^{-2}$	$1{,}97\ 10^{-3}$	$1{,}71\ 10^{-2}$	$2{,}21\ 10^{-3}$
0-1	$1{,}46\ 10^{-2}$	$1{,}87\ 10^{-3}$	$1{,}60\ 10^{-2}$	$2{,}06\ 10^{-3}$
1-2	$1{,}32\ 10^{-2}$	$1{,}69\ 10^{-3}$	$1{,}41\ 10^{-2}$	$1{,}81\ 10^{-3}$
2-3	$1{,}15\ 10^{-2}$	$1{,}53\ 10^{-3}$	$1{,}25\ 10^{-2}$	$1{,}60\ 10^{-3}$
3-4	$1{,}06\ 10^{-2}$	$1{,}37\ 10^{-3}$	$1{,}10\ 10^{-2}$	$1{,}42\ 10^{-3}$
4-5	$9{,}55\ 10^{-3}$	$1{,}23\ 10^{-3}$	$9{,}86\ 10^{-3}$	$1{,}27\ 10^{-3}$

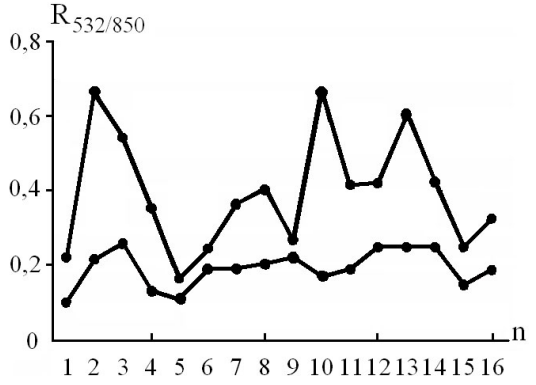


Рисунок 6.

Значения идентифицирующего признака для здоровых растений и растений, находящихся в стрессовом состоянии

Верхняя кривая на рис. 6 относится к растениям, находящимся в разных неблагоприятных ситуациях (в стрессовых состояниях) или растениям с желтыми листьями (по оси абсцисс отложен n - номер спектра в таблице 5). Нижняя кривая на рисунке 6 относится к соответствующим здоровым растениям с зелеными листьями.

Из рис. 6 видно, что значения идентифицирующего признака для здоровых растений с зелеными листьями всегда меньше, чем значения идентифицирующего признака для растений, находящихся в стрессовых состояниях, или для растений с желтыми листьями.

Таким образом, анализ идентифицирующего признака (растение в нормальной или неблагоприятной ситуациях) $R_{0,53/0,86}$ может быть положен в основу двухспектрального рефлектометрического лазерного метода контроля состояния растительного покрова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен двухспектральный рефлектометрический лазерный метод контроля состояния растительного покрова по данным измерений коэффициентов отражения. Про-

Таблица 5.

Описание растений для верхней кривой рисунка 6

1	Желто-зеленые листья ясеня
2	Желтые листья дубы
3	Желтые листья яблони
4	Желтые листья явора
5	Листья карагача, пораженные черню
6	Листья картофеля, пораженные поврежденные грибом Phytophtora infestas D. B.
7	Листья картофеля, пораженные пораженные фитофторой
8	Листья огурца, поврежденные ложномучнистой росой
9	Листья тополя, поврежденные ржавчиной
10	Желтые листья осины
11	Желтые листья березы
12	Листья фасоли через 14 дней после нефтяного (diesel engine oil) загрязнения почвы
13	Листья фасоли через 14 дней через после как нефтяного загрязнения, так и затопления почвы
14	Листья фасоли через 14 дней через после затопления почвы
15	Желто-оранжевые листья бука
16	Сосна лучистая при дефиците азота в почве

ведено обоснование выбора двух длин волн лазерного зондирования в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Двухспектральный рефлектометрический лазерный метод представляет практический интерес для создания системы мониторинга растительности, которая может работать в широком диапазоне погодных условий независимо от времени суток при больших высотах полета носителя.

Список литературы:

1. *Карасик В.Е., Орлов В.М.* Лазерные системы видения. М.: МГТУ, 2013. 478 с.

2. *Козинцев В.И., Белов М.Л., Орлов В.М., Городничев В.А., Стрелков Б.В.* Основы импульсной лазерной локации. М.: МГТУ, 2010. Издание 2-е дополненное. 572 с.

3. *Привалов В.Е., Фотиади А.Э., Шеманин В.Г.* Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. СПб.; М.: Изд-во Лань, 2013. 288 с.

4. *Yanga J., Gonga W., Shia S., Dua L., Suna J., Songe S.* Laser-induced fluorescence characteristics of vegetation by a new excitation wavelength // Spectroscopy letters. 2016. V. 49, N 4, P. 263–267.

5. *Hedimbi1 M., Singh S., Kent A*. Laser induced fluorescence study on the growth of maize plants // Natural Science. 2012. V.4, N 6. P. 395-401.

6. *Федотов Ю.В., Булло О.А., Белов М.Л., Городничев В.А.* Экспериментальное исследование лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений для стрессовых состояний, вызванных неправильным режимом полива // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 4. Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/707937.html (дата обращения 05.06.2016).

7. *Токарева О.С.* Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли. Томск: Изд-во ТГУ, 2010.148 с.

8. USGS Digital Spectral Library 06.

Режим доступа: http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06 (дата обращения 05.08.2016).

9. Прозрачность земной атмосферы. Режим доступа: http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/4375/%D0%9F%D0%A0%D0%9E%D0%97%D0%A0%D0%90%D0%A7%D0%9D%D0%9E%D0%A1%D0%A2%D0%AC (дата обращения 05.08.2016)

10. *Зуев В.Е., Креков Г.М.* Оптические модели атмосферы. Ленинград: Гидрометеоиздат. 1986. 256 с.

11. *R.A. McClatchey, R.W. Fenn, J.E.A. Selby, F.E. Volz, J.S. Garing.* Optical Properties of the Atmosphere (Third Edition). Режим доступа: http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0753075 (дата обращения 05.08.2016).

УДК 621.373.8

О ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ ЗЕЕМАНОВСКИХ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ

АЗАРОВА В.В., МАКЕЕВ А.П., КУЗНЕЦОВ Е.В., ГОЛЯЕВ Ю.Д.

АО НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха

E-mail: azarova_v_v@mail.ru

Проведено изучение частотной характеристики Зеемановского лазерного гироскопа путем численного моделирования с использованием фазового уравнения. Результаты расчетов сопоставлены с результатами экспериментальных измерений на прецизионном динамическом стенде. Численно получена и экспериментально подтверждена количественная зависимость искажений частотной характеристики от величины статической зоны захвата, а также от амплитуды и частоты подставки в форме меандра. Проведенные исследования позволяют оптимизировать параметры частотной подставки с целью повышения точности измерений с помощью лазерных гироскопов.

Ключевые слова: Зеемановский лазерный гироскоп, захват частот встречных волн гироскопа, частотная подставка лазерного гироскопа.

ON THE FREQUENCY CHARACTERISTIC OF ZEEMAN LASER GYROS

AZAROVA V.V., MAKEEV A.P., KUZNETSOV E.V., GOLYAEV YU.D.

R&D Institute «Polyus» named M. F. Stelmakh

E-mail: azarova_v_v@mail.ru

The study of frequency characteristics of a Zeeman laser gyro was held by means of numerical simulations using the phase equations. The results of calculations were compared with results of experimental measurements by means of the precision dynamic booth. It's obtained numerically, and confirmed experimentally the quantitative dependence of the distortion of the frequency characteristic of the value of the static locking range, and the amplitude and frequency of the biasing in the form of a meander. The conducted research allows optimizing the parameters of the frequency of the biasing with the aim of improving the accuracy of measurements by means of the laser gyros

Keywords: Zeeman laser gyro, locking of the opposing waves of a gyroscope, a frequency biasing of a laser gyro.

ВВЕДЕНИЕ

Лазерные гироскопы представляют значительный интерес благодаря широкому спектру применений в различных областях науки и техники. [см. напр.1-3]. В этой связи исследование их свойств представляет значительный научный и практический интерес. Одним из основных свойств гироскопа является способность измерять углы поворота и угловые скорости вращения. Очевидно, что степень точности измерения для различных скоростей вращения является одной из ключевых характеристик гироскопа и ее исследование является актуальной задачей. Подобная проблема ранее рассматривалась в ряде работ, и были выявлены некоторые закономерности выходного сигнала гироскопа при изменении величины измеряемой скорости вращения [4-10]. Однако эти исследования носили приближенный характер в силу сложности прямого аналитического решения уравнения лазерного гироскопа и отсутствия высокоточных динамических стендов для экспериментальных измерений. В последний период благодаря появлению высокопроизводительных компьютеров и высокоточных динамических стендов появились возможности прямого решения уравнения лазерного гироскопа методами численного моделирования и проведения с хорошей точностью экспериментальных измерений выходных частотных характеристик лазерных гироскопов в широком диапазоне угловых скоростей вращения.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Динамика одномодового (двухволнового) лазерного гироскопа с He-Ne газовой смесью описывается системой трех дифференциальных уравнений первого порядка - системой укороченных уравнений для медленно меняющихся интенсивностей и разности фаз, встречно распространяющихся волн [5]. Эти уравнения связаны, но при определенных допущениях, в частности, при пренебрежении незначительной амплитудной модуляцией интенсивностей, допустимо, считать фазовое уравнение независимым.

Такое допущение вводится даже в том случае, когда знакопеременная подставка рассматриваемого лазерного гироскопа имеет значительную амплитуду. В данной работе фазовое уравнение рассматривается как независимое.

$$\frac{d\Phi}{dt} = \Omega + F(\Omega_n, w_n, t) + \Omega_L \sin\Phi = \upsilon \quad (1)$$

где Ω – частота невзаимности резонатора, пропорциональная угловой скорости вращения кольцевого лазера, Ω_L – порог зоны захвата, F- функция формы подставки, зависящая от амплитуды подставки - $\Omega_П$ и частоты переключения подставки - $w_п$.

При использовании любой периодической частотной подставки фазовое уравнение есть нелинейное уравнение первого порядка, правая часть которого периодична как по времени, так и относительно искомой функции Ф. Для численного решения данного дифференциального уравнения использовался метод Рунге-Кутты. Уравнение (1) можно представить в следующем виде:

$$\Phi' = f(t,\Phi) \quad (2)$$

В качестве начальных условий возьмем: $\Phi_0=0$, $t_0=0$. Ω, Ω_n, w_n, Ω_L – константы. Приближенное значение в последующих точках будет вычисляться по формуле:

$$\Phi_{n+1} = \Phi_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3)$$

Где

$$k_1 = dt \cdot f(t_n, \Phi_n) \quad (4)$$

$$k_2 = dt \cdot f(t_n + \frac{dt}{2}, \Phi_n + \frac{k_1}{2}) \quad (5)$$

$$k_3 = dt \cdot f(t_n + \frac{dt}{2}, \Phi_n + \frac{k_2}{2}) \quad (6)$$

$$k_4 = dt \cdot f(t_n + dt, \Phi_n + k_3) \quad (7)$$

Шаг интегрирования составлял $dt=10^{-7}$ сек. Когда t становится больше 3/wп (время 3-х полных периодов подставки), в формуле (1) значение увеличивается на 10 Гц, начальные условия выбираются $\Phi_0 = \Phi_n$, $t_0 = t_n$ и вычисления повторяются. На каждом шаге частота биений вычислялась по формуле

$$\upsilon_n = \frac{1}{2\pi}\frac{\Phi_n - \Phi_0}{t_n - t_0} \quad (8)$$

где Φ_n - набег фазы для 3 периодов подставки, Φ_0 - набег фазы на предыдущем шаге, $t_n - t_0$ – 3 периода подставки. Таким образом строится частотная характеристика кольцевого лазера от $\Omega_{\text{начальная}}$ до $\Omega_{\text{конечная}}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ

Экспериментальные исследования частотной характеристики, ширин статических и динамических зон захвата в настоящей работе проводились на зеемановских лазерных гироскопах типа ЗЛК [11]. В кольцевом лазере, на активную газовую He-Ne среду которого наложено продольное магнитное поле, генерация осуществлялась на длине волны 632,8 нм на одной продольной моде. Из-за неплоского контура кольцевого резонатора, который используется в лазерах данного типа, встречные волны имеют круговую поляризацию. Пороговые значения статических зон захвата измерялись методом, при котором минимизировано влияние взаимодействия излучения с поверхностями зеркал [12]. При использовании в кольцевом лазере знакопеременной частотной подставки прямоугольной формы ширина динамических зон достигает максимума вблизи амплитуды подставки [8,9,13]. В настоящей работе подробно исследовались особенности частотной характеристики кольцевого лазера, в частности, вблизи амплитуды подставки. Исследовалась связь ширин динамических зон с величиной порога захвата, амплитудой и частотой переключения подставки, а также зависимость их величин от условий измерений. Измерения проводились с помощью высокоточного поворотного стола фирмы Acuitas AG, Швейцария. Диапазон измеряемых скоростей стола 15000 град/с со стабильностью не хуже $5 \cdot 10^{-6}$ от измеряемой скорости. При измерениях стол разгонялся с ускорением 100 град/с^2 до скорости, на 2 град/с меньшей амплитуды подставки. Далее скорость поворота стола плавно с хорошей линейностью, с ускорением 0,01 град/с^2, увеличивалась до значения на 2 град/с превышающего скорость соответствующую амплитуде подставки. За время измерений стол успевал совершить 6 полных оборотов. Показания кольцевого лазера считывались с усреднением 0,25 с. Таким образом, снималась частотная характеристика кольцевого лазера вблизи амплитуды подставки, показанная на рисунке 1.

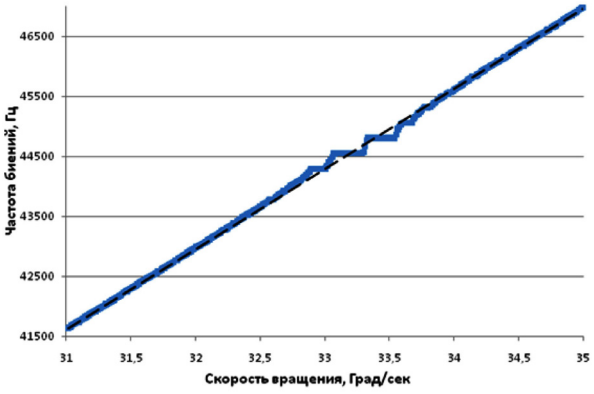


Рисунок 1.
Частотная характеристика кольцевого лазера для скоростей вращения, близких к амплитуде подставки. Пунктирной линией обозначена идеальная частотная характеристика

В организованном таким образом эксперименте лазер находился более 5 с в широких динамических зонах и было отмечено, что при использовании знакопеременной частотной подставки в кольцевом лазере также наблюдается инерционный гистерезисный эффект. А именно, при прохождении динамической зоны на половине периода подставки кольцевой лазер работает в режиме синхронизации, что приводит к увеличению динамических зон. Это проявляется в том, что вход и выход из зоны чувствительности не симметричны относительно линии идеальной частотной характеристики. Для исследования влияния эффекта инерционности, измерения частотной характеристики проводились в два этапа. На первом этапе измерений прописывалась частотная характеристика при увеличении скорости вращения поворотного стола. На втором этапе скорость стола уменьшалась. В обоих случаях стол вращался в одну и ту же сторону, а его скорость изменялась линейно с одинаковым ускорением 0,01 град/с^2. В результате прописывался вход в динамическую зону с обеих сторон, как при увеличении частоты

биений, так и при ее уменьшении, что продемонстрировано на рис. 2. Диапазон измеряемых скоростей 31 - 35 град/с, увеличение и уменьшение скорости (верхняя и нижняя кривые рис. 2, соответственно) проходило с постоянным ускорением 0,01 град/с^2. Сумма максимальных отклонений вблизи частоты подставки приблизительно равна величине зоны статического захвата, что подтверждается значениями, приведенными в Таблице 1. Из таблицы видно, что пороговые значения статических зон захвата четырех последовательных измеренных аксиальных мод резонатора сравнимы с отклонениями частотной характеристики от идеальной вблизи амплитуды подставки на соответствующих модах генерации.

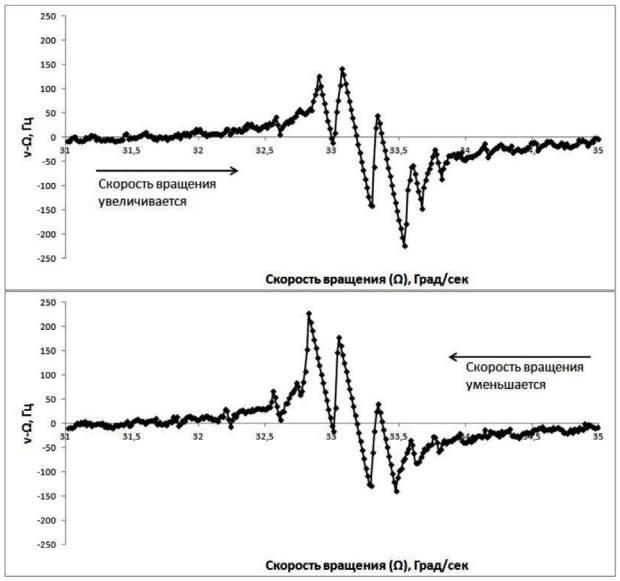


Рисунок 2.
Вид частотной характеристики кольцевого лазера (эксперимент) для скоростей вращения, близких к амплитуде подставки

Стрелками показаны увеличение и уменьшение скорости при входе в зону чувствительности.

По оси ординат на рис. 2 отложена разность измеренной частоты биений встречных волн и частоты, соответствующей скорости вращения (1). Ширина зоны захвата для данной моды Ω_L=270 Гц, Амплитуда подставки составляла 44490 Гц, частота переключения подставки 256 Гц. Из полученных экспериментальных данных следует, что отклонение от идеальной частотной характеристики при приближении к частоте подставки, меньше, чем при выходе, т.е. удалении от нее. Это можно объяснить только инерциальным явлением взаимодействия излучения с поверхностями зеркал и соответствующим изменением их рассеивающих свойств.

Также были проведены измерения искажений частотных характеристик при изменении частоты переключения частотной подставки. Экспериментальные результаты приведены на рис. 3.

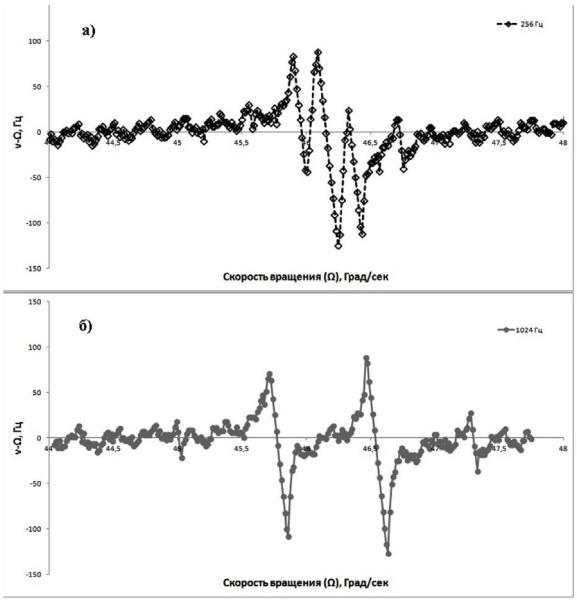


Рисунок 3.
Сравнение экспериментальной частотной характеристики кольцевого лазера при разных значениях частоты переключения подставки. Порог захвата Ω_L = 180 Гц.
а) Пунктиром обозначены результаты для подставки, амплитуда которой равна 61775 Гц, частота переключения – 256 Гц.
б) Сплошной линией обозначены результаты для подставки, амплитуда которой равна 61318 Гц, частота переключения – 1024 Гц.
Скорость вращения в обоих случаях увеличивалась

Анализируя экспериментальные данные, приведенные на рис. 3 (а и б), можно сделать следующие выводы:

- расстояние между динамическими зонами равно частоте переключения подставки;
- максимальное отклонение частотной характеристики вблизи амплитуды подставки в

Таблица 1

Напряжение на пьезокерамиках кольцевого лазера, В	Пороговое значение статической зоны захвата, Ω_L , Гц	Отклонения частотной характеристики от идеальной, Гц
12	268	276
30	450	416
47	266	250
63	271	257

обоих случаях практически одинаково и приблизительно равно пороговому значению захвата Ω_L;

- величина области повышенной чувствительности вблизи значения амплитуды подставки не зависит от частоты переключения подставки.

Также был проведен целый ряд экспериментальных измерений искажения частотных характеристик кольцевых лазеров с неплоским контуром с периметрами 16 см и 20см (ЗЛК-16 и ЗЛК-20, соответственно). Измерения были проведены при разных значениях амплитуды подставки и частоты ее переключения. Используемое оборудование позволяло задавать частоту переключения подставки либо 256 Гц, либо 1024 Гц. Для изменения амплитуды подставки в катушку невзаимного устройства впаивалось дополнительное сопротивление. После включения каждый кольцевой лазер прогревался в течение часа. Измерения проводились на 4-х соседних модах. Для измерения порога зоны захвата, частотная подставка выключалась, и катушка невзаимного устройства подключалась к генератору сигналов специальной формы. Анализируя, полученные в многочисленных экспериментах данные, пришли к выводу, что максимальное отклонение частотной характеристики при входе в зону повышенной чувствительности определяется пороговым значением захвата на данной моде и не зависит ни от амплитуды, ни от частоты переключения подставки.

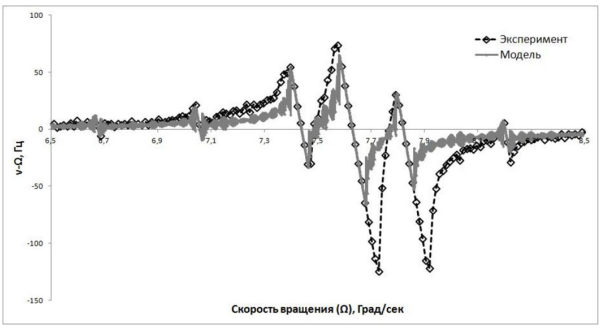
Но при длительном (более 1 с) нахождении в динамических зонах захвата величина искажений увеличивается.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

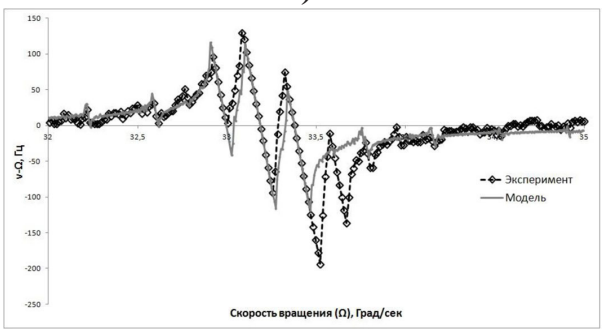
В качестве примера сопоставления результатов измерений и расчетов на рис. 4 (а,б,с,д) приведены данные искажений частотных характеристик кольцевых лазеров при скоростях вращения близких к соответствующим амплитудам подставки.

Из сравнения видно, что расчетные значения достаточно хорошо соответствуют значениям, полученным экспериментально. Отличия можно объяснить инерционностью взаимодействия излучения с поверхностями зеркал, которое не учитывается в модели расчета.

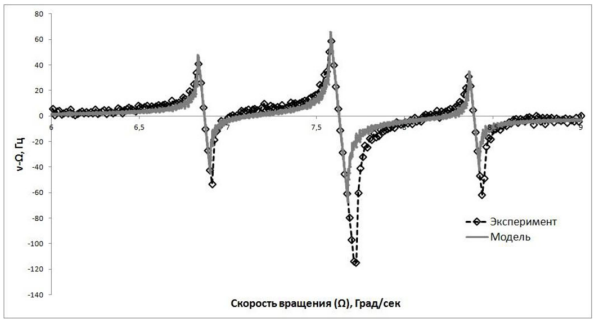
Искажения частотной характеристики описываются и с достаточной степенью достоверности определяются тремя параметрами: порогом захвата, амплитудой и частотой переключения частотной подставки с учетом ее формы. При больших временах измерений и длительной работе лазера в динамической зоне (1с и более) проявляется эффект инерционного взаимодействия излучения лазера с поверхностями зеркал, известный в литературе, как эффект «впечатывания решетки» [14]. В результате происходит изменение измеряемых величин динамических зон.



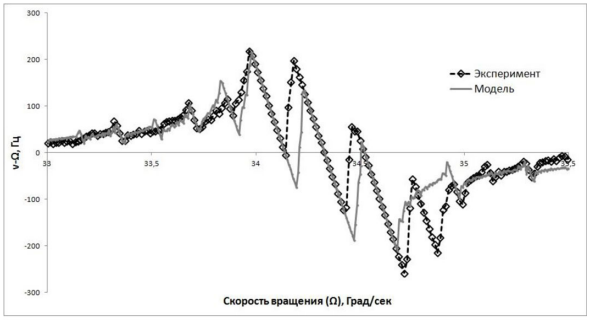
а)



б)



с)



д)

Рисунок 4.

Вид частотных характеристик кольцевого лазера при разных значениях амплитуды подставки, частоты переключения подставки и порогового значения зоны захвата. Сравнение результатов экспериментальных измерений и численных расчетов со значениями параметров:

а) ΩL=135 Гц, ΩП= 10238 Гц, wn =256 Гц

б) ΩL=266 Гц, ΩП= 44550 Гц, wn =256 Гц

с) ΩL=135 Гц, ΩП= 10200 Гц, wn =1024 Гц

д) ΩL=450 Гц, ΩП= 46015 Гц, wn =256 Гц

ОПТИМИЗАЦИЯ ЧАСТОТНОЙ ПОДСТАВКИ ПУТЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 5(а и б) показаны результаты численного моделирования частотных характеристик для двух видов знакопеременной магнитооптической подставки, причем 5(а) - меандр с параметрами - амплитуда подставки 44490 Гц, - частота переключения подставки 256 Гц, а 5(б) – комбинированной подставки, состоящей из быстрого и медленного меандров с параметрами: для быстрого – повторяются, а для медленного 154 Гц; = 4 Гц. 270 Гц.

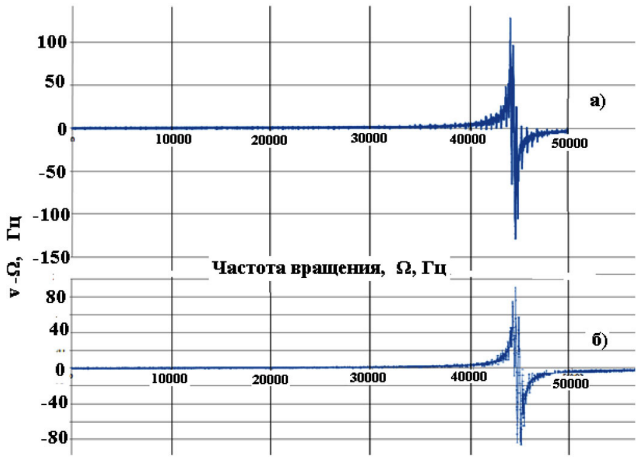


Рисунок 5.

Частотные характеристики:

а) для прямоугольной подставки;

б) комбинированной подставки, состоящей из быстрого и медленного меандров

Сравнивая результаты расчетов, видим, что использование дополнительно медленного меандра привело к уменьшению искажений частотной характеристики вблизи частоты подставки до двух раз или другими словами динамические зоны захвата оказываются более узкими в случае комбинированной подставки.

Таким образом, анализируя результаты численного моделирования, представленные на рис. 5, можно сделать выводы, что путем выбора оптимальной формы, амплитуды и частоты переключения подставки можно добиться минимального искажения частотной выходной характеристики лазерного гироскопа при одной и той же величине статической зоны захвата в заданном диапазоне скоростей вращения разрабатываемого устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в настоящей работе результаты численного моделирования и экспериментальных измерений показали, что частотную характеристику кольцевого лазерного гироскопа со знакопеременной частотной подставкой можно с хорошей достоверностью анализировать, используя только фазовое уравнение.

Максимальное искажение частотной характеристики при использовании знакопеременной частотной подставки прямоугольной формы, определяется параметрами резонатора кольцевого лазера, и не зависит от амплитуды и частоты переключения подставки. Максимальная ширина динамической зоны захвата при этом практически равна ширине статической зоны захвата.

Путем численного моделирования показано, что использование комбинации двух прямоугольных подставок разной частоты и амплитуды может привести к уменьшению динамических зон захвата при определенных соотношениях их параметров.

Проведенные в настоящей статье исследования могут быть использованы для оптимизации частотной подставки с целью получения минимальных искажений частотной характеристики лазерного гироскопа.

Список литературы:

1.http://www.aerospace.honeywell.com./guidance-sensor-inertial-products.

2. *В.Г.Пешехонов* // Гироскопия и навигация, 2011, № 1(72), с.3.

3. http://www/sagem-ds/com.

4. *В.Н.Курятов, П.С.Ланда Е.Г.Ларионцев*// Изв.вузов. Сер. Радиофизи-ка, 1968, т.11,с.1839

5. *F.Aronowitz, R.J Collins*//J.Appl.Phys., 1970, 41,с.130-141.

6. *И.М.Хошев* //Радиотехника и электроника, 1979, №6,с.1142-1151.

7. *G.R.Wilkinson* //Prog. Quantum Electron., 1987, 11, с.1-17.

8. *О.Н.Найда, В.В.Руденко* // Электронная техника, Серия 11, Лазерная техника и оптоэлектроника, 1990, вып.1(53), с.83-90.

9. *А.М.Хромых*//Электронная техника, Серия 11, Лазерная техника и оптоэлектроника, 1990, вып.1(53), с.76-83.

10. *Ю.Д.Голяев, Г.И.Телегин, К.А.Толстенко, С.О.Яременко* // Электронная техника, Серия 11, Лазерная техника и оптоэлктроника, 1990, вып.3(55), с.58-63.

11. *В.В Азарова, Ю.Д Голяев, И.И.Савельев*// Квантовая электроника, 2015, т 45, 171,

12. *В.В. Азарова, А.С.Бессонов, А.П.Макеев, Е.А.Петрухин*// Патент № 138509, 2013.

13. *В.Н.Горшков, М.Е.Грушин, Е.Г.Ларионцев И.И.Савельев, Н.И.Хохлов* //Квантовая электроника, 2016, т.46, №11,1061.

14. *В.А.Зборовский, В.Н.Куликов, А.В.Перевертзев, Н.Г.Цигуро, Б.А.Шокин* //Квантовая электроника, 1978, т.5, №3, с.521-525..

УДК УДК 621.763

российский индекс научного цитирования Science Index

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗМЕРОСТАБИЛЬНОГО К ДЕЙСТВИЮ ТЕМПЕРАТУР СЕТЧАТОГО КОМПОЗИТНОГО КОРПУСА ТЕЛЕСКОПА

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

АО «РКЦ «Прогресс», г. Самара

E-mail: tkachenko-as@bk.ru

Изложен метод определения параметров размеростабильного к действию температур сетчатого композитного корпуса телескопа. Применяемый в сетчатом корпусе однонаправленный углепластик, имея плотность в 1,75 раза меньшую плотности алюминиевых сплавов, превосходит последние по прочности более чем в 5 раз и по жесткости в 2-3 раза.

Ключевые слова: размеростабильный сетчатый корпус, телескоп.

PARAMETER DETERMINATION OF CANCELLATED COMPOSITE TELESCOPE CASE SIZE-STABLE TO TEMPERATURE EXPLORATION

SHAIDA A.N., STRATILATOV N.R., NONIN A.S., TKACHENKO A.S.

JSC SRC PROGRESS

E-mail: tkachenko-as@bk.ru

Abstract. *The method to determinate parameters of cancellated composite telescope case size-stable to temperature exploration has been represented. UD carbon used in cancellated case with its density being 1.75 times less than density of aluminum alloys excels them in strength more than 5 times and in rigidity 2-3 times.*

Keywords: size-stable cancellated case, telescope.

Композитные материалы, армированные углеродными волокнами, находят широкое применение в ракетно-космической технике и авиастроении [1,2].

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

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

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

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

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

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

Объемное содержание волокон однонаправленного углепластика составляет порядка 35%, что позволяет осуществлять пересечение ребер в сетчатой конструкции без изгиба волокон. Температурный коэффициент линейного расширения α однонаправленного углепластика составляет $1 \div 3 \cdot 10^{-6}$ 1/°с[3].

На рис. 1 изображена модель сетчатой композитной конструкции корпуса телескопа диаметром D с требуемой геометрической стабильностью по высоте L при действии температур.

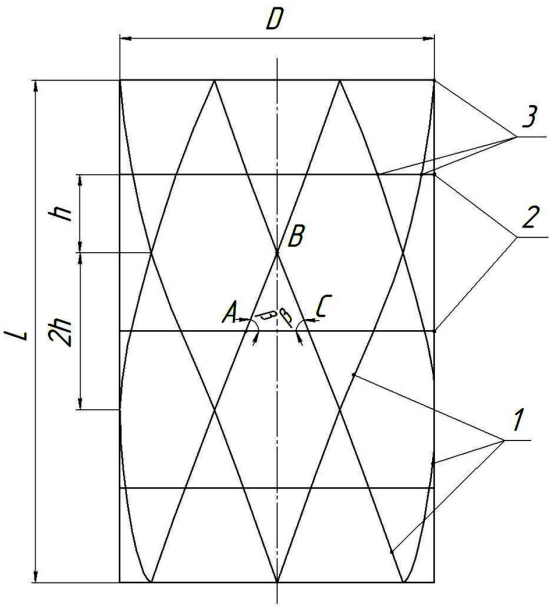


Рисунок 1.
Модель сетчатой композитной конструкции корпуса телескопа

$$\Delta T = T_0 \pm T$$

$$T > T_0$$

Спиральные ребра 1 расположены под углом β к кольцевым ребрам 2.

Кольцевые ребра соединены со спиральными в узлах 3.

Кольцевые ребра равномерно распределены по высоте L оболочки и расположены симметрично относительно точек пересечения спиральных ребер на расстоянии h.

Таким образом, кольцевые ребра совместно со спиральными образуют симметричные треугольные элементы ABC с размерами длин хорд по стирали и кольцу равными a, b и высотой h, соответственно.

Поскольку сетчатая композитная конструкция корпуса телескопа состоит из множества

криволинейных треугольных элементов образованных при пересечении спиральных и кольцевых ребер то суммарная высота L сетчатого композитного корпуса телескопа от действия температур:

$L_t = (1+ \propto \Delta T) \cdot L$

$\Delta T = T_0 \pm T$,

где , T_0 – исходная температура, Т – действующая температура.

Рассматриваемый сетчатый композитный корпус телескопа обладает также и высокой степенью весового совершенства, так как спиральные и кольцевые ребра выполнены из однонаправленного углепластика, имеющего высокую прочность и жесткость. Корпус является интегральным, он не требует сборки и обладает более высокой степенью экономической эффективности чем подкрепленные и ферменные конструкции корпусов.

Для определения параметров, обеспечивающих требуемую размеростабильность к действию температур сетчатого композитного корпуса телескопа, рассмотрим развертку корпуса (рис. 2).

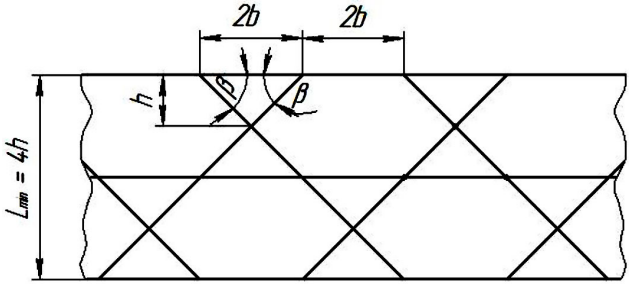


Рисунок 2.
Развертка корпуса

Определим минимальный диаметр корпуса из условия его технологии изготовления:

$$D_{min} = \frac{8 \cdot b}{\pi}$$

где:

$$b = \frac{h}{\operatorname{tg}\beta}$$

тогда:

$$D_{min} = \frac{8 \cdot h}{\pi \operatorname{tg}\beta}$$

откуда

$$h = \frac{\pi D_{min} \cdot \operatorname{tg}\beta}{8}$$

Соответствующая – минимальная высота сетчатого корпуса равна

$$L_{min} = 4 \cdot h = \frac{\pi D_{min} \cdot \operatorname{tg}\beta}{2}$$

В рассматриваемом сетчатом корпусе обеспечивается пересечение спиральных ребер с кольцевыми (торцевыми)в четырех местах.

Интерес представляет размеростабильный к действию температур сетчатый композитный корпус с углом наклона спиральных ребер к кольцевым равным $\beta = 45°$.

Развертка корпуса приведена на рис. 3.

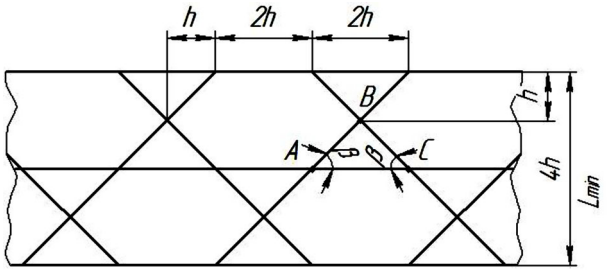


Рисунок 3.
Развертка корпуса, β = 45°

Тогда высота треугольных элементов корпуса телескопа равна

$$h = \frac{\pi D}{8}$$

а минимальная высота корпуса состоящего их двух торцевых шпангоутов (кольцевых ребер) и одного кольцевого ребра расположенного симметрично относительно точек пересечения спиральных ребер равна

$$L_{min} = 4 \cdot h = \frac{\pi D}{2}$$

Реальный сетчатый корпус имеет высоту L кратную L_{min}.

Рассматриваемый в статье метод проектирования и создания с требуемой размеростабильностью к действию температур сетчатых композитных конструкций находится в стадии реализации для перспективных КА, в том числе и малых разработки АО «РКЦ «Прогресс».

На рис. 4 приведена 3D модель размеростабильного сетчатого композитного корпуса телескопа перспективных КА «Ресурс ПМ», «Аист».

Основные этапы технологии производства предлагаемого сетчатого композитного корпуса включают определение на образцах-свидетелях фактических температурных коэффициентов линейного расширения материала ребер, намотку криволинейных и кольцевых ребер из однонаправленного углепластика в пазы матрицы из эластичного силикона покрывающих цилиндрическую оправку, отверждения связующего, удаление оправки и эластичной матрицы, механическую обработку.

Изготовленный сетчатый корпус подвергают сушке и обезгаживанию (дегазации) путем выдержки в барокамере при низком давлении и температуре 100 °С не менее 2-х суток.

Сетчатый композитный корпус обладает высокой степенью весового совершенства, т.к. его основные несущие элементы изготовлены из однонаправленного углепластика и имеющего исключительно высокую прочность и жесткость.

В конструкции полностью реализуются высокие удельные по отношению к плотности характеристики однонаправленных композитов.

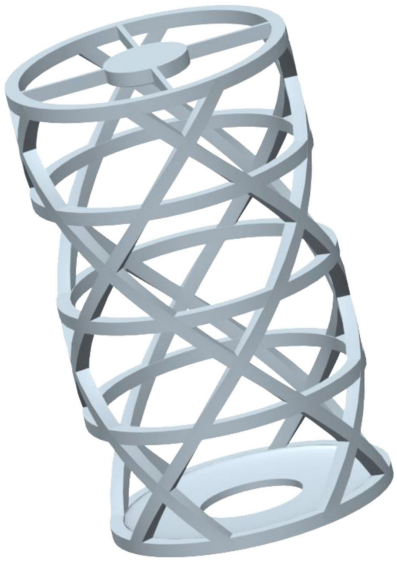


Рисунок 4.
Размеростабильный к действию температур сетчатый композитный корпус телескопа, 3D модель

Область применения сетчатой композитной конструкции не исчерпывается ракетно-космической техникой.

Надежность, технологичность, малый вес позволяют предположить, что данная сетчатая композитная конструкция может найти широкое применение во всех случаях, когда необходимо создать с требуемой размеростабильностью к действию температур конструкцию.

Список литературы:

1. *Васильев В.В., Разин А.Ф.* Перспективы применения сетчатых композитных конструкций в гражданской авиации // Общероссийский научно-технический журнал. «Полет». 2016. № 11-12. С. 3-12.

2. *Бокучава П.Н., Евстафьев В.А., Бабук В.А*. Численное исследование влияния количества кольцевых ребер на устойчивость композитных сетчатых цилиндрических оболочек летательных аппаратов // Конструкции из композиционных материалов. 2015. № 4. С. 3-5.

3. Композиционные материалы: Справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990.

References:

1. *Vasiliev V.V., Razin A.F*. The outlook for the application of composite lattice structures to commercial aircraft frames // Polyot. 2016. No. 11-12. P. 3-12. (In Russ.)

2. *Bokuchava P.N., Evstafyev V.A., Babuk V.A*. Numerical stability analysis of aircraft composite lattice cylindrical shells with changing quantity of annular ribs // Constructions from composite materials. 2015. No. 4. P. 3-5. (In Russ.)

3. Composite materials: Reference book / Vasiliev V.V., Protasov V.D., Bolotin V.V., etc.; Edited by Vasiliev V.V., Tarnopolsky Y.M. – M.: Mashinostroenie, 1990.

УДК 535.318

российский индекс научного цитирования Science Index

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ОБЪЕКТИВОВ, РАБОТАЮЩИХ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ от 3 до 5 мкм

КАЛЮГИН В.С., МОИСЕЕВ Е.А., МИТРОФАНОВА Ю.С., СЕНИК Б.Н.

«ПАО Красногорский завод им С.А. Зверева»

E-mail: bogdan_senik@mail.ru

В статье рассматриваются проблемные вопросы, требующие решения в условиях промышленного производства тепловизионных объективов работающих в спектральном диапазоне от 3 до 5 мкм, как на этапе изготовления отдельных оптических компонентов, так и на этапе сборки и юстировки.

Ключевые слова: тепловизионный объектив, спектральный диапазон, оптические среды.

CHALLENGING ISSUES IN INDUSTRIAL PRODUCTION OF THERMAL-IMAGING LENSES APPLIED WITHIN SPECTRAL RANGE of 3 to 5 μm

V.S. KALYUGIN, YE.A. MOISEEV, YU.S. MITROFANOVA, B.N. SYENIK.

The PJSC «Krasnogorsky Zavod»

E-mail: bogdan_senik@mail.ru

Abstract. *The article reviews challenging issues which shall be resolved in the course of industrial production of thermal-imaging lenses applied within spectral range of 3 to 5 μm both at the stage of manufacturing of individual optical components and in the course of assembling and alignment process.*

Keywords: thermal-imaging lens, spectral range, optical mediums.

В настоящее время быстрыми темпами проводятся комплексные фундаментальные, прикладные исследования и разработки в области создания тепловизионных оптических систем. Прежде всего, это связано с повышенной актуальностью решения целого ряда технических задач в интересах военных ведомств различных стран, в том числе и Российской Федерации, а также крупными достижениями в области создания фотоприемных устройств с повышенными выходными характеристиками. [1-6]

В последнее время осуществлен качественный скачок в разработке и организации промышленного производства фотоприемных устройств, работающих в спектральном диапазоне 3-5 мкм, по обеспечению требуемого качества для комплексированных оптико-электронных приборов и комплексов различного назначения. [7, 8]

Рисунок 1.
Современные ИК-объективы

Современные тепловизионные приборы работают в одном из двух спектральных диапазонов (3-5 мкм, 8-14 мкм). Некоторые из типов приборов являются комбинированными и работают в обоих вышеуказанных диапазонах одновременно. Каждый из них обладает определенными достоинствами. Преимуществами объективов для области спектра 3-5 мкм по сравнению с объективами для области 8-14 мкм являются:

– более высокое качество изображения за счет меньшего дифракционного предела разрешения (по формуле $\varepsilon = 1{,}22 \cdot \lambda/D$);

– меньшие габариты оптических систем и входных окон ОЭК за счет возможности использования больших диафрагменных чисел, что также определяется явлением дифракции из-за меньших длин волн в рабочем спектральном диапазоне;

– специалисты в области расчета оптических систем имеют возможность использовать более широкий номенклатурный ряд оптических материалов: монокристаллические германий, кремний, флюорит, халькогенидные материалы, поликристаллические сульфид и селенид цинка. Что в свою очередь позволяет осуществить расчет оптических систем с более высокими выходными оптическими параметрами по сравнению с системами, работающими в диапазоне 8-14 мкм;

– повышенные светотехнические параметры просветляющих покрытий и, соответственно, более высокое светопропускание оптической системы;

– более эффективная работа в условиях повышенной влажности и по воздушным целям.[9]

Особенностью создания тепловизионных систем для данного спектрального диапазона являются следующие обстоятельства:

Уменьшение длины волны одновременно с уменьшением дифракционного предела требует повышения требований к точности изготовления деталей, а учитывая, что коэффициент преломления материалов с изменением длины волны изменяется не так быстро и составляет для отдельных материалов величины близкие к n=4 (германий), то отклонения от формы поверхностей не должны превышать $N/\Delta N \leq 3/0{,}5$, величина децентрировки не более 10 мкм, поле допуска на толщину по центру должно составлять, в среднем, не более 0,05 мм. Вышеуказанные обстоятельства, в свою очередь, требуют разработки и внедрения принципиально новых технологий изготовления оптических элементов с использованием современного технологического оборудования, с требуемыми допусками на вышеуказанных оптических средах, с низкой себестоимостью изготовления.

Проведены теоретические исследования в области оптимизации расчетов вышеуказанных оптических систем, подтверждающие, что для гарантированного обеспечения высокого качества объектива, кроме изготовления оптических элементов с вышеуказанными точностными параметрами, в расчет оптической схемы необходимо закладывать фактические значения показателей преломления используемых оптических заготовок с точностью, как минимум, до 3 знака после запятой. По причине отсутствия в нормативно-технической документации на указанные оптические материалы требования проведения аттестационных работ по измерению показателя преломления и дисперсии конкретно к каждой изготовленной партии материалов, поставщики оптических заготовок не проводят аттестационные работы по измерению показателя преломления и дисперсии в каждой партии заготовок. Конструктор-расчетчик оптических систем, при расчете, использует номинальные значения показателя преломления во втором знаке после запятой, указанных в нормативно-технической доку-

ментации на материалы (ОСТы, ТУ и т.д.). Тем самым, вносятся в целом ряде случаев систематические ошибки при расчете комплектовок оптических деталей для определения точных воздушных промежутков для конкретных партий объективов. С целью решения этой несомненно важной проблемы необходимо выполнение целого ряда научных работ по корректировке стандартов, технических условий на оптические среды, указав необходимость измерения показателей преломления и дисперсии в спектральном диапазоне от 3 до 5 мкм в четвертом знаке после запятой. Также потребуются разработка специальных методик проведения вышеуказанных измерений, подготовка необходимой метрологической базы, разработка конструкторской документации на специальные призмы-свидетели и т.д.

Важной тенденцией в области создания объективов для указанного спектрального диапазона является минимизация массогабаритных параметров при неизменно высоком качестве формируемого изображения. Как правило, использование традиционных сферических оптических элементов исчерпало свои потенциальные возможности по улучшению. Оптические системы имеют большое количество компонентов, большие массогабаритные характеристики и, как правило, очень высокую себестоимость изготовления. Как выход из положения, в оптических системах используют нетрадиционные оптические элементы (асферические, киноформные, гибридные асферико-киноформные элементы). В результате оптическая система, в состав которой входят вышеуказанные оптические элементы, становится компактной, с улучшенными аберрационными характеристиками и низкой себестоимостью изготовления. [10]

Технологически вышеуказанные оптические элементы можно изготовить, используя две технологии: технологию прецизионного алмазного точения и технологию изготовления с использованием вакуумного метода ионно-плазменного травления и функциональных масок, синтезированных с помощью компьютерных программ. Как правило, второй метод, по целому ряду причин, в настоящее время не используется.

Использование метода прецизионного алмазного точения предполагает применение суперпрецизионного технологического модуля с ЧПУ (серия станков Nanoform, фирма-производитель AMETEK PRECITECH, США), а также специальных алмазных резцов, производимых за рубежом ограниченным рядом фирм.

Изготовление оптических элементов из различных оптических материалов вышеуказанным методом предполагает оптимизацию технологических режимов резания, а также индивидуального подбора смазочно-охлаждающих жидкостей применительно к каждому конкретному материалу. Немаловажным фактором является обязательное использование прецизионной системы активного контроля геометрии обрабатываемой поверхности в процессе резания в реальном масштабе времени.

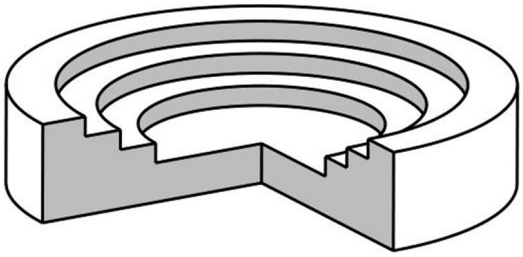


Рисунок 2.
Схематическое изображение киноформного элемента

Рисунок 3.
Станок Nanoform 250, фирма-производитель AMETEK PRECITECH, США

К сожалению, производство вышеуказанных технологических комплексов, а также специального режущего инструмента в Российской Федерации отсутствует.

Применение киноформных, асферико-киноформных оптических элементов требует в настоящее время системного решения целого ряда проблем: разработку государственных стандартов на конструкцию киноформных (асферико-киноформных) элементов, с обязательным перечнем конструктивных параметров, рекомендаций по точности, разработки различных методик измерения этих параметров, а также создания соответствующей метрологической базы.

Одним из важнейших конструкторских параметров оптической системы, независимо от того, в каком спектральном диапазоне она функционирует, является коэффициент пропускания излучения.[11] Этот параметр напрямую связан с дальностью обнаружения и распознавания объекта, в случае тепловизионного объектива, работающего в одной из частей ИК-спектра, влияет на уровень оптического сигнала, поступающего на фотоприемное устройство, которое регистрирует излучение от объекта. Для увеличения сигнала требуется уменьшить потери излучения в рабочем спектральном диапазоне (3-5 мкм). Это обстоятельство требует синтеза специальных многослойных оптических покрытий, которые бы обеспечили максимально низкое остаточное отражение от каждой оптической поверхности. Естественно, увеличение числа слоев приводит к увеличению степени потерь на рассеяние и на поглощение в самих слоях. Это в свою очередь приводит к неизбежным потерям сигнала, проходящего через оптическую систему. Данную проблему можно решить только одним способом – путем замены конструкции многослойных оптических покрытий на однослойные плёнки с градиентным показателем преломления, что эквивалентно многослойной интерференционной плёнке. Экспериментальные работы в данной области проводились сотрудниками отдела оптических покрытий АО НПО «ГИПО», г. Казань совместно с предприятием ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», с использованием оптических подложек из монокристаллического германия и поликристаллического селенида цинка и показали хороший результат. [12]

Особенностью оптических покрытий, наносимых на оптические элементы для ИК-диапазона, является их относительно большая оптическая толщина, учитывая высокие показатели преломления используемых пленкообразующих материалов, а также относительно большую относительную толщину каждого слоя в отдельности и суммарную толщину оптического покрытия. В случае нанесения оптического слоя на оптическую поверхность с высокой разницей по толщине на всей поверхности, возникает эффект ухудшения геометрической точности соответствия фактической поверхности ее конструктивным требованиям. Это, в свою очередь, приводит к фазовой задержке при прохождении излучения через каждую поверхность, и ухудшению качества объектива в целом. В наибольшей степени этот негативный эффект проявляется на вогнутых крутых поверхностях, которые, как правило, являются критичными в оптической схеме тепловизионного объектива. Чтобы обеспечить нанесение равномерного по толщине покрытия по всей поверхности каждого элемента используются планетарные механизмы вращения оптических деталей, а также специально рассчитанные функциональные маски. [13]

Разработка и производство объективов с требуемыми выходными параметрами обеспечит создание высококачественных отечественных тепловизионных приборов нового поколения. Тенденции последнего десятилетия, требующие постоянной минимизации и миниатюризации, не обошли стороной и оптико-электронное приборостроение. Эта тенденция накладывает свой отпечаток на разработку современных тепловизионных приборов. Данная проблема решается новаторскими конструкторскими решениями.

Одним из них является разработка оптических систем с ломанными оптическими осями, что позволяет изменять направление

визирной оси до 180º, с использованием нетрадиционных оптических компонентов. Использование данного решения в свою очередь усложняет процесс сборки и контроля выходных параметров объективов.

Ужесточение требований по децентрировке оптических компонентов, в том числе поперечной и угловой децентрировке, позволяет улучшить качественные показатели ИК оптических систем. В частности, децентрировка линзовых компонент, предназначенных для работы в ИК диапазоне, не должна превышать 3-5 мкм. Методы центрирования линз в оправах, такие как автоколлимационная вточка с использованием плавающего патрона или ее усовершенствованная разновидность – двусторонняя автоколлимационная вточка в полной мере не позволяют добиться требуемых допустимых значений децентрировок линз. Для решения вышеуказанных задач сотрудниками ПАО КМЗ разработан макет специального стенда – лазерного автоколлимационного микроскопа, использующего лазерное излучение, обеспечивающего вышеуказанные требуемые параметры. Для его доработки и устранения замечаний конструкции, обнаруженных на этапе проведения экспериментальных работ, привлекаются сотрудники кафедры РЛ-2 факультета РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Во время финишной сборки объектива, для достижения требуемых параметров, требуется максимально точно выдерживать воздушных промежутков между оптическими элементами. Для контроля полученных воздушных промежутков с требуемой допустимой погрешностью порядка 0,01 мм требуется прецизионное метрологическое оборудование.

Одним из вариантов может быть лабораторная скамья OptiCentric IR немецкой фирмы TRIOPTICS, которая используется специально для применения в инфракрасном диапазоне излучения.

При сборке объективов с ломанными оптическими осями требуются особые способы юстировки и выставления линз в оправах и зеркал в корпусе объектива. Соосность оптических компонентов друг относительно друга не должна превышать 0,01 мм в системах без подвижных компонентов и 0,03 мм в системах с подвижным оптическим компонентом. Кроме этого, необходимо выставление зеркал с угловой погрешностью не более 20 угл. с. относительно требуемого угла с одновременным выдерживанием воздушных промежутков с точностью не более 10 мкм.

Для решения вышеуказанных задач требуется создание определенной номенклатуры специализированного контрольно-юстировочного оборудования, разработка методик юстировки для данного класса оптических систем. Все эти работы требуют системного подхода и обязательного финансирования теоретических и экспериментальных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Несомненно, тенденции к увеличению объемов выпуска тепловизионных оптических приборов и комплексов в ближайшей перспективе будут только усиливаться. Все вышеуказанные проблемные вопросы в той или иной степени будут влиять на стабильность, себестоимость их производства, а также на эксплуатационные параметры изготовленных изделий. Требуется системный подход к решению этих задач при условии привлечения ведущих специалистов из предприятий и организаций, прямо или косвенно участвующих в процессе производства оптико-электронных приборов данного профиля.

Авторы статьи выражают искреннюю благодарность за рецензирование и корректировку текста статьи Волкову В.Г., Колючкину В.Я., Склярову С.Н.

Список литературы:

1. *Гейхман И.Л., Волков В.Г.* Видение и безопасность, 840 с, (2009).

2. *Волков В.Г., Моисеев Е.А., Сеник Б.Н.* Современные тенденции в разработках объективов для тепловизионных оптических приборов, Контенант, том №15, №4, 2016 год, с. 79-81

3. *Драгун В.Л.* Тепловизионные системы в исследовании тепловых процессов./М.: Наука, 1967. – 256 с.

4. *Волков. В.Г.* Приборы ночного видения для

бронемашин. Специальная техника, 2004 г. №5, с. 2–13, №6, с. 2–10.

5. *Ллойд Дж.* Системы тепловидения. М., Мир, 1987 г., 414 с.

6. *Госсорг Ж*. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М., Мир, 1988 г., 416 с.

7. *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г*. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. М., Университетская книга, Логос, 2007 г., 192 с.

8. *Пономаренко В.П., Филачев А.М*. Инфракрасная техника и электронная оптика. Становление научных направлений (1946–2006). М., Физматкнига, 2006 г., 336 с.

9. *Бажанов Ю.В., Берденников А.В., Дучицкий А.С., Лукин А.В., Черкашина Р.М*. Объективы для работы с матричными приемниками излучения в области спектра 8–14 мкм. Оптический журнал, 2003 г., т. 70, №4, с. 35–36.

10. *Ган М.А*. 50 лет киноформной оптики. Итоги и перспективы развития. Оптический журнал, т. 73 №7, с 9-16;

11. *Потелов В.В., Сеник Б.Н*. Градиентные покрытия для гиперспектральных оптических кристаллов. Тезисы докладов XIII конференции «Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение» Нижний Новгород, 2007 год, с. 217-221.

12. *Сеник. Б.Н*. Метод определения функциональной маски для вакуумной асферизации. Прикладная физика №3 2007 г., с. 129-134;

13. *И.С. Гайнутдинов, Е.А. Несмелов, И.Б. Хайбуллин,* Интерференционные покрытия для оптического приборостроения, Издательство «ФЭН», г. Казань, 2002 год, с. 259-264.

УДК УДК 533.6.01

российский индекс научного цитирования Science Index

МЕТОДИКА РАСЧЕТА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛ С АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ИГЛОЙ В ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ПОМОЩЬЮ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СРЕДЫ РАЗРАБОТКИ

САМБАРОВ Г.Е., ЗУБКОВ Г.А.

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

E-mail: detovelli@mail.ru

Объектом разработки является методика расчета аэродинамических характеристик тел с аэродинамической иглой в головной части летательного аппарата. Цель работы - влияние аэродинамической иглы на структуру обтекания и величину продольной силы тела со сферическим затуплением. Поставленная цель достигается за счет реализации математической модели на языке программирования Delphi Pascal.

Ключевые слова: аэродинамическая игла, сверхзвуковая аэродинамика, численное моделирование.

METHOD OF CALCULATION OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF BODIES WITH AERODYNAMIC NEEDLE IN THE HEAD OF THE FLYING APPARATUS BY THE INTEGRATED ENVIRONMENT OF DEVELOPMENT

SAMBAROV G.E., ZUBKOV G.A.

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

E-mail: detovelli@mail.ru

Abstract. *The object of development is the method for calculating the aerodynamic characteristics of bodies with an aerodynamic needle in the head of the aircraft. The aim of the work is the influence of the aerodynamic needle on the flow structure and the magnitude of the longitudinal force of the body with spherical blunting. The goal is achieved by implementing a mathematical model in Delphi Pascal programming language.*

Keywords: aerodynamic needle, supersonic aerodynamics, numerical modeling.

ВВЕДЕНИЕ

Для значительного снижения лобового сопротивления перед затупленной носовой частью летательного аппарата, движущегося со сверхзвуковой скоростью, устанавливают надстройку в виде тонкого цилиндрического заостренного тела (иглы). При этом уменьшаются тепловые потоки к обтекаемой поверхности от сильно разогретого омывающего газа. Все это позволяет снизить мощность двигательной установки летательного аппарата и уменьшить вес теплозащитных покрытий. Регулируя положение иглы, можно изменять лобовое сопротивление, что необходимо для обеспечения маневра летательного аппарата. Такая игла, выполненная в виде тонкого прямого тела вращения, является достаточно эффективным органом управления, удобным в конструктивном отношении. Следует, однако, учитывать, что при определенных условиях могут возникнуть пульсации потока на поверхности носовой части, снижающие эффект от применения иглы и затрудняющие управление полетом. [2]

Рассмотрим картину течения перед затупленным телом с центральной иглой. Если длина такой иглы 2 не превышает расстояния до криволинейного отошедшего скачка уплотнения 1 (рис.1), то ее влияние распространяется лишь на течение за этим скачком и оказывается несущественным. Выдвижение острия иглы 2 за пределы криволинейного скачка уплотнения (рис.1) приводит к перестройке структуры возмущенного потока, которая характеризуется новой системой скачков уплотнения. Это обусловлено отрывом потока от поверхности иглы, который обычно происходит вблизи основания конического острия (излома). Такой отрыв вызывается большим положительным градиентом давления в пограничном слое на поверхности иглы, обусловленным торможением потока перед телом. В результате отрыва возникает застойная зона 5 с возвратным течением. [3]

Оторвавшийся пограничный слой смешивается в зоне 4 с внешним возмущенным течением и присоединяется к обтекаемой затупленной поверхности в области 3.

Разделяющие линии тока 6 в зоне смешения образуют поверхность, близкую к конической, пересекающуюся с головной частью в точках А и В. В месте присоединения сверхзвуковой поток претерпевает поворот, который вызывает криволинейный скачок уплотнения 8, пересекающийся в точке С с коническим скачком 7, идущим от области отрыва. В результате такого взаимодействия скачков за этой точкой возникает третий скачок 9. Все эти скачки образуют тройную конфигурацию, за которой образуются линии тангенциального разрыва скорости 10, создающие вихревую поверхность. [3]

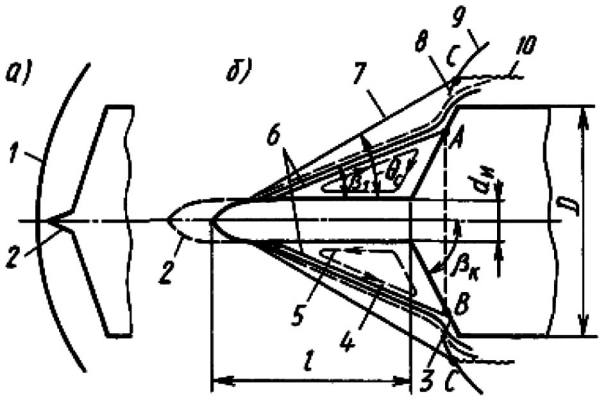


Рисунок 1.
Симметричное обтекание
сверхзвуковым потоком затупленного тела

При дальнейшем выдвижении иглы угол Pi, под которым происходит отрыв потока, постепенно уменьшается, скачок уплотнения становится слабее и давление за ним снижается. В этом случае продольный градиент давления в пограничном слое на поверхности иглы может оказаться небольшим и не вызовет отрыва вблизи острия. Поэтому отрыв произойдет на некотором удалении от излома поверхности иглы. [2]

РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ ИГЛ

Зададимся точкой отрыва и определим условное расстояние от передней точки до точки отрыва *Xs*:

$$Xs = l - 3 \cdot Rad \qquad (1)$$

По известным соотношениям теории отрывных течений определяем давления в области отрывного течения.

$$\mathrm{Rex} = \frac{V \cdot x}{\vartheta} \quad (2)$$

$$\mathrm{P}' = \frac{1.69}{(\mathrm{M}_{\infty-1}^2)^2} \frac{1}{Re_x^{0.25}} \quad (3)$$

$$\mathrm{P}'^{T}_{p} = \frac{2.04}{(\mathrm{M}_{\infty-1}^2)} \frac{\hat{\varepsilon}}{Re_x^{0.25}} \quad (4)$$

$$\mathrm{P_f} = \mathrm{p} \cdot (1 + 0.5\mathrm{p}' \cdot \mathrm{K} \cdot \mathrm{M} \cdot 2) \quad (5)$$

V-скорость потока в точке отрыва потока

ϑ - динамическая вязкость

ε̂ - коэффициент,обуславливающий осесимметричный характер обтекания

С использованием уравнений теории косого скачка уплотнений найдем угол βр

$$\beta_\mathrm{p} = \frac{\pi}{180} \left(\frac{Pp - p}{(0.0016 + 0.002M\infty^{-2})kM\infty^2 p}\right)^{0.588} \quad (6)$$

Найдем длину зоны отрыва ls:

^{Э}=Rtgβ ·sin^{Э}+Rcos^{Э}-tgβ · (R+l) (7)

H=Rcos^{Э} (8)

Ls=H/tgβ (9)

Из теории косого скачка уплотнений найдем Θс

$$\Theta\mathrm{c} = \arcsin\left(\frac{\frac{Pp}{p} + (k-1)/(k+1)}{2kM^2/(k+1)}\right)^{0.5} \quad (10)$$

Найдем угол разворота потока β

$$\mathrm{tg}(\Theta\mathrm{c} - \beta) = \left(\frac{k-1}{k+1}\frac{Pp}{p} + 1\right)\left(\frac{k-1}{k+1} + \frac{Pp}{p}\right)^{-1} \quad (11)$$

Определим параметры в области отрывного течения

$$\mathrm{Mp} = \left(\frac{M^2(k-1)+2)}{-(k-1) + sin^2\Theta ckkM^2} + \frac{2M^2 cos2\Theta c\kappa}{2 + (k-1)sin^2\Theta ckkM^2}\right)^{0.5} \quad (12)$$

$$\mathrm{Cr_p} = \left(1 + \frac{2}{Mp(k-1)}\right)^{-0.5} \quad (13)$$

Определим полное давление

$$\mathrm{P_{пол}} = \mathrm{P_p}\left(Mp\hat{}2\frac{2k}{k+1} - \frac{k-1}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \mathrm{Mp}^{\frac{2k}{k-1}} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (14)$$

Определим параметры на разделяющей линии тока:

$$\varphi_{\mathrm{рлт}} = 0.5(1 + \mathrm{erf}(\acute{\eta}_{\mathrm{рлт}})) \quad (15)$$

$$\int_{\acute{\eta}\mathrm{рлт}}^{\pi} \frac{\varphi\mathrm{рлт}}{1 - Crp\varphi\mathrm{рлт}^2} * \mathrm{d}\acute{\eta}_{\mathrm{рлт}} = \int_{-\pi}^{+\pi} \frac{\varphi\mathrm{рлт}^2}{1 - Crp\varphi\mathrm{рлт}^2} * \mathrm{d}\acute{\eta}_{\mathrm{рлт}} \quad (16)$$

$$Cr_{\mathrm{рлт}} = \varphi_{\mathrm{рлт}} \cdot Cr_{\mathrm{рлт}} \quad (17)$$

$$\mathrm{M_{рлт}} = \frac{Cr_{\mathrm{рлт}}}{\sqrt{\frac{(k-1)(1-Cr_{\mathrm{рлт}})}{2}}} \quad (18)$$

$$\mathrm{Po_{рлт}} = \mathrm{P_p}\left(1 + \mathrm{M_{рлт}}^2 \frac{k-1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (19)$$

По критерию присоединения Корста $\mathrm{Po_{рлт}} = \mathrm{P_{ск}}$.

$\mathrm{P_{ск}}$ - давление за точкой присоединения.

Если равенство не достигнуто, меняем на 5% длину зоны отрыва.

Найдем $\Theta_{\mathrm{ск}}$ из теории КСУ

$$\frac{tg\Theta\mathrm{c}}{tg(\Theta\mathrm{c} - \beta\mathrm{дон})} = \frac{sin^2\Theta\mathrm{c}M\mathrm{p}^2\frac{k+1}{2}}{1 + sin^2\Theta\mathrm{c}M\mathrm{з}^2\frac{k-1}{2}} \quad (20)$$

Найдем давление Pf действующее ниже точки присоединения

$$\mathrm{P_f} = \mathrm{P_p}(1+\delta),\ \delta = 0.1 \ldots 0.3 \quad (21)$$

Найдем среднее давление

$$\mathrm{H} = \frac{Rad}{\cos^{\mathrm{э}}} \quad (22)$$

$$\mathrm{P_e} = \frac{H\,Pf}{Rad} + \frac{Rad - H}{Rad}\mathrm{Po_{рлт}} \quad (23)$$

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ПО МЕТОДИКЕ И ЭКСПЕРИМЕНТУ

Таблица 1.

Зависимость коэффициента сопротивления от удлинения иглы

Методика			Эксперимент		
L	m = 2	m = 2.5	L	m = 2	m = 2.5
1,1	0,51	0,49	1,1	0,46	0,45
1,3	0,43	0,41	1,3	0,41	0,39
1,5	0,37	0,37	1,5	0,39	0,38
1,7	0,39	0,38	1,7	0,40	0,39

Таблица 2.

Зависимость длины зоны отрыва от Числа Маха набегающего потока при оптимальной длине иглы L = 3 м

Эксперимент		Методика	
M	l,отр	M	l,отр
2,00	1,89	2,00	1,822
2,50	2,616	2,50	2,252
3,00	2,751	2,678	2,575
3,50	2,821	2,795	2,783

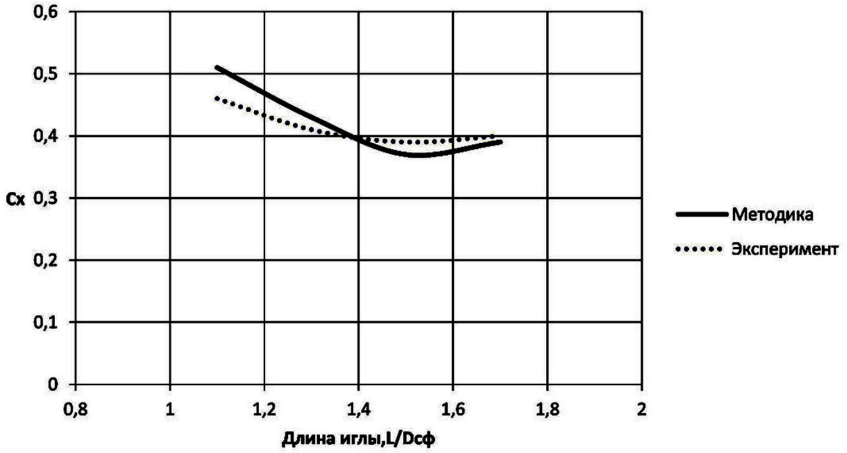


Рисунок 2.

Зависимость коэффициента продольной силы от отношения длины иглы к диаметру головной части M=2

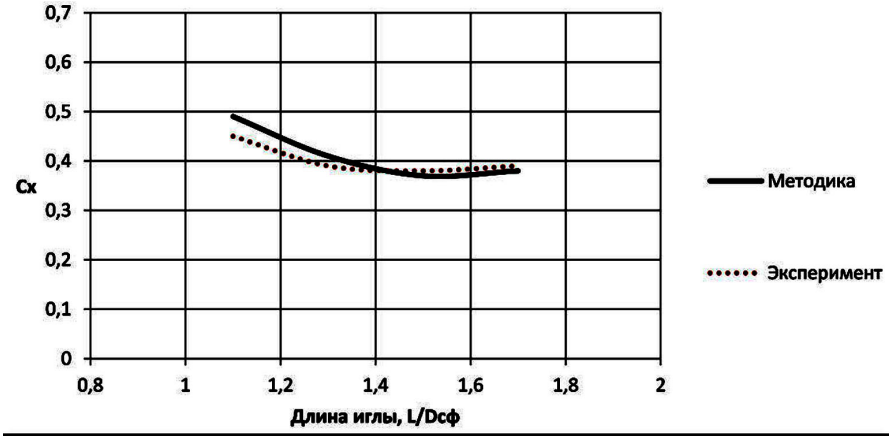


Рисунок 3.

Зависимость коэффициента продольной силы от отношения длины иглы к диаметру головной части M=2.5

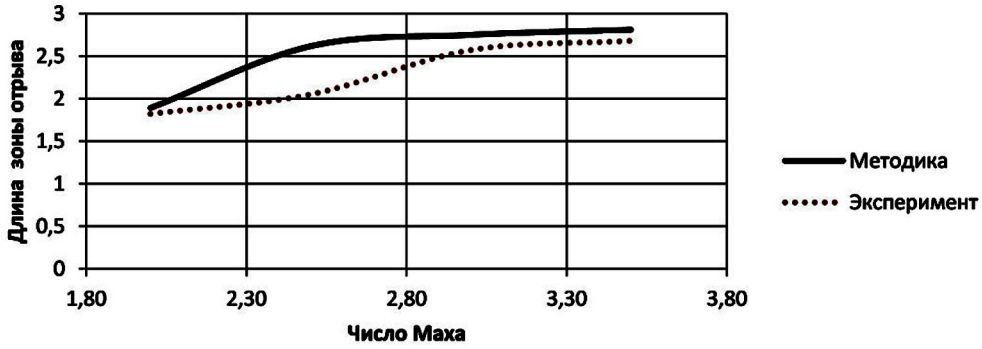


Рисунок 4.
Зависимость длины зоны отрыва от Числа Маха набегающего потока

На рисунке 2 и рисунке 3 представлена зависимость коэффициента продольной силы от относительной длины иглы. Данная зависимость была получена при использовании сравнительных данных по экспериментальным исследованиям, разработанной методике. Мы видим, что при увеличении относительной длины иглы (1-1.5l/D) происходит уменьшение коэффициента продольной силы, но начиная с 1.5-1.6 l/D происходит резкое возрастание коэффициента продольной силы. Полученные результаты практически совпадают с экспериментальными данными, что позволяет в первом приближении использовать данную методику для исследования влияния иглы любой длины на сопротивление полусферического тела. Расхождения результатов при сравнении методики с экспериментом - 9%.

На рисунке 4 представлена зависимость длины зоны отрыва от Числа Маха набегающего потока. Данная зависимость была получена при использовании сравнительных данных по экспериментальным исследованиям и разработанной методике. Мы видим, что при увеличении числа Маха увеличивается и длина зоны отрыва на игле, т.е. увеличивается активная часть иглы. Максимальное расхождение результатов - 17%.

Список литературы:

1. *П.Чжен*. Управление отрывом потока. М: Издательство «Мир», 1979.

2. *Черкашин В.А.* Сверхзвуковое обтекание тела с выступающей иглой. Препринт ИПМ АН СССР, 1981.

3. *Калугин В.Т.* Аэрогазодинамика органов управления полетом летательных аппаратов. МГТУ им. Баумана

УДК УДК 629.735.4

российский индекс научного цитирования Science Index

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПНК ДЛЯ ВЕДУЩЕГО ВЫСОТНОГО БЛА (АТМОСФЕРНОГО СПУТНИКА)

ШУВАЕВ И.Н., ЯКОВЧУК Е.А.

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

E-mail: geneayak@gmail.com

В статье описана возможность реализации (Пилотажно-навигационного комплекса) ПНК для высотного (Беспилотного летательного аппарата) БЛА (Атмосферного спутника (АС)). Состав бортового оборудования, технические требования к ПНК, разработка метаматематической модели ПНК, а также имитационное моделирование работы систем ориентации и навигации.

Ключевые слова: пилотажно-навигационный комплекс, ПНК, беспилотный летательный аппарат, БЛА, атмосферный спутник, АС, математическая модель, бортовое оборудование, имитационное моделирование.

DEVELOPMENT OF THE STRUCTURE AND THE MATHEMATICAL MODEL OF THE AEROBATIC NAVIGATIONAL COMPLEX FOR THE LEADING HIGH-ALTITUDE UNMANNED AERIAL VEHICLE (ATMOSPHERIC SATELLITE)

SHUVAYEV I.N., YAKOVCHUK E.A.

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

E-mail: geneayak@gmail.com

Abstract. *The article describes the possibility of realizing (Airborne navigation complex) ANC for high-altitude (Unmanned aerial vehicle) UAV (Atmospheric satellite (AS)). The composition of airborne equipment, technical requirements for ANC, the development of the metamathematical model of ANC, and simulation modeling of the orientation and navigation systems.*

Keywords: airborne navigation complex, PNA, unmanned aerial vehicle, UAV, atmospheric satellite, AS, mathematical model, onboard equipment, simulation modeling.

Искусственные спутники используются для научных исследований и для решения различных народнохозяйственных задач. Они позволили человеку впервые взглянуть на свою планету со стороны. В числе первых эту возможность по достоинству оценили метеорологи. Теперь лишь часы требуются им для того, чтобы получить представление о ходе процессов, определяющих погоду на всем земном шаре.

Созвездия таких спутников дают возможность определить, с помощью приборов-навигаторов, в том числе и портативных, текущее местоположение (координаты), дату и время, траекторию и скорость движения объектов на суше и на море, а также в околоземном пространстве, однако у них существует ряд недостатков. Прежде всего, это огромные затраты на создание и поддержание работоспособности всей системы: самих спутники (Космический сегмент) и Наземного сегмента, в состав которого входят космодром, командно-измерительный комплекс (КИК) и центр управления. В случае выхода из строя навигационного спутника восстановление его работоспособности с Земли практически невозможно. По этим причинам в современном мире ищут возможные альтернативы, не уступающие по своим характеристикам ГНСС.

Этой альтернативой может являться беспилотный высотный летательный аппарат, предназначенный для работы в роли «атмосферного спутника» – то есть для совершения автономных полетов в верхних слоях атмосферы Земли в течение достаточно длительного времени.

Беспилотный летательный аппарат (БПЛА, также иногда сокращается как БЛА; в просторечии иногда используется название «беспилотник» или «дрон» (от англ. drone – трутень)) – летательный аппарат без экипажа на борту. Создан для воздушной съёмки, наблюдения, организации связи и решения других задач, как в реальном времени, так и в режиме постобработки.

По режиму управления полетом БЛА разделяют на:

- автоматические;
- дистанционно-пилотируемые летательные аппараты (ДПЛА).
- БПЛА принято делить по таким взаимосвязанным параметрам, как масса, время, дальность и высота полёта: Выделяют следующие классы аппаратов:
- «микро» (условное название) – массой до 10 кг, временем полёта около 1 часа и высотой полета до 1 километра;
- «мини» – массой до 50 кг, временем полёта несколько часов и высотой до 3-5 километров;
- средние («миди») – до 1000 кг, временем 10-12 часов и высотой до 9-10 километров;
- тяжёлые — с высотами полёта до 20 километров и временем полёта 24 часа и более.

Наряду с использованием «беспилотников» для решения задач разведки, наблюдения, рекогносцировки и нацеливания, их применяют для ведения электронной и противоминной войн, для пополнения боеприпасов на передовой линии. Разрабатываются требования к беспилотным вертолетам по эвакуации жертв и грузодоставкам. Одним из перспективных вариантов применения высотных БЛА является применение их в качестве атмосферных спутников для решения разнообразных задач, в частности, для создания сетевых структур, обеспечивающих локальное радионавигационное поле.

В данной работе в соответствии с заданием будут рассмотрены БЛА, не относящиеся ни к одному вышеперечисленному классу, работающие на высотах от 15 до 20 км и временем работы более нескольких суток . Их масса у учетом полезной нагрузки может достигать до 400 кг и более, которые могут находиться в воздухе непрерывно в течение нескольких лет и летают только за счет энергии, получаемой от энергии лучей Солнца. Их называют «атмосферными спутниками» из-за того, что они могут выполнять множество функций, присущих космическим аппаратам, находящимся на низкой околоземной орбите. Это обеспечение покрытия широкополосных

беспроводных коммуникаций и сотовой связи, высотная съемка, наблюдение, контроль государственных границ, наблюдение за атмосферой Земли и многое другое.

Но, в отличие от искусственных спутников, такие атмосферные «спутники» имеют гораздо меньшую собственную стоимость и стоимость их запуска. Кроме этого, в случае необходимости, высотный летательный аппарат может быть посажен на землю, где можно будет произвести его модернизацию, ремонт и замену оборудования.

Данный тип БЛА работает на солнечной энергии, которую собирают размещенные на хвосте и крыльях летательного аппарата примерно 3000 солнечных ячеек. Благодаря этому, находясь на высоте в 20 км над землей, где на него не будут воздействовать погодные условия, беспилотник способен генерировать за день до 7 кВт мощности. Сотни ватт полезной энергии будут храниться в установленных на борту литий-ионных батареях, поддерживая работу мотора, системы автопилота и набора датчиков и телеметрии, которые позволят летательному аппарату двигаться даже ночью.

Поскольку высота полета будет зависеть от угловой высоты Солнца и продолжительности ночи, она может меняться для АС с полезной нагрузкой в зависимости от географической широты места и времени года, что добавит свои дополнительные требования к оборудованию и его к эксплуатации. Это имеет место потому, что если где-либо и когда-либо высота установившегося полета АС превысит расчетную высоту, требуемую для выполнения задачи, возникает избыток солнечной энергии, которая впоследствии может быть использована для маневрирования, повышения скорости полета или увеличения возможностей работы полезной нагрузки.

Эффективность использования БЛА при решении разных задач значительно повышается, если использовать групповой полет. В случае с АС можно будет разделить целевую аппаратуру и задачи между несколькими БЛА, что позволит снизить энергопотребление и обеспечить возможность снижения и набора высоты, что в ряде случаев даст неоспоримые преимущества (пример: более четкие изображения).

Состав бортового оборудования современных БЛА

Сам по себе БЛА - лишь часть сложного многофункционального комплекса. Как правило, основная задача, возлагаемая на комплексы БЛА, – проведение разведки труднодоступных районов, в которых получение информации обычными средствами, включая авиаразведку, затруднено или же подвергает опасности здоровье и даже жизнь людей. Помимо военного использования применение комплексов БЛА открывает возможность оперативного и недорогого способа обследования труднодоступных участков местности, периодического наблюдения заданных районов, цифрового фотографирования для использования в геодезических работах и в случаях чрезвычайных ситуаций. Полученная бортовыми средствами мониторинга информация должна в режиме реального времени передаваться на пункт управления для обработки и принятия адекватных решений. В связи с большей взлетной массой БЛА их полезная нагрузка по своему функциональному составу может иметь оборудование, отвечающего современным требованиям к многофункциональному разведывательному БЛА. Поэтому далее рассмотрим состав полезной нагрузки БЛА.

Бортовой комплекс навигации и управления БЛА и их элементная база

Бортовой комплекс БЛА является полнофункциональным средством навигации и управления. Такой комплекс должен обеспечить измерение следующих параметров:

- углов ориентации;
- навигационных параметров;
- параметров углового движения БЛА (угловыми скоростями и ускорениями).

На основе этих данных комплекс осуществляет:

- навигацию и управление БЛА при полете по заданной траектории;
- стабилизацию углов ориентации БЛА в полете и т.д.

Центральным элементом такой системы является малогабаритная инерциальная навигационная система (ИНС), интегрированная чаще всего с приемником спутниковой системы навигации. Построенная на базе гироскопов и акселерометров по принципу бесплатформенной ИНС, система является уникальным высокотехнологичным изделием, гарантирует высокую точность навигации, стабилизации и управления ЛА любого класса.

Встроенные датчики статического давления обеспечивает динамичное определение высоты и вертикальной скорости.

Состав бортового комплекса: блок инерциальной навигационной системы; приемник СНС; блок автопилота; накопитель полетных данных; датчик воздушной скорости, баровысотомер.

В базовой конфигурации управление БЛА осуществляется с помощью следующих исполнительных органов:

- элеронов;
- руля высоты;
- руля направления;
- контроллера двигателя.

Чаще всего данные комплексы совместимы с радиоканалом PCM (импульсно-кодовая модуляция) и позволяет управлять БЛА как в ручном режиме со стандартного пульта дистанционного управления, так и в автоматическом, по командам автопилота. Управляющие команды автопилота генерируются в форме стандартных широтно-импульсно-модулированных (ШИМ) сигналов, подходящих к большинству типов исполнительных механизмов. Для выполнения вышеперечисленных задач БЛА должен иметь в своём составе бортовую аппаратуру, с помощью которой он сможет получать информацию и в режиме реального времени передавать её на пункт управления для обработки и принятия адекватных решений. Особенностью применения БЛА является способность непрерывного наблюдения за поверхностью и воздушным пространством при большом удалении объекта наблюдения с помощью различных датчиков. Бортовая аппаратура БЛА вместе с пунктом управления представляет собой информационно-управляющую систему (ИУС). ИУС используется в ПНК на БЛА для непрерывного управления всеми функциями и устройствами с подвижного или неподвижного пункта управления, а также для реализации своих функциональных назначений в автоматическом режиме в соответствии с заложенными в его систему управления алгоритмом и программами функционирования. При управлении с пункта контроля все команды для БЛА поведением летательного аппарата отданы оператору на Земле, а при автоматическом режиме все функции управления определены программным комплексом и базой данных.

Функциональная схема блока управления показана на рисунке 1.

Ключевую роль в схеме блока управления играет микроконтроллер. Он выполняет обработку всей информации, поступающей с других функциональных узлов, математические расчеты, а также связывает все остальные элементы схемы. Приемник ГНСС GPS/ГЛОНАСС подает на микроконтроллер географические координаты объекта, высоту над общеземным эллипсоидом WGS84, скорость и время по Гринвичу. Данные выходят с порта GPS/ГЛОНАСС приемника и поступают на порт микроконтроллера. В свою очередь, микроконтроллер посылает с порта запросы на порт GPS/ГЛОНАСС приемника. С выходов трехосевого акселерометра и датчика угловых скоростей (ДУС) в микроконтроллер поступают соответственно проекции ускорений и угловые скорости аппарата. В свою очередь, микроконтроллер посылает сигналы на порты акселерометра и ДУС, которые получают тактовые импульсы с портов микроконтроллера. Доминирующим устройством остается микроконтроллер. Он будет заниматься обработкой поступившей информации. Полученные приемником управляющие сигналы поступают на микроконтроллер и передаются на сервомашинки и двигатель в режиме автопилота, либо микроконтроллер

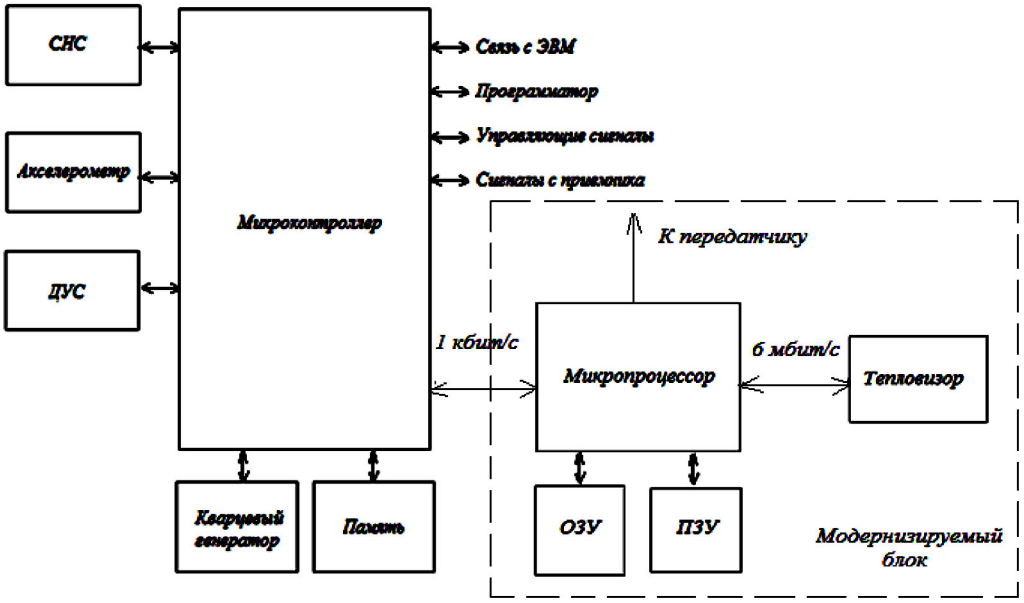


Рисунок 1.
Функциональная схема блока управления

формирует управляющие сигналы самостоятельно. Кварцевый резонатор необходим микроконтроллеру для обеспечения его работоспособности. Частота импульсов на кварцевом резонаторе подбирается из технических характеристик микроконтроллера. Связь с ЭВМ осуществляется через COM порт. Прошивка микроконтроллера осуществляется с помощью программатора. По результатам проектирования опытного образца БЛА можно сделать выводы:

- Блоки ИНС и автопилота должны размещаться в корпусе БЛА, а также иметь самостоятельное крепление на его борту;

- Все электрические параметры, представленные в техническом задании (ТЗ), должны быть реализованы на схемотехническом уровне, т.е. выходные характеристики используемой схемы должны находиться в допустимых пределах;

- При разработке конструкций блоков ИУС следует учесть требования по стандартизации, унификации и миниатюризации. Выбор конструктивных решений должен обеспечивать удобство эксплуатации и ремонтопригодности. Эффективным средством достижения этих целей является модульность конструктивного решения.

- Для подведения в блоки ИУС напряжения питания и подключения шины «земля» рекомендуется использовать крайние контакты электрических соединителей. Тип соединителя в ТЗ не указан, поэтому он должен выбираться с учетом назначения, количества контактов, требований механической и климатической устойчивости, защиты от других внешних воздействий, электрических параметров и стоимости;

- Информационные линии связи в пределах плат выполняют с помощью печатного монтажа. Проводники, расположенные на различных сторонах платы, должны перекрещиваться под углом 45 ° или 90 °. Проводники должны быть по возможности короткими, для того, чтобы свести к минимуму их сопротивление;

- Параметры и характеристики применяемой элементной базы и материала печатной платы должны соответствовать климатическому исполнению изделия и выполнять свои функции в заданных условиях эксплуатации;

- По технико-экономическим требованиям ИУС должна быть конкурентоспособной.

Основными преимуществами разработанного БЛА являются мобильность и компактность; высокая степень готовности к вылету (время подготовки комплекса к вылету, включая развертывание, проверку исправности оборудования и систем, ввод полетного задания и проведение в состояние стартовой

готовности не более 30 мин); разнохарактерность выполняемых задач; высокие летно-технические характеристики БЛА; простота в обслуживании и надежность в эксплуатации; быстродействие и качество обработки; подготовка специалистов на тренажерах собственной разработки; гарантийное обслуживание и дальнейшая техническая поддержка. БЛА уже столь широко распространены в мире, что актуальной становится проблема их совместного применения. Соответственно, необходимы единые стандарты каналов связи с БЛА. Работы над решением этой задачи еще продолжаются, однако уже сейчас можно подвести некоторые итоги, проанализировать общие требования к каналам связи с БЛА и определить наиболее перспективные пути их реализации

Развитие элементной базы в последнем десятилетии, прежде всего в области микромеханических инерциальных датчиков определило бурное развитие по всему миру коммерческих комплексов беспилотных летательных аппаратов (БЛА) для задач дистанционного зондирования земли и наблюдения. В условиях не сформированного спроса и соответственно рынка на данные продукты развитие осуществляется по различным направлениям: уменьшения массогабаритных характеристик, минимизация цены, совершенствование конструкции, совершенствование комплекса управления, повышение степени информационной автономности летательного аппарата. Последнее осуществляется за счёт совершенствования бортового комплекса управления (ПНК), прежде всего, в области его программного обеспечения.

На рисунке 2. представлена схема функционирования системы автопилотирования в составе ПНК в штатных условиях. Элемент ПО, решающий навигационную задачу непрерывно опрашивает навигационные датчики и подсистемы (например, спутниковую навигационную систему (ГНСС)). Результатом работы навигационного элемента системы формируется вектор решения, состоящий из линейных, угловых координат, а также скорости. В зависимости от реализации, в векторе состояния могут присутствовать данные о воздушной скорости, барометрической высоте, линейных ускорениях и т.д. Программное обеспечение самолётовождения осуществляет интерпретацию полётного задания (например, маршрута) и формирует необходимые для его выполнения сигналы на исполнительные устройства.

При разработке программного обеспечения самолётовождения для ПНК основной сложностью является его отладка. В общем случае она требует лётных испытаний и сопряжена с риском потери летательного аппарата в случае ошибок или исследованием математических моделей системы на ЭВМ. Для сравнительно простых формализованных постановок полётного задания отказ разработчика от моделирования может быть оправданным. Однако, для сложных многорежимных автономных систем отсутствие возможностей имитировать рабочие условия для ПО самолётовождения может многократно увеличить технические и финансовые риски проекта.

С учётом требований по централизации ПНК средства для имитации работы управляемого объекта должны закладываться в

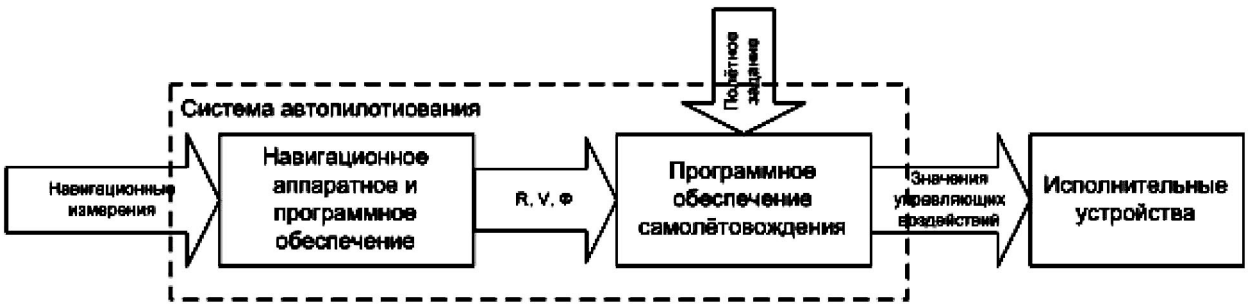


Рисунок 2.
Функциональная схема системы автопилотирования БЛА

бортовом программном обеспечении. Задачи непосредственного моделирования полёта могут решаться как на базе бортового вычислителя, так и на базе внешней системы. В случае с внешней системой необходимо решать задачу передачи параметров моделирования, а для внутреннего вычислителя необходим определённый запас вычислительных ресурсов. С учётом требований по массогабаритным характеристикам, а также из соображений снижения цены и электропотребления предлагается использование внешних средств моделирования полёта летательного аппарата (рис. 3.).

Предложенная структура тестирования бортового ПО накладывает требования при его разработке. Наиболее оптимальным видится подход, в котором навигационные алгоритмы могут свободным образом замещаться с реальных на виртуальные, которые являются фактически поставщиками информации с внешней моделирующей машины. Одновременно с навигационным вычислителем требуется замещать или дополнять механизмы вывода сигналов управления.

Технические требования к ПНК высотного БЛА

Высокие технические и эксплуатационные характеристики требования БЛА должны быть получены за счет:

- подбора оптимального ПНК для выполнения поставленных задач в условиях воздействия внешних факторов (ВФ);

- обеспечение технического зрения и распознавания объектов с использованием принципов выбора особенностей на каждом кадре (выбор меток для обработки информации);

- разработки специальных методов комплексирования (алгоритмы работы ПНК с дальнейшим преобразованием в программно-математическое обеспечение (ПМО)) , обеспечивающих определенную зависимость точности навигационных систем (НС), заявленной разработчиком, от дрейфа электронных компонентов;

- проведение имитационного моделирования работы итогового ПНК для проверки заявленных характеристик и выявления каких-либо особенностей данного изделия.

Требования по назначению

Изначально, АС делится на два типа:

- АС-30 – «ведущий» высотный БЛА, выполняющий функцию управления и контроля «ведомыми» высотными БЛА. Имеет ПНК с высокоточными системами для обеспечения корректной работы всей «группировки» высотных БЛА данного типа. Цифра «30» –масса полезной нагрузки;

- АС-100 – «ведомый» высотный БЛА, выполняющий функцию «исполнителя» - обе-

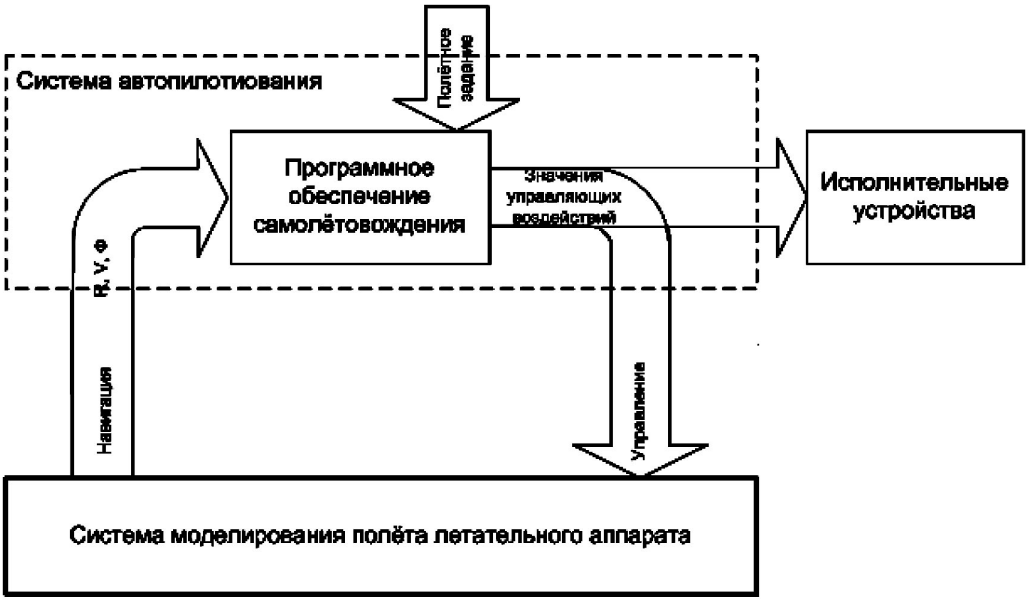


Рисунок 3.
Функциональная схема комплекса имитационного моделирования объекта управления для отработки программного обеспечения самолётовождения

спечивает выполнение задач наблюдение, картографирование и т.д. Имеет ПНК, спроектированный на основе микромеханических систем. Их точность на несколько порядков уступает точности систем «ведущего». По этой причине поправки от «ведущего» используются в алгоритмах КОИ «ведомого» для уменьшения погрешностей, выдаваемых системами «ведомого». Цифра «100» –масса полезной нагрузки.

Нормы на значения параметров и характеристик ПНК ведущего и ведомого АС должны соответствовать значениям из таблицы 1.

Требования по живучести и стойкости к воздействию внешних факторов

АС обоих типов, в частности их ПНК, должен быть стойким к воздействию механических и климатических воздействий ВФ, значения которых приведены в таблице 2. Учитывая то, что «рабочая зона» для обоих высотных БЛА общая, значения будут, приведенные ниже, будут справедливы, как и к АС-30, так и к АС-100.

Конструктивные требования на АС

Масса-габаритные параметры обоих АС представлены в таблице 3.

Таблица 1

Параметры и характеристики	Норма параметра для типа атмосферного спутника			
	АС - 30		АС - 100	
	Интегрированный режим ИНС+СНС	Без СНС	Интегрированный режим ИНС+СНС	Без СНС
Углы ориентации				
Прямолинейный полет,°	0.3	0.5	7	15
Маневрирование,°	0.7	1	15	30
Курс (путевой угол)				
Динамическая точность, °	0.5	2.5	3	30
Координаты, (м)	6*	500	25*	750
Путевая скорость, м/с	0.3	5	2	10
Вертикальная скорость, м/с	0.28	0.5	1.5	8
Выходные данные				
Частота выдачи, Гц	50	50	50	50
Протокол передачи	RS-232 (RS-422 опция)	RS-232 (RS-422 опция)	RS-232 (RS-422 опция)	RS-232 (RS-422 опция)
Холодный старт, с	30	30	30	30
Формат	бинарный	бинарный	бинарный	бинарный
Физические параметры ИНС				
Размеры, мм	125x80x57	125x80x57	125x80x57	125x80x57
Вес, кг	0.7	0.7	0.4	0.4
Электрические параметры ИНС				
Напряжение питания, В	12…27	12…27	12…27	12…27
Потребляемая мощность, Вт	2	2	2	2
Рабочие диапазоны изменения параметров движения				
Крен, °	±180	±180	±180	±180
Тангаж, °	±90	±90	±90	±90
Курс, °	0…360	0…360	0…360	0…360
Ускорение, °	±5g	±5g	±5g	±5g
Угловая скорость, °/*c*	±250	±250	±250	±250

Таблица 2

Наименование воздействующих ВФ, ед. измерения	Значения воздействующих ВФ	
	АС - 30	АС - 100
1.Синосиудальная вибрация	2 g (50...2000 Гц)	2 g (50...2000 Гц)
2. Механический удар	20 g (5 мс)	20 g (5 мс)
3. Линейное ускорение:	±5	±5
4. Атмосферное пониженное давление, Па (мм рт. ст.) – рабочее	30	30
5. Атмосферное повышенное давление, Па (мм рт. ст.)	760	760
6. Повышенная температура окружающей среды, град С: - при эксплуатации - при транспортировании	 75 80	 75 80
7. Пониженная температура окружающей среды, град С: - при эксплуатации -при транспортировании	 57 60	 57 60
8 . Изменение температуры, град С	80	80
9 . Влажность воздуха в рабочих условиях (относительная, %)	98%	98%
10. Максимальная рабочая высота, м	25 000	25 000

Таблица 3

Наименование параметра, ед. измерения	Норма параметра	
	АС - 30	АС - 100
Длина, м	16	17
Размах крыла, м	50	60
Пустой вес, кг	160	250
Крейсерская скорость, м/с	28	28
Срок службы, год	5	5
Дальность полета, км	438000	438000
Радиус покрытия, км	30	30

Описание «рабочего слоя» атмосферы, используемого для полета БЛА

В данном разделе рассказывается об уникальном по своим свойствам «рабочем слое» АС, из-за свойств которого и появилась возможность воплотить в жизнь данную модель БЛА.

Верхней границей тропосферы является тропопауза – изотермический слой. Их разделяет характерный вид грозовых облаков, вершина которых представляет собой «выброс» перистых облаков, называемых «наковальней». Эта «наковальня» как раз и «растекается» под тропопаузой, т.к. из-за изотермии восходящие потоки воздуха значительно ослабевают, и облако перестает развиваться по вертикали. Но в особых, редких случаях, вершины кучево-дождевых облаков могут вторгаться в нижние слои стратосферы, преодолевая тропопаузу.

Высота тропопаузы зависит от географической широты. Так, на экваторе она находится на высоте примерно 16 км, и ее температура составляет около –80°С. На полюсах тропопауза расположена ниже – примерно на вы-

соте 8 км. Летом ее температура здесь составляет –40°С, и –60°С зимой. Т.о., несмотря на более высокие температуры у поверхности Земли, тропическая тропопауза намного холоднее, чем у полюсов.

Учитывая то, что данный слой отличается стабильностью воздушной среды и постоянным доступом к солнечному свету в дневное время сток, нужно учесть при проектировании высотного БЛА определенные специфические факторы этой среды. Для обеспечения качественной работы «ведущего» АС нужно подобрать такой тип системы, который сможет выдержать сильные перепады температуры окружающей среды и резкий приток солнечной радиации. Последний фактор опасен тем, что при резком притоке большого количества солнечной света (при магнитных бурях на Солнце) электро-магнитное излучение может полностью уничтожить всю электронику на борту. По этой причине стоит обеспечит максимальную защиту от данного фактора с помощью изоляционного покрытия и резервирования некоторых элементов ПНК через приборы, не имеющих в своем составе электронику (в данной работе это Гировертикаль).

Список литературы

1. *Воронков Ю.С., Воронков О.Ю.*-Летательный аппарат с силовой установкой на солнечной энергии.

2. Новости космонавтики. -1995-2010.

3. http://alexeyvvo.livejournal.com/136687.html

4. https://nplus1.ru/news/2015/09/01/hale

5.http://www.militaryaircraft-airbusds.com/Aircraft/UAV/Zephyr.aspx

6. http://zilm.livejournal.com/334259.html

7. http://longfuture.org/outer-earth/haps/

8. http://sdnnet.ru/n/9454/

9.http://24gadget.ru/1161054881-atmosfernye-sputniki-solara-4-foto-video.html

10. http://polit.ru/article/2014/04/15/ps_titan/

11.http://www.sciencedebate2008.com/atmospheric-communication-satellites-or-drones/

12. http://www.sunlightphotonics.com/products

13.http://www.yuzhnoye.com/technique/innovative-technologies/solar-powered-high-altitude-unmanned-aerial-vehicle/

14.http://www.nanonewsnet.ru/articles/2015/aquila-novyi-bespilotnik-kompanii-facebook-kotoryi-budet-obespechivat-internet-pokryti

15.http://www.myshared.ru/slide/433183/

16.http://www.sdelalsam.su/modelist-konstruktor/2887-bespilotnik-svoimi-rukami.html

17.http://www.yuzhnoye.com/technique/innovative-technologies/solar-powered-high-altitude-unmanned-aerial-vehicle/

18. http://alexeyvvo.livejournal.com/136687.html

19. *Орлов Б.В., Мазинг Г.Ю., Рейдель А.Л., Степанов М.Н., Топчеев Ю.И.* - Основы проектирования ракетно-прямоточных двигателей для беспилотных летательных аппаратов.

20. https://wouterbulten.nl/blog/tech/lightweight-javascript-library-for-noise-filtering/

21.http://www.militaryaircraft-airbusds.com/Aircraft/UAV/Zephyr.aspx

22.http://www.aerospace-technology.com/projects/solara-50-atmospheric-satellite/

23.https://www.washingtonpost.com/business/economy/africa-you-will-have-facebook/2014/03/06/e7287b9c-a557-11e3-a5fa-55f0c77bf39c_graphic.html

24.http://www.turbosquid.com/3d-models/solara-50-aerospace-3d-max/816447

25.http://www.aerospace.org/publications/aerospace-books/communication-satellites-fifth-edition-2/

26.http://arstechnica.com/information-technology/2014/04/google-buys-atmospheric-satellite-builder-titan-aerospace/

27. Курс лекций – Эксплуатация приборов и систем ЛА. - Веремеенко К.К.

28. Курс лекций – Моделирование систем. – Антонов Д.А.

29. Курс лекций – Программное и алгоритмическое обеспечение ПНК. (Оптимальная коррекция ИНС от спутниковой системы – методичка по лабораторным работам. Авторы: Веремеенко К.К., Антонов Д.А., Жарков М.В., Забран А.Ю.)

30.http://ru.wikipedia.org/wiki/UAV

31. http://www.ispl.ru/Sistemy_upravleniya-BLA.html

32. http://teknol.ru/products/aviation/uav/

33. *Орлов Б.В., Мазинг Г.Ю., Рейдель А.Л., Степанов М.Н., Топчеев Ю.И.* - Основы проектирования ракетно-прямоточных двигателей для беспилотных летательных аппаратов.

34. *Власов И.Б.* Глобальные навигационные спутниковые системы.

35. Мобильный стенд для испытаний инерциальных датчиков систем управления ЛА. – Веремеенко К.К., Антонов Д.А.

УДК УДК 004; 535; 59.03; 62+65; 681.2; 519.178

ГРАФОВАЯ КОНВЕРГЕНЦИЯ НАУЧНОЙ ПРОЕКТНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНЖЕНЕРИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СИСТЕМНОЙ ИНЖЕНЕРИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ БОРА

Часть I. Инженерно-графовая методология процесса конвергенции инженерий

НЕМТИНОВ В.Б.

МГТУ им. Н.Э.Баумана, г. Москва.

E-mail: vbnemtinov@bmstu.ru, vnemtinov@mail.ru

На основе структурной теории (СТ) технических систем (ТС), исходные положения которой первоначально созданы для теоретического прообраза в виде СТ оптико- и лазерно-электронных систем (ОиЛзЭлнС), проведён сравнительный конвергентный анализ научной проектно-технической инженерии (НПТИ) системы и системной инженерии (СИ). Идентифицирована фундаментальная и прикладная роль инженерно-графовой методологии при описании факторно-модельного синтеза и факторизации системы в процессе конвергенции инженерий. Показано, что выбор одного из возможных путей, по которому пойдёт процесс синтеза системы, является общей задачей инженерий, которая лежит в основе конвергенции подходов НПТИ и СИ. Получено, что эту задачу каждая инженерия решает по-своему, но очевидные путеуказатели решения – это графовые маршруты НПТИ.

Найдено, что основным конвергирующим фактором графового языка в процессе конвергенции служит принцип дополнительности Бора. Исследованы маршрутные факторы графового языка конвергенции, задающие пути перехода от одного фактор-образа к другому с целью синтеза системы. Приведены примеры графовых моделей, представляющие собой прообразы соответствующих инженерно-технических, биологических и научно-физических предметных моделей. Построено модельное определение системы, которое служит фундаментом ***системно-модельного*** *подхода к разработке и апробации любых технических объектов. Идентифицирован фазис-факторный комплект из четырёх постановочных вершинно связных графов и введено орициклическое определение жизненного цикла промышленной системы в рамках НПТИ на основе эволюционного развития ФМС.*

Ключевые слова: системная инженерия, научная проектно-техническая инженерия, конвергенция, модельное определение системы, техническая система, оптико- и лазерно-электронная система, факторно-модельный синтез, факторизация, графовая модель, фактор, графовый маршрут, инженерно-графовая методология, жизненный цикл системы.

GRAPH CONVERGENCE OF SCIENTIFIC DESIGN-TECHNICAL ENGINEERING OF TECHNICAL SYSTEMS AND SYSTEMS ENGINEERING OF COMPLEX SYSTEMS BASED ON BOHR SUPPLEMENTARY PRINCIPLE

VLADIMIR B. NEMTINOV

Moscow State Technical University after N.E.Bauman, Moscow, Russia

E-mail: vbnemtinov@bmstu.ru, vnemtinov@mail.ru

Abstract. *A comparative convergent analysis of scientific design-technical engineering and systems en-gineering is carried out. The fundamental and applied role of the engineering-graph methodology in describing the factor-model synthesis and factorization of the system in the process of engineerings convergence is identified. It is shown that the choice of one of the possible ways in which the process of system synthesis will go is the common task of engineerings. It underlies the convergence of the approaches of scientific design-technical engineering and systems engineering. It is received that each engineering solves this problem in its own way, but the graph routes of scientific design-technical engineering are obvious indicators of the solution.*

It is found that the main convergent factor of a graph language in the process of convergence is the Bohr supplementary principle. The route factors of the graph language of convergence, which determine the ways of transition from one factor-image to another with the purpose of system synthesis, are studied. Examples of graph models representing the prototypes of corresponding engineering-technical, biological and scientific-physical object models are given. A model definition of the system is constructed, which serves as the foundation for a system-model approach to the development and approbation of any technical objects. A phase-factor set of four staged vertex-connected graphs is identified. Orcyclic definition of the life cycle of an industrial system in the framework of scientific design-technical engineering is introduced on the basis of the evolutionary development of the factor-model synthesis..

Keywords: systems engineering, scientific design-technical engineering, convergence, model definition of system, technical system, optical- and laser-electronic system, factor-model synthesis, factorization, graph model, factor, graph route, engineering-graph methodology, life cycle of system.

ВВЕДЕНИЕ

Усложнение способов организации создания инженерно-технических объектов, повышение степени ответственности за результаты, быстрое возрастание сложности возникающих при этом научных, технических и управленческих проблем и рост их масштабов привели к появлению в середине XX века новой прикладной системной методологии – системной инженерии (Systems Engineering). Первое русифицированное издание пионерской работы американских авторов Г.Гуда и Р.Макола по системной инженерии (System Engineering, 1957г.) вышло в 1962г. в издве СовРадио. В переводе книга называлось «Системотехника. Введение в проектирование больших систем» [1]. Но проектировать систему нельзя, т.к. система многолика и неизвестно, что такое несистема. На практике проектируют и изготавливают только реальные технические объекты («железки»). К ним относятся детали, узлы, компоненты, устройства, аппаратура и другие изделия, а также приборы, стенды, машины и комплексы. Возможно, поэтому в России системотехника впоследствии трансформировалась в разработку автоматизированных систем управления.

В трудах Библиотеки по системной инженерии Русского института системной инженерии весной 2017г. опубликовано второе русифицированное издание новой интересной и нужной для инженеров книги американских авторов А.Косякова, У.Свита, С.Сеймура и С.Бимера «Системная инженерия. Принципы и практика» объёмом 59,6 п.л. [2]. Дополнительную практическую инженерную ценность имеет «Толковый словарь по системной и программной инженерии» [3].

В книге «Systems Engineering" системная инженерия трактуется как фундаментальная инженерная наука, которая характеризуется широтой системного подхода, описывающего прикладную системную методологию сложных систем. При этом в её основе лежит *комплексный, мультидисциплинарный системный подход*, определяющий полный набор технических и управляющих воздействий для преобразования потребностей заказчика и существующих ограничений в эффективные инженерные решения с целью последующего поддержания этих решений в течение жизненного цикла изделия. Главная задача системной инженерии – руководить созданием сложных систем.

Тематика книги очень близка *научной проектно-технической инженерии* (НПТИ) систем, сформированной автором в рамках *«Структурной теории технических систем* (СТ ТС)». В основе НПТИ лежит системно-модельный подход, идентифицирующий инженерно-графовую методологию модельного синтеза системы [4]. Теория – это совокупность обобщённых положений, образующих какую-либо науку или её раздел и объясняющих с помощью общего принципа накопленные факты, давая возможность открывать и разъяснять новые факты. Научные положения СТ выработаны на основе научных результатов, полученных в процессе её построения. Среди них особую роль играют системно-модельный подход, НПТИ и инженерно-графовая методология модельного синтеза системы.

Одним из основных научных положений СТ ТС является научная проектно-техническая инженерия. Идентификация НПТИ сводится к созданию комплекта вершинно связных графов, описывающих глубинные графовые пути связности ТС, формирование которых опирается на процесс построения прямых и обратных вершинно-рёберных переходов от структурных формат-факторных заместителей объектов к применяемым модельным заместителям (моделям). В результате НПТИ оказывается в определённом смысле интуитивно-графовым аналогом системной инженерии, так как задаёт графы, определяющие модельный синтез технической системы в соответствии с ТЗ. Тем самым, НПТИ коррелирует с научными основами системной инженерии и помогает увидеть, как преимущества, так и её структурно-терминологические недочёты.

Известно, что нет ничего практичней хорошей теории, так как она представляет собой

систему основных идей в той или иной отрасли знания. Такой инженерной теорией является СТ ТС, которая первоначально возникла в виде СТ ОиЛзЭлнС на стыке классической поведенческой теории оптико-электронных систем и структуралистского направления общей математической теории систем [4]. Опираясь на графовую глубину научных положений структурной теории, которая идентифицирует инженерно-графовую методологию модельного синтеза системы в рамках системно-модельного подхода, выдающийся оптик России, проф. ГИПО А.Ф.Белозёров [5] выдвинул структурную теорию, как базовую теорию XXI века (века моделирования всего и вся). В итоге основное назначение НПТИ в рамках СТ сводится к синтезу конкретной ТС в результате идентификации определённой графовой конфигурации из формат-факторных маршрутов, наполненных моделями.

1. ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ РОЛЬ ИНЖЕНЕРНО-ГРАФОВОЙ МЕТОДОЛОГИИ В ПРОЦЕССЕ КОНВЕРГЕНЦИИ ИНЖЕНЕРИЙ

Совпадение трактовок задачи синтеза (создания) системы может быть положено в основу построения графовой конвергенции глубинной (в графовом смысле) научной проектно-технической инженерии и расширенной (в смысле сложности создания) системной инженерии. Иначе говоря, в результате взаимопроникновения инженерно-графовой методологии НПТИ и прикладной системной методологии сложных систем друг в друга возможно осуществление конвергенции глубины первой и широты второй инженерий. В этом плане НПТИ открывает возможность углубления методологии сложных систем в системной инженерии за счёт идентификации связности параметров и элементов системы на графовом языке. В свою очередь, системная инженерия значительно расширяет инженерно-графовую методологию НПТИ, показывая как создавать (синтезировать) произвольные сложные технические системы. При этом конвергенцию следует начинать с проведения сравнительного анализа факторов конвергенции на основе инженерно-графовой методологии модельного синтеза.

Таким образом, выбор одного из возможных путей, по которому пойдёт процесс синтеза системы, – это единая общая задача инженерий, которая лежит в основе конвергенции подходов научной проектно-технической инженерии и системной инженерии. Эту задачу каждая инженерия решает по-своему, хотя очевидные путеуказатели решения – это графовые пути НПТИ. Соответствующие маршруты в рамках инженерно-графовой методологии задают связную совокупность вершин и рёбер, которая синтезирует конкретную ТС.

1.1. Конвергирующие факторы графового языка конвергенции инженерий

Основным конвергирующим фактором графового языка в процессе взаимопроникновения инженерий друг в друга служит *принцип дополнительности Бора,* который является одним из очень важных достижений физики XX века. Принцип предложен датским физиком Нильсом Бором в 1927 при интерпретации основ квантовой механики. Идея дополнительности, выдвинутая Бором для обоснования наиболее общих принципов квантовой механики, аналоги этой идеи в классической физике, пути дальнейшего обобщения этой идеи, а также возможность ее применения вне физики рассмотрены в [6].

Бор полагал, что принцип дополнительности применим не только в физике, но имеет более широкую методологическую значимость. Он отвергает формальную логику, на основе которой строились теории XIX века (в том числе и марксизм). В прикладной трактовке принцип гласит, что если две теории отличаются друг от друга (или даже несовместимы), но каждая имеет свою «правоту», то следует не отвергать одну из них, не вести между ними непримиримую «классовую» войну на уничтожение противника. Надо попытаться в результате взаимопроникновения теорий друг в друга объединить, конвергировать обе теории, дополняя содержание каждой из них. Выдающиеся успехи физики XX

века подтверждают исключительную плодотворность такого подхода.

Не вызывает сомнения, что *структурно-поведенческая связность* элементов системы – это конвергирующий фундамент обеих инженерий, которая является основной характеристикой системы, ибо интуитивное представление о системе подразумевает обязательное наличие каких-то компонентов, находящихся в некотором отношении друг с другом. Связность системы при построении инженерий оценивается арностью алгебраических отношений между элементами и наиболее полно может быть описана на основе фундаментальных положений теории графов. Графы выражают сложные процессы разработки и апробации технических объектов в сжатой форме в процессе синтеза системы. Такой подход к синтезу (созданию) системы знаменует собой начало нового стиля системно-модельного мышления, который может быть положен в основу построения фундаментальных графовых постулатов процесса конвергенции инженерий. На современном уровне развития инженерий эффективное наглядное описание прямых и обратных структурно-поведенческих связей между моделями и элементами системы, задающих взаимопроникновение инженерий, осуществляется с помощью вершинно связных графов, состоящих из последовательности вершин и рёбер.

Любая мощная математическая идея имеет большой набор приложений. Сила теории графов – в её общности. Практическая польза теории графов – в создании определённой вершинной конфигурации в результате построения конкретных графов из формат-факторных элементов и моделей технических объектов, описывающих модельный синтез системы. Графовый язык СТ ТС задаёт геометрическое знаковое представление графовых моделей, которые идентифицируют различные разрабатываемые направления процесса синтеза системы. Потребность научной проектно-технической инженерии в графовом языке огромна. Язык – это факторная движущая сила. Он в результате введения новых рёберных связей расширяет набор графовых факторных вершин в процессе синтеза системы. Одновременно подвергаются усложнению и совершенствованию композиционные графовые факторные маршруты (путеуказатели), описывающие конвергенцию инженерий.

К сожалению, в «Системной инженерии» графовая методология практически не используется, хотя все рисунки в книге носят интуитивно графовый характер. В результате описание связности в «Системной инженерии» осуществляется на «*запутанном*» языке рисунков. Они имеют вид примеров, контекстов, таблиц, диаграмм, пирамид, процессов, методов, анализа ввода в эксплуатацию, триединства концепции, иерархии, архитектуры и т.п. Кое-где проскальзывают стадии, этапы, блок-схемы, схемные, спиральные, каскадные и другие концептуально-знаковые модели. И как бы случайно, возникают простейшие графы в виде трёх графовых деревьев решений и целей.

Поэтому процесс конвергенции инженерий должен начинаться с внедрения в системную инженерию фундаментальных и прикладных основ графовой методологии, включающей себя также строгие определения системы и процесса модельного синтеза. Теория графов – раздел дискретной математики, изучающий свойства графов и занимающийся их перечислением. Она продолжает развиваться, ибо содержит большое количество нерешённых проблем и пока недоказанных гипотез. Собственно граф представляет собой непустое множество вершин Vertex (V), иногда их называют узлами, и множество соединяющих рёбер Edge (E) или лучей, которое может быть пустым. Строго говоря, графом G называется бинарное отношение (пара) $G = \{V, E\}$, где V есть подмножество любого счётного множества, а E – подмножество декартова произведения $V \times V$ вершин. На рисунке изображения вершинных точек и рёберных линий графа воспроизводятся в относительно произвольном виде.

В структурной теории при описании элементов системы главную роль играют графовые V-вершины. Именно они являются

рабочими конвергирующими факторами графового языка. Вершины, с одной стороны, моделируют факторные элементы, а с другой стороны, в процессе синтеза системы наполняются связанными с ними моделями. Первые называются структурными формат-факторными FV-вершинами, а вторые – графовыми модельно-факторными MV-вершинами соответственно. Иногда для краткости их называют формат FV-вершинами и модельными MV-вершинами. С помощью вершин и соединительных E-рёбер формируются общие вершинно связные VE-графы (непустые) различной арности, задающие инженерно-графовую методологию НПТИ.

Графовый язык используется для описания связности формат FV-вершин и модельных MV-вершин с целью выработки оптимального VE-пути модельного синтеза. Алфавит языка состоит из комплекта десяти формат-факторных FV-вершин (см. п. 2.2) и ансамбля модельных MV-вершин. Они составляют содержание вершинного концептуального средства синтеза системы и применяются для построения различных композиционных форматов VE-путей.

Графовый контент СТ ТС показывает, что любой связный граф в виде чередующейся последовательности вершин и рёбер трактуется в теории как графовая целевая функция. Она является частным случаем общего вершинно связного VE-графа и представляет собой графовое обобщение классической инженерной целевой функции, обычно задающей массу, габариты и другие параметры изготавливаемого изделия. Графовая целевая функция, или вершинно связный граф из последовательности рёбер, соединяющий начальную V_0 и конечную V_t графовые вершины (вход и выход) в рамках синтеза системы и задающий пути построения и использования технических изделий, называется $(V_0 \rightarrow V_t)$E-маршрутом. Именно замкнутые орциклические $(V_0 \rightarrow V_t \rightarrow V_0)$E-маршруты в большинстве случаев лежат в основе инженерно-графовой методологии модельного синтеза системы. При этом в маршруте вершины и рёбра могут повторяться.

1.2. Идентификация структуры и поведения системы на основе графовых моделей

Оттеняя важность и наглядность инженерно-графовой методологии, показывающей великую прикладную силу графов, в приложении к трудам СТ ТС построен набор графовых моделей, демонстрирующих актуально-жизненные и научно-технические примеры практического применения графов. Фундаментальные и прикладные графы устанавливают структурную связность вершинных факторов, задающих различные объекты, и предъявляют потребителям возможные графовые переходы между ними. В частности, в НПТИ формируются графовые маршруты модельного синтеза ТС, задающие пути построения и использования научно-технических объектов.

В общем случае, научно-технические, физические, биологические, экономические, художественные и другие практические примеры использования графов, устанавливают наглядную рёберную связность вершинных факторов и указывают маршруты перехода между ними в виде графовых целевых функций. Маршруты задают пути, идентифицирующие актуальность, цель, научную новизну и практическую ценность любого исследования. Они визуализируют структурную рёберную связность вершинных образов реальных объектов и реализуют основную цель графа – задание путей перехода от одного фактор-образа к другому для решения конкретной задачи. В структурной теории выработано много научно-технических, актуально-жизненных биологических и высоконаучных физических графовых моделей. Прежде всего, очевидным примером графовой модели является идентификация работы интернет-системы на графовом языке в виде комплекта вершинно связных графов.

Нобелевскую премию по физике 2010 г. за новаторские эксперименты по исследованию двумерного материала графена получили выходцы из России А.Гейм и К.Новосёлов. Своё становление, как научные работники, они получили в России. Созданный ими графен – это моноатомный слой углерода,

представляющий собой лист из одного слоя атомов этого элемента, который наглядно визуализируется в виде планарной графовой модели.

Другим наглядным прикладным инженерно-техническим примером графовой модели является комплект маршрутов связности станций метрополитен-системы в современном мегаполисе (рис. 1). Вершинно связная графовая метрополитен-модель состоит из объединения подграфов, задающих линии движения поездов. Вершины общего связного VE-графа определяют станции, а рёбра графа задают маршруты движения поездов метрополитен-системы. Узлы пересадок описывают графовые гиперрёбра. На практике с помощью такого графа пассажир с лёгкостью строит оптимальный маршрут поездки и выбирает станции пересадок, даже не задумываясь о графовой природе рисунка в вагоне поезда метро.

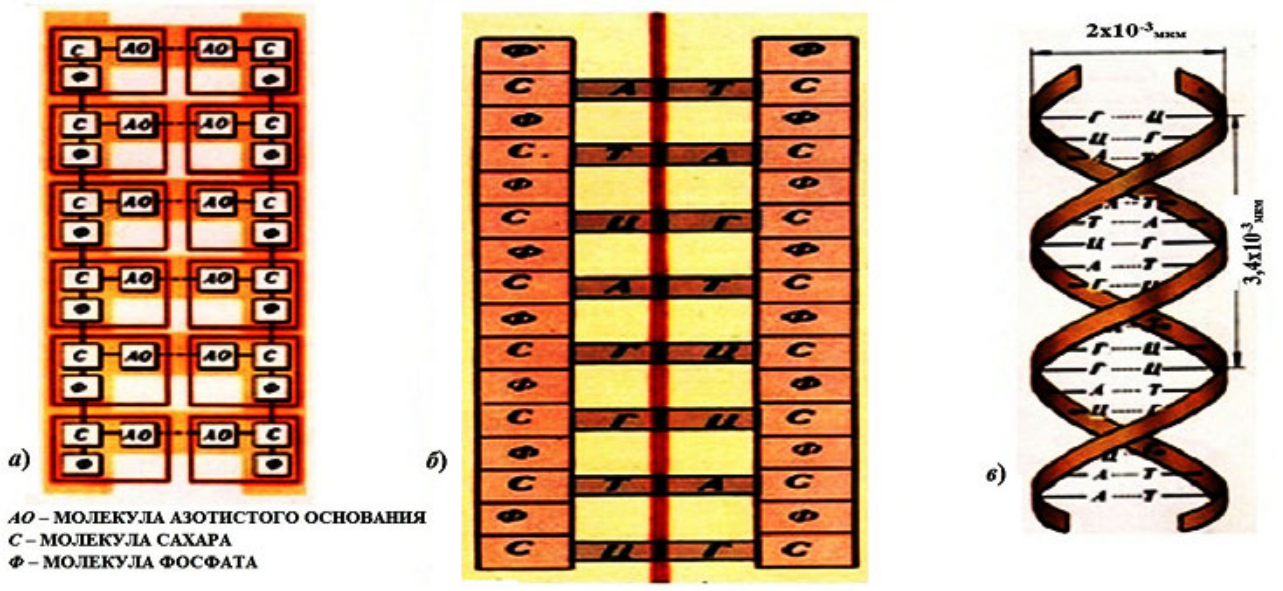
Нобелевские лауреаты по биологии 1953 г. Уотсон, Крик и Уилкинс открыли фундаментальную биологическую структуру молекулы ДНК.

Рисунок 1.
Цветной граф, идентифицирующий связность станций метрополитена.
Узлы пересадок задаются с помощью графовых гиперрёбер

На рис. 2 приведена графовая модель молекулярной ДНК-системы, которая содержит три научно-биологических подграфа, идентифицирующих её структуру.

Это открытие по праву считается одним из самых значительных в биологии XX века [7]. Один из основоположников молекулярной биологии, Крик, говорил – «Не знаешь функционального поведения, изучай структуру». Графы, задающие структуру молекулярной ДНК-системы, подтверждают эту простую, но гениальную мысль.

В настоящее время великая сила инженерно-графовой методологии хорошо видна на примере работы Нобелевских лауреатов по физике 2016 года. Премия присуждена Д.Таулессу, Д.Халдейну и М.Костерлитцу с формулировкой: за теоретические открытия топологических фазовых переходов и топологических фаз материи.



Реализации 3-м ДНК-графа в виде бинарной цепи. Вертикальные линейные компоненты цепи состоят из тернарных (тройных) нуклеотидных подграфов "Ф-С-АО" (рис. 3*а*).

Каждый тернарный нуклеотид содержит три графовые вершины: молекулу *фосфата* Ф, молекулу *сахара* С и молекулу *азотистого основания* АО). Бинарная цепь напоминает приставную лестницу, в которой вертикальные жерди (линейные цепи) состоят из бинарно связных *сахаро-фосфатных цепочек* С-Ф (рис. 3*а*). Четыре АО-вершины: *аденин А, гуанин Г, тимин Т* и *цитозин Ц* образуют бинарные графовые горизонтальные цепи, т.е. «перекладины» лестницы: *А—Т* или *Т—А*, либо *Г—Ц* или *Ц—Г* (рис. 3*б*). Другие цепи из АО-вершин не реализуются. Чередование пар («перекладин») *АТ, ТА, ГЦ* и *ЦГ* графовой «лестницы» (двусвязной цепи) и есть *генетический код*, идентифицирующий индивидуальный организм.

Реальная молекула ДНК имеет вид *3-м правого спирального графа* и похожа на винтовую лестницу (рис. 3*в*). Длина нитей молекулы ДНК из одной клетки – 1м. *Всего в теле человека имеется до 10^{11} км ДНК.* **Нобелевские лауреаты 1953г: Уотсон, Крик, Уилкинс**

Рисунок 2.
Графовая идентификация молекулы ДНК

Результаты работы проиллюстрированы на языке дискретной графовой топологической математики в трудах The Roal Swedish Academy of Sciences (см. рис. 3).

На рис. 3 приведена графовая модель физической материальной системы, задающая ступенчатые изменения топологических фаз материи. Модель состоит из двух научно-физических подграфов, идентифицирующих её структуру.

Во-первых, 10-ти вершинный вполне несвязный, или пустой (без рёбер), граф (рис. 3а) описывает фазовые переходы материи, связанные со ступенчатым нарушением непрерывности. Изменение топологических свойств материи из-за фазового перехода, которое приводит к её ступенчатой трансформации, для определённости показано в трёх вершинах. На шестом шаге происходит первый взрыв (Pow – бух) и образуется отверстие (Hole) (рис. 3а).

Первое нарушение непрерывности осуществляется при фазовом переходе от пятой вершины к шестой, когда шаровой объект, или чашка без ручки, трансформируется в чашку с ручкой, топологически эквивалент-

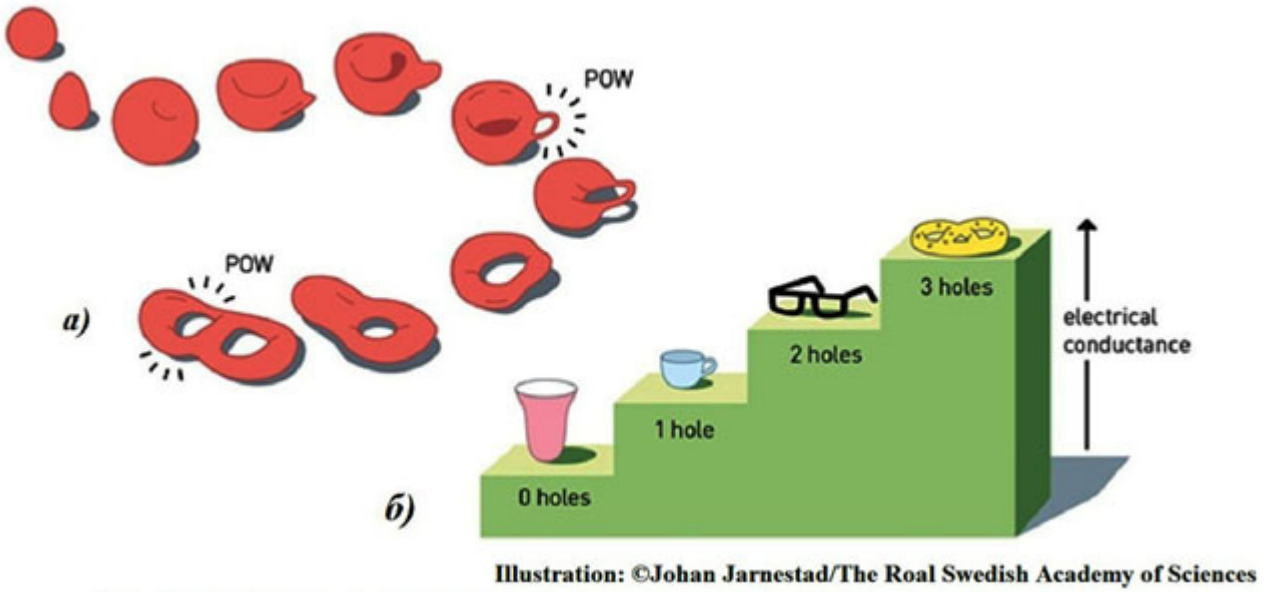


Рисунок 3.
Графовая идентификация топологических фазовых переходов материи на языке дискретной математики

ную тору (бублику). Второе нарушение, показанное на рисунке 3а, происходит на десятой вершине графа в результате взрыва, который приводит к ступенчатой трансформации тора (бублика) в топологический объект с двумя отверстиями, эквивалентный обычным очкам.

Во-вторых, на рис. 3б приведена 4-х вершинная графовая орцепь, аккумулирующая четыре ступенчатых ребра, которые задают фазовые переходы, определяющие ступенчатые изменения топологических фаз материи, в данном случае электропроводности (electrical conductance). Последовательность из четырёх вершин идентифицирует четыре фазовых состояния материи, соответствующих четырём топологическим объектам: без отверстий (Hole), с одним, двумя и тремя отверстиями соответственно.

Детальное описание результатов работы не является целью статьи. Следует только отметить, что работы нобелиатов позволили физикам лучше описать такие явления как сверхпроводимость, сверхтекучесть и магнетизм двумерных материалов (атомарно-тонких слоев). Объяснили, почему электрическое сопротивление в тонких слоях материи изменяется ступенчато с ростом индукции приложенного магнитного поля – целочисленный квантовый эффект Холла. Объяснили, почему электрическое сопротивление в тонких слоях материи изменяется ступенчато с ростом индукции приложенного магнитного поля – целочисленный квантовый эффект Холла.

В результате приведённая на рис. 3 графовая идентификация работы Нобелевских лауреатов, с одной стороны, преследует цель визуализации результатов на языке дискретной математики, делая наглядно доступными фундаментальные достижения для непосвящённых. С другой стороны, этот рисунок лишний раз подчёркивает великую научную силу графового языка. Графы устанавливают структурно-поведенческую связность вершинных факторов, которые в данном случае задают реальные топологические фазы материи и показывают исследователям результаты перехода от одного фактора к другому с помощью графовых целевых функций.

Топология – область математики, изучающая непрерывность различных материальных объектов и описывает явления, при которых переход от одного объекта к другому требует ступенчатых нарушений непрерывности. Эти нарушения описываются на графовом языке и приводят к ступенчатому изменению свойств системы. На основе такого подхода в работе [8] построена топологическая модель тернарного типа системы как

дискретного структурного критерия качества процесса преобразования сигналов.

Решение задачи создания конкретной системы сводится к построению графовых маршрутов, связывающих вершинные факторы. Поэтому в дальнейшем для выяснения практической значимости применения графовой методологии с целью *конвергенции инженерий* необходимо провести строгую идентификацию понятий системы и факторов, определяющих пути модельного синтеза в виде графовых целевых функций.

2. МОДЕЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ И ФАКТОРИЗАЦИЯ МОДЕЛЬНОГО СИНТЕЗА

В структурной теории технических систем введено строгое определение системы, а в «Системной инженерии» такое строгое определение отсутствует. К сожалению, в настоящее время в литературе практически не встречаются работы по «системному синтезу» при наличии очень большого числа публикаций по «системному анализу». Именно терминология системного анализа, или системного подхода, служит языком системной инженерии.

По мнению автора, применение такой терминологии обусловлено, как отсутствием строгого определения самой системы в рамках системного анализа, так и законченных концепций по созданию (синтезу) *связных* (задаваемых отношениями различной арности на множестве элементов), *холистичных* (целостных, неразрывных) и *эмерджентных* (обладающих новыми свойствами, отсутствующими в исходных элементах) систем. По-видимому, главной причиной этого является кризис математического моделирования систем, не позволяющий количественно описать процесс качественного перехода от создания изучаемого технического объекта к исследованию порождающего его системного прообраза и обратно. В то же время в инженерии такой переход очень важен, так как на практике инженеры имеют дело только с реальными техническими объектами («железками»). Именно технические объекты проектируют и изготавливают в процессе синтеза системы.

2.1. Определение системы

Система в английском языке трактуется очень широко [2,3]. Это, прежде всего, совокупность взаимодействующих элементов, организованная для достижения одной или нескольких установленных целей. При этом введённый в книге специфический термин «сложная система» допускает рассмотрение только таких систем, в состав которых входят разнородные объекты, связанные нетривиальным образом. Однако использование совокупности элементов в определении системы – это очень и очень расплывчатый фактор.

В самом деле, в настоящее время в литературе ни одно из определений системы не является общепринятым. Обычно в рамках классического инженерного подхода в системном анализе на достаточно высоком уровне общности, как например в приборостроении, под технической системой понимается целостная совокупность взаимосвязанных, взаимоупорядоченных и взаимодействующих технических объектов (ТО), т.е. элементов, устройств, аппаратуры и т.п., обладающих пространственной структурной или поведенческой замкнутостью [4]. Эта совокупность ТО выполняет определённую задачу для достижения поставленной цели. Причём эффект, достигаемый от такой совокупности, не является суммарным (эмерджентным) по отношению к каждому из её функционально завершённых элементов. Анализ поведения такой технической системы с целью её дальнейшего усовершенствования – главное условие научно-технического прогресса в приборостроении.

На практике инженерно-физическое содержание совокупности технических объектов идентифицирует конкретную реализацию технической системы (ТС). В рамках оптико- и лазерно-электронного инженерного ценза автора, когда речь идёт о совокупности оптико- и лазерно-электронных объектов, то ТС представляет собой ОиЛзЭлнС.

Приведённое общее определение системы

до сих пор часто используют в приборостроительной практике. Оно разъясняет в определённом смысле интуитивное восприятие ТС как прообраза сложного связного набора ТО. Однако в настоящее время это определение никак не может считаться удовлетворительным. Во-первых, любой преобразующий элемент суть новая подсистема. Во-вторых, что понимать под связями, упорядоченностью, взаимодействием и функциональной завершённостью элементов. В-третьих, что такое суммарный (эмерджентный) эффект.

В структурной теории технических систем при разработке строгого определения системы обходят попытки дать её явное толкование. Введение определения нового термина требует подвести исследуемое понятие под другое, более общее. Однако до бесконечности этого делать нельзя, так как слов у нас только конечное множество. Среди них, к сожалению, понятие, обобщающее систему, отсутствует.

С одной стороны, внутреннее описание системы складывается из того, что она *связна*, *холистична* и *эмерджентна*. С другой стороны, её внешнее описание показывает, что система многолика и неизвестно, что такое *несистема*. Поэтому в СТ с учётом такого представления о системе строят её косвенное определение, опираясь на аналогичную идентификацию неопределяемого в математике понятия множества. Множество задают на примерах. Говорят, есть букет цветов, табун лошадей, набор инструментов, комплект приборов и т.д. – всё это множества. После этого определяют свойства множеств и строят теорию множеств.

По аналогии с заданием множества в структурной теории на первый план выходит косвенное модельное определение системы. Её идентифицируют в результате задания модели, т.е. заместителя, некоторого в широком смысле образа. При этом изучаемая система считается заданной, если имеется какая-либо её предметная (материальная) или теоретическая (идеальная) модель, не обязательно математическая, т.е. формируется некоторый в широком понимании образ, заместитель.

Иначе говоря, любую систему в СТ, также как и множество в математике, задают с помощью примеров, которые в этом случае называются моделями. Таким образом, изучаемая техническая система считается заданной, если приведена какая-либо её модель. На начальной стадии модельной идентификации системы это обычно когнитивная, вербальная, концептуально-знаковая или какая-либо схемная модель [4].

Так как система многолика, то в СТ ТС в общем случае её идентифицируют в результате задания набора различных теоретических и предметных моделей, связность которых задаётся с помощью графовых маршрутов НПТИ. Авторы «Системной инженерии» исходят из того, что не существует стандартной универсальной классификации моделей и пользуются очень упрощённой (с точки зрения автора) классификацией, предложенной Бланшаром и Фабрицки [2]. Относительно более полная классификация моделей построена в [4] в рамках созданного связного метаграфа МГ системы MV теоретических и предметных моделей.

Построенная система модельных MV-вершин включает в себя когнитивные, мимико-жестикуляционные, вербальные, документные (концептуально-знаковые, схемные), математические (структурно-поведенческие, графовые, компьютерные, сетевые), технико-производственные и другие модели. Более того, особое значение имеет установление модельной связности технической системы и технического объекта (изделия) в рамках научной проектно-технической инженерии. Для этого в структурной теории задают модельное представление ТС с помощью физической предметно-технической модели (заместителя) в виде какого-либо готового объекта (см. рис. 1 - 3) или устройства, задающего конкретное изделие (например, стандартный образец).

В СТ ТС модельное определение системы служит фундаментом системно-модельного подхода к разработке и апробации любых технических объектов (в частности приборов) с последующей прогностической лик-

видацией. На основе системно-модельного подхода осуществляется связное наполнение формат FV-вершин модельными MV-представлениями систем и сигналов. В результате с помощью общего вершинно связного комплексного факторного VE-графа синтезируется холистичная и эмерджентная оптико- и лазерно-электронная система в [4]. Для описания поведения конкретной формат FV-вершины на основе замысла разработчика требуются определённые MV-модели. И обратно, каждая модельная MV-вершина ищет и находит для себя свою формат FV-вершину.

В структурной теории одной из основных теоретических моделей системы служит графовая математическая модель, визуализирующая процесс модельного синтеза с помощью последовательности графовых вершин в рамках научной проектно-технической инженерии. В соответствии с модельным определением системы графовые модели являются прообразами модельных представлений, которые идентифицируют структуру и поведение любых инженерно-технических, биологических и научно-физических предметных моделей. Примеры таких графовых моделей в виде соответствующих графов представлены на рис. 1 – 3.

Вершинно связная инженерно-техническая графовая метрополитен-модель на рис. 1 характеризует в определённом масштабе расположение станций, узлов пересадки и ориентацию маршрутов движения поездов с помощью объединения подграфов. Граф служит прообразом физических предметных моделей в процессе модернизации реального образа метрополитен-системы.

На рис. 2 показана графовая модель молекулярной ДНК-системы, которая содержит три научно-биологических подграфа, задающих её структуру. Графы являются прообразами различных молекулярных объектов, задавая пространственные аспекты связности компонентов в биологическом образе. В результате идентифицируются наследственные признаки биологических объектов.

Графовая модель физической материальной системы, описывающая фазовые переходы материи, связанные со ступенчатым нарушением непрерывности, приведена на рис. 3. Граф состоит из двух научно-физических подграфов, задающих ступенчатые изменения топологических фаз материи. В результате модель служит прообразом реальных топологических объектов, в которых происходят ступенчатые изменения электропроводности.

Таким образом, в рамках системно-модельного подхода рассмотренные примеры разных графовых моделей демонстрируют эффективность использования модельного определения системы. Оно лежит в основе модельного синтеза системы и индуцирует процесс её создания (творческого выдумывания, угадывания), как разработку последовательности модельных фактор-образов по аналогии с творческим написанием стихов, картин, музыки. В результате поэтапного построения этих модельных образов в процессе проектирования и апробации технического объекта на производстве изготавливают конкретное изделие.

К сожалению, в «Системной инженерии» из-за ограниченности методологии системного подхода, используются неудачные «антисистемные» (с точки зрения автора) термины: проектирование, построение, разработка, сборка, изготовление и производство системы. Они не отражают физико-технический смысл инженерии. Так как неизвестно, что такое несистема, то это означает, что проектирование и все другие указанные действия можно применять к любым объектам – от амёбы до любви. Хотя на практике, как отмечено выше, в технике проектируют и создают только «железки». В то же время эффективность применения методологии системно-модельного подхода СТ в системной инженерии проявляется уже в том, что все характеристики системы, суммированные в [3], естественным образом укладываются в рамки введённого в структурной теории модельного определения системы.

В дальнейшем, с целью результативного использования модельного определения си-

стемы в процессе конвергенции инженерий, необходимо строить графовую иерархию характеристических факторов синтеза системы. Для этого надо распространить инженерно-графовую методологию инженерного процесса модельного синтеза системы на создание комплекта формат-факторных FV-вершин и ансамбля модельных MV-вершин.

2.2. Инженерно-графовая методология процессов факторно-модельного синтеза и факторизации системы

В настоящее время научные основы в современном промышленном производстве практически отсутствуют. Для их разработки и факторизации (разделения, выделения, разложения) в рамках СТ ТС используются научные положения теории, представляющие собой формулировки основных результатов, полученных в процессе её построения, и имеющие научное объяснение. При этом графовая факторизация научных основ производства, которая сводится к выделению отдельных формат-факторов, осуществляется с помощью одного из основных научных положений структурной теории в виде научной проектно-технической инженерии. Она базируется на идентификации глубинных графовых маршрутов, задающих структурные формат-факторы технической системы в рамках комплекта вершинно связных графов. В частности, заглядывая в глубину маршрутов НПТИ, можно увидеть структурно-терминологические недочёты системной инженерии, обусловленные поверхностной идентификацией формат-факторной связности.

В структурной теории комплект вершинно связных графов НПТИ формируется на основе принципа графового единства структурной и поведенческой связности между любыми V-вершинами [9]. Именно вершины образуют конвергирующий рабочий факторный фундамент графового языка. Для их разделения необходимо в рамках системно-модельного подхода разработать факторный алфавит языка, содержащий комплект формат-факторных FV-вершин и ансамбль модельных MV-вершин. Алфавит представляет собой систематизированное концептуальное средство для синтеза технической системы из графовых формат-факторов и моделей и лежит в основе построения различных глубинных графовых VE-путей связности элементов, описывающих конвергенцию инженерий. Применение алфавитных формат-факторов и введение предметных и теоретических моделей, задающих структурно-поведенческую связность параметров (сигналов) и элементов НПТИ ТС приводит к трансформации инженерного процесса модельного синтеза технической системы в расширенный факторно-модельный синтез (ФМС). Иначе говоря, процесс построения концептуально-графовых рёбер, или лучей, связности между структурными физико-техническими фактор-объектами, задающими систему, и теоретическими модельными вершинами, которые используются для наполнения фактор-объектов поведенческим содержанием, называется ФМС технической системы. Он служит структурно-поведенческим фактор-ядром теории и формирует определённую графовую конфигурацию комплекта НПТИ из формат-факторных маршрутов, наполненных моделями.

В результате ФМС конкретной ТС сводится к построению графовых маршрутных переходов от структурных факторов синтеза системы к моделям и обратно и задаёт языково концептуальную структурно-поведенческую связность физико-технических объектов и моделей. В процессе ФМС идентифицируются прямые и обратные графовые переходы от структурных формат-факторных FV-заместителей объектов к применяемым MV-моделям. Вводимые графовые маршруты задают связные пути, которые выражают сложные процессы разработки и апробации технических объектов в наглядном графовом виде.

Антиподом ФМС комплекта вершинно связных графов НПТИ является его факторизация. Она сводится к декомпозиции комплекта графов в сумму графовых маршрутов с целью выделения строительных «маршрутных фактор-блоков». В дальнейшем фактор-блоки используются с целью графовой факторизации научных основ современного про-

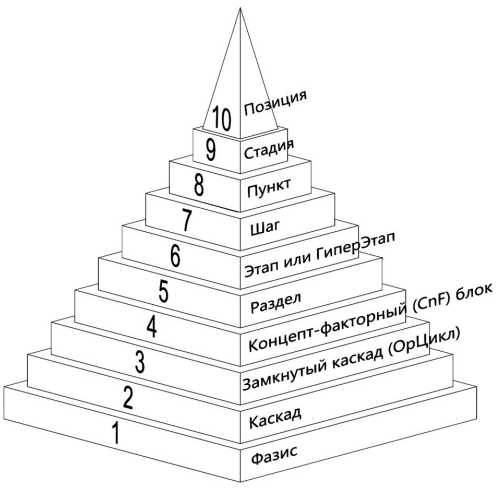
мышленного производства. В свою очередь, в основе факторизации, или факторинга [9], лежит последовательное углублённое отыскание структурных формат-факторных FV-вершин и модельно-факторных MV-вершин в маршрутных фактор-блоках. В итоге факторинговой трансформации образ набора состоит из суммы относительно простых маршрутов, которые при объединении формируют исходный прообраз. При этом факторинг выявляет сильные и слабые графовые маршруты, используемые для оптимизации путей ФМС.

Для эффективного применения инженерно-графовой методологии как для ФМС, так и для факторизация комплекта вершинно связных графов НПТИ необходимо, опираясь на модельное определение системы, построить систематику алфавитных FV-вершин и модельных модельных MV-вершин в виде формат-факторов.

Построение набора формат-факторных вершин начинается с идентификации F-фактора. В общем случае, фактор F (factor) – это широкое понятие, применяемое в разных областях научного знания. Он трактуется, как движущая сила, причина произвольного процесса, задающая его характер или отдельные черты, в частности процесса синтеза системы. В инженерной практике фактором может быть: 1) модель (в частности ММ и особенно графовая ММ); 2) основополагающий принцип, или научное положение; 3) явление, определяющее какие-либо изменения в изучаемой системе; 4) пример, подтверждающий обоснованность выбранного подхода; 5) связь; 6) условие; 7) существенное обстоятельство; 8) коэффициент или сомножитель в разложении и т.п.

F-факторы используются для построения всех вершинно связных VE-графов различной арности, применяемых в процессах ФМС и факторизации системы. Для идентификации в рамках создаваемой научной проектно-технической инженерии конкретных вершинно связных VE-маршрутов на основе F-факторов (в частности главного маршрута в виде жизненного цикла) в структурной теории вводят набор из десяти последовательно переходящих друг в друга структурных формат-факторных FV-вершин различной иерархии (см. рис. 4):

а) Децимарная простая ОрЦепь$_{10}$, идентифицирующая иерархию вложения друг в друга формат FV-вершин факторного модельного синтеза (ФМС) технической системы от фазис-фактора 1 до фактор-позиции 10



б) Трёхмерная геометрическая модель (3м ГмтМ), идентифицирующая децимарную иерархическую формат факторную Пирамиду. Она задаёт последовательную рубрикацию из 10-ти вложенных друг в друга формат FV-вершин от исходного фазис-фактора 1, определяющего фундаментальную цель ФМС технической системы, до завершающей детализацию ФМС фактор-позиции 10

Рисунок 4.
Графовые структурные формат-факторные FV-вершины структурной теории технических систем

1) Фазис, 2) Каскад (ПодФазис), 3) Замкнутый каскад (ОрЦикл), 4) Концепт-факторный (CnF) блок (ПодКаскад), 5) Раздел (ПодCnF), 6) Этап или ГиперЭтап (ПодРаздел), 7) Шаг (ПодЭтап), 8) Пункт (ПодШаг), 9) Стадия (ПодПункт), 10) Позиция (ПодСтадия).

Построение FVE-маршрутов в процессах ФМС и факторизации системы начинают с идентификации набора несвязных унарных формат FV-вершин. Соответствующие пустые (∅) формат факторные FV∅-маршруты в этом случае не содержат E-рёбер и являются простейшими вполне несвязными графовыми ММ (маршрутными фактор-блоками). Пример такого вполне несвязного фактор-блока в виде «вершинной картинки» приведён на рис. 3*а*.

С одной стороны, формат-факторные FV-вершины могут иерархически следовать друг за другом в результате построения линейных маршрутов в процессах ФМС и факторизации системы (рис. 4а).

С другой стороны, FV-вершины могут быть пирамидально вложены друг в друга с целью идентификации гиперграфовых и ультраграфовых вершинно связных VE- композиционных маршрутов (рис. 4б).

Отправным иерархическим F-фактором служит графовая модель в виде фазис-фактора. Модель представляет собой научный проектно-технический вершинно связный комплексный фазис-факторный VE-граф из совокупности технических формат-факторных FV-вершин и физических модельно-факторных MV-вершин.

В результате фазис-фактор включает в себя тематическую совокупность структурно-поведенческих VE-подмаршрутов.

Термин графовый «фазис-фактор», или отдельный момент (положение, научная стадия) в состоянии синтеза, применяется в СТ для идентификации отправного факторного понятия в виде научной стадии (фазиса), реализующего завершение процесса ФМС или факторизации технической системы.

В технике выделяют шесть гостовских проектных стадий разработки технического изделия: НИР, техническое предложение (аванпроект), эскизный и технический проект, рабочая КД и ОКР. Введение в структурной теории фазис-фактора поднимает этот термин в понятийном плане над шестью стандартными рубрикациями. Иначе говоря, системный фазис-фактор является практическим выходом НПТИ в рамках структурной теории, который задаёт фундаментальный результат применения инженерно-графовой методологии в процессах ФМС или факторизации системы.

Таким образом, инженерно-графовая методология процессов ФМС и факторизации системы опирается на идентификацию связности FV-моделей и MV-моделей. Она сводится к построению рабочих научно-технических фактор-блочных FVE-маршрутов и модельных MVE-маршрутов с целью задания формат-факторной и модельно-факторной структурно-поведенческой связности в рамках комплексных вершинно связных VE-графов различной арности.

Необходимо заметить, что созданная инженерно-графовая методология процессов ФМС и факторизации технических систем хорошо коррелирует с широко развитым графовым подходом в радиоэлектронике и вычислительной технике.

На практике развитие современных оптико- и лазерно-электронных приборов всегда следовало и следует за развитием радиоэлектронных приборов, причём с существенным временным отрывом. Поэтому автору до сих пор не удалось встретить с учётом образовательного ценза в трудах по оптотехнике ни одной работы по ФМС и факторизации ОиЛзЭлнС не только в России, но даже за рубежом.

Оппоненты часто упрекают автора в том, что в статьях ссылки даются только на собственные работы. Но похожих работ, в которых затрагивались бы вопросы методологии факторно-модельного синтеза системы, не было, пока не появилась замечательная книга «Системная инженерия». Правда в ней синонимом синтеза системы является её создание.

2.3. Фазис-факторный комплект из четырёх постановочных вершинно связных графов научной проектно-технической инженерии

Процесс создания НПТИ сводится к формированию комплекта графовых маршрутов, которые определяют пути построения новых технических объектов и использования изготовленных изделий. Особую роль в создании НПТИ играют четыре постановочных каскад-этапных графа, формирующих фазис-факторный маршрутный комплект (см. рис. 5).

Он иллюстрирует структурно-поведенческую сущность применения ($V_0 \rightarrow V_t$) Е-маршрутов в инженерно графовой методологии процессов ФМС и факторизации системы. Накопленный опыт разработки и апробации технических объектов показывает, что все четыре каскад-этапных графа

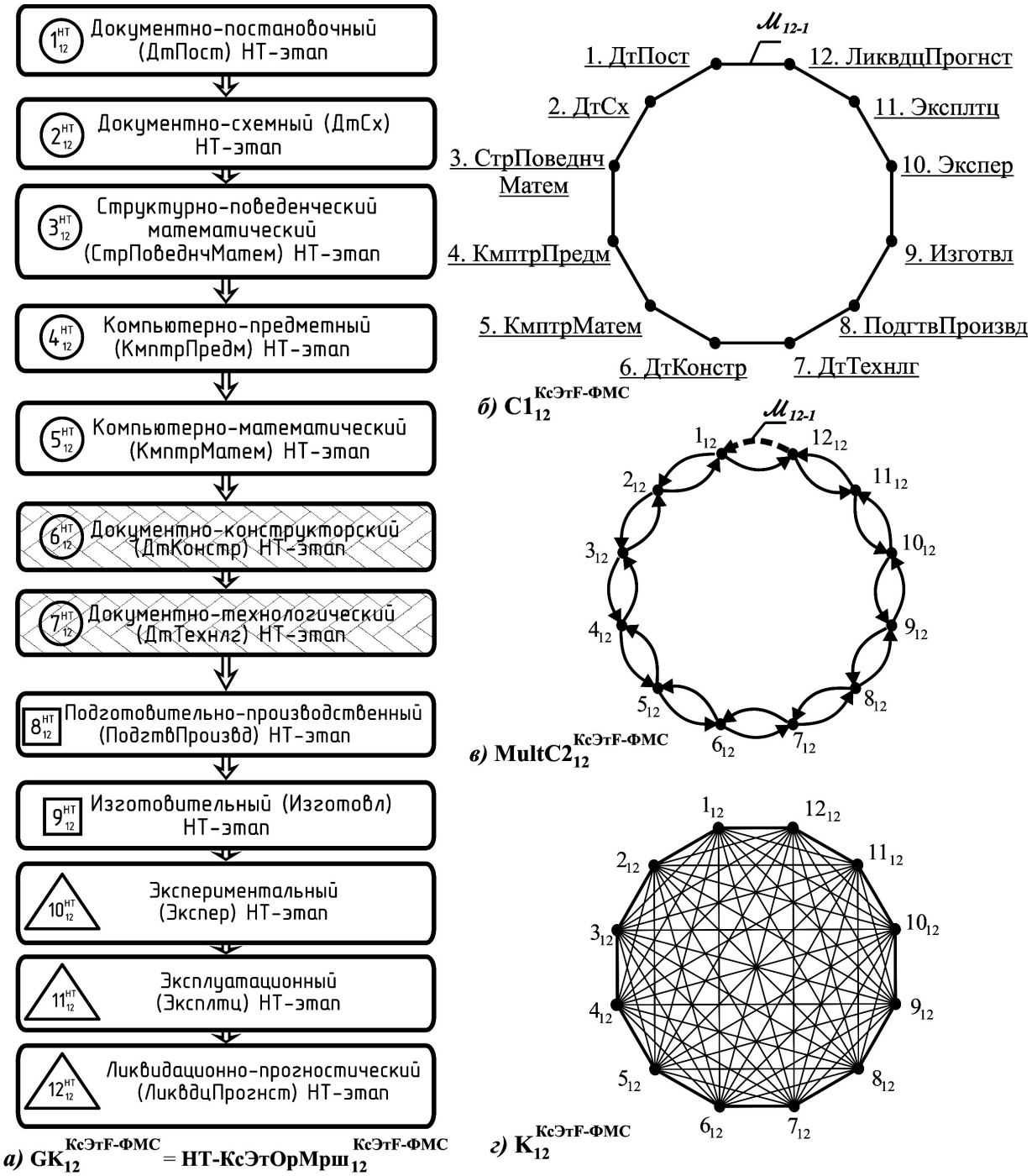


Рисунок 5.
Фазис-факторный комплект из четырех вариативных 12-ти этапных графов научной проектно-технической инженерии

фазис-факторного маршрутного комплекта состоят из 12-ти научно-технических (НТ) этап-факторных вершинно связных графов, которые введены и детально исследованы в работах [9,10].

На рис. 5а приведена каноническая дуодецимарная каскадно-этапная орцепь факторно-модельного синтеза $GK_{12}^{КсЭтF\text{-}ФМС}$. Орцепь представляет собой научно-технический простой каскадно-этапный ориентированный маршрут НТ-КсЭтОрМрш$_{12}^{КсЭтF\text{-}ФМС}$, или главную производственную двенадцатиэтапную орграфовую целевую функцию (1 «» 12) НПТИ. В процессе выработки инженерно графовой методологии процессов ФМС и факторизации системы в рамках каскадно-этапной орцепи визуализируют прообразы разработки и апробации технических объектов с помощью графовых этапных компонент [9,10].

Каскадно-этапная орцепь представляет собой простую VE-вариацию формат-факторного FVE-маршрута, состоит из трёх производственных концепт-факторов CnFк (к = 1 - 3), начинается с когнитивного замысла нового объекта и заканчивается изготовлением и эксплуатацией работающего технического устройства с возможностью последующей прогностической ликвидации. Первый квинтарный научный постановочно-схемный математический нематериальный концепт-фактор CnF_1 содержит пять НТ-этапов: ДтПост, ДтСх, СтрПоведнч Матем, КмптрПредм и КмптрМатем.

Второй концепт-фактор CnF_2 представляет собой бинарную конструкторско-технологическую связку нематериального научного CnF_1 и материального производственного CnF_3. Он состоит из ДтКонстр и ДтТехнлг НТ-этапов и завершает процесс расширенного объектно-технического проектирования. Проектирование – это искусство, а концепт-факторы CnF_1 и CnF_2 визуализируют проектное искусство, рассматривая его в виде зеркального образа этих двух маршрутов каскадно-этапной орцепи.

Третий квинтарный технический изготовительно-апробирующий материальный концепт-фактор CnF_3 включает в себя пять НТ-этапов: ПодгтвПроизвд, Изготвл, Экспер, Экспер и ЛиквдцПрогнст. Он завершает каскадно-этапную орцепь постановкой альтернативной задачи ФМС системы: либо ликвидация изготовленного изделия, либо его дальнейшая прогностическая модернизация.

Таким образом, три концепт-факторных маршрута из графовых этапных FV-вершин в каскадно-этапной орцепи (см. рис. 5а) рубрицируют процесс ФМС технической системы. С одной стороны, в рамках концепт-факторов осуществляется наполнение этапных FV-вершин определёнными видами рабочих MV-моделей. Для этого устанавливаются прямые модельно-этапные связи (модель – этап) ансамбля графовых MV-вершин с комплектом графовых FV-вершин. С другой стороны, введение обратных этапно-модельных рёберных связей (этап – модель) показывает, какие модельные MV-вершины необходимо находить или строить внутри модельного ансамбля для подпитки структурных FV-вершин. В результате последовательно-параллельного перебора этапных FV-вершин и модельных MV-вершин в рамках НПТИ осуществляются переходы, которые с позиций инженерно графовой методологии идентифицируют, систематизируют, формализуют и автоматизируют процессы ФМС и факторизации технической системы.

Особое значение имеет глубинная идентификация графовых маршрутов связности FV-вершин. Эффективное наглядное описание прямых и обратных структурных вершинных связей на современном уровне развития НПТИ осуществляется в результате построения циклических графов. При этом графовые рёбра задают ориентацию бинарных межэтапных маршрутных связей каскадно-этапной орцепи, определяющей ФМС крупной промышленной системы и описывающей научные основы современного промышленного производства.

Трансформация каскадно-этапной орцепи $GK_{12}^{КсЭтF\text{-}ФМС}$ в канонический циклический граф $C_{12}^{КсЭтF\text{-}ФМС}$ осуществляется с помощью моста обратной связи $\mathcal{M}_{12\text{-}1}$, связывающего двенадцатый и первый этапы цикла

(вход и выход ФМС). Графовый цикл (см. рис. 5б) представляет собой упорядоченный циклический маршрут из 12 прямых и 12 обратных (заданных по умолчанию) рёберных связей, включая мост $\mathcal{M}_{12\text{-}1}$, который строит циклическое замыкание каскадно-этапного маршрута НТ-КсЭтОрМрш12$^{\text{КсЭтF-ФМС}}$. Получаемый каскад-этапный циклический ($V_1 \rightarrow V_{12} \rightarrow V_1$)Е-маршрут имеет вид дуодецимарного (арности 12) замкнутого графа, который идентифицирует двенадцатиэтапную графовую целевую функцию (1«» 12 «» 1) в виде концептуально-графового синтез-прообраза технической системы. Построенная целевая функция задаёт жизненный цикл (ЖЦ) промышленной системы в рамках НПТИ на основе эволюционного развития ФМС.

С учётом ориентации рёбер на рис. 5в построен цветной циклический мультиорграф MultC212 $^{\text{КсЭтF-ФМС}}$. Он содержит 12 прямых и 12 обратных явно заданных мультиорсвязей каскадно-этапного маршрута НТ-КсЭтОрМрш12$^{\text{КсЭтF-ФМС}}$, из них две замыкающие (12 «» 1) с учётом моста $\mathcal{M}_{12\text{-}1}$.

Для идентификации всех 66-ти прямых и 66-ти обратных (заданных по умолчанию) бинарных межэтапных графовых рёберных связей в рамках каскадно-этапного ФМС на рис. 5г введён полный граф K12 $^{\text{КсЭтF-ФМС}}$.

Таким образом, построенный фазис-факторный комплект из четырёх постановочных вершинно связных графов НПТИ подчёркивает практическую ценность инженерно графовой методологии процессов ФМС и факторизации ТС. Графы иллюстрируют примеры идентификации ($V_0 \rightarrow V_t$) Е-маршрутов, которые строятся в рамках НПТИ с целью создания и использования новых технических объектов. Формируемые (*m* «» *n*)-маршруты оттеняют аспекты ЖЦ промышленной системы и визуализируют структурную рёберную связность графовых вершинных образов реальных технических объектов, задающих пути перехода от одного формат-факторного FV*m* -образа системы к другому FV*n* -образу для решения конкретной задачи синтеза научных основ современного промышленного производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведён сравнительный анализ научной проектно-технической инженерии (НПТИ) технической системы и системной инженерии (СИ) сложной системы с целью их конвергенции, опираясь на принцип дополнительности Бора. Взаимопроникновение инженерий друг в друга происходит естественным образом в силу общности их основных научных положений. Конвергирующим фундаментом обеих инженерий является графовый структурно-поведенческий язык связности формат-факторных элементов в процессе синтеза системы.

Сегодня в институтах и на производстве учёные и инженеры часто говорят на разных языках. Однако в результате конвергенции инженерий на основе инженерно-графовой методологии процессов факторно-модельного синтеза (ФМС) и факторизации системы с помощью системно-модельного подхода, созданного в рамках структурной теории технических систем (СТ ТС), происходит сближение этих языков.

Совокупность, или комплекс, принципов инженерно-графовой методологии формирует факторно-графовую структурно-поведенческую связность языков науки и производства и позволяет вывести инженерию из современного инертного состояния. Получение знаний в результате перехода к динамическому процессу синтеза системы опирается на идентификацию её научно-технического поведения.

Структурная теория, да и никакая другая теория, не скажет, как создать новый технический объект (прибор, машину, стенд и т.п.). Создание технического объекта было, есть и будет искусством, доступным только истинным творцам. Принято считать: тот, кто изобрёл колесо, был идиотом, но изобретатель трёх остальных – гений. Это путеводный творческий контент автора.

Главное «графовое колесо» – это системно-модельный подход, как основа инженерно-графовой методологии НПТИ, разработанный в СТ ТС. Три дополнительных «графовых колеса» в виде принципа графового

единства структурной и поведенческой связности между любыми графовыми вершинами с учётом прямых и обратных связей, факторно-модельного синтеза и факторизации системы отчасти реализованы на рис. 5.

Системную инженерию часто называют прикладной системной методологией XXI века. С этим нельзя не согласиться. Это фундаментальная наука с очевидной широтой идентификации инженерии для сложных систем, которая учитывает рост масштабов и усложнение способов организации деятельности по созданию инженерных объектов в рамках системного подхода. Главная задача системной инженерии – руководить созданием сложных систем.

К сожалению, НПТИ технических систем, созданной в рамках структурной теории, пользуются очень немногие. Хотя от системной инженерии её существенно отличает графовая глубина системно-модельного подхода. Недаром Белозёров А.Ф. [5] выдвинул структурную теорию, как базовую теорию XXI века (века моделирования всего и вся). Он опирался на графовую глубину научных положений структурной теории, которая описывает инженерно-графовую методологию модельного синтеза системы в рамках системно-модельного подхода. В итоге основное назначение НПТИ в рамках структурной теории сводится к синтезу конкретной технической системы в результате идентификации определённой графовой конфигурации из формат-факторных маршрутов, наполненных моделями.

Ограниченность использования НПТИ, по мнению автора, связана с тем, что хотя в нашей стране фундаментальная наука ещё есть, но интерес к ней ограничен. Эта мысль соответствует контенту творчества автора, у которого имеется свыше 50 работ по этой тематике. Пример восприятия в стране СТ ТС показывает, что новое в российской науке – непонятно очень многим, потому что оно новое. А когда всё понятно, то возникает только один вопрос, что здесь нового.

Собственный опыт показывает, что гораздо легче следить за ходом мыслей, которые давным-давно известны, чем понять и осмыслить принципиально новую идею. Но классический пример в виде дуализма света наглядно показывает, что для понимания фундаментальной проблемы одной рациональной логики совершенно недостаточно. При этом развитие истории доказывает: то, что вчера представлялось неправильным и ненужным, сегодня – норма. Поэтому в основе модернизации науки с необходимостью должен лежать отказ от традиции непонимания.

Для выяснения роли и значения соответствующей инженерии проведено сравнение широты системного подхода, описывающего прикладную системную методологию сложных систем в СИ, и глубины системно-модельного подхода, характеризующего графовые пути связности в НПТИ технических систем. Конвергентная близость системного и системно-модельного подходов, которые опираются на структурно-поведенческую связность формат-факторных элементов системы, лишний раз подчёркивает необходимость идентификации процесса взаимопроникновения друг в друга СИ и НПТИ. Итогом оказывается *комплексная инженерно-графовая методология процесса конвергенции инженерий,* в рамках которой строят принципиально новые маршруты синтеза. С одной стороны, они увеличивают графовую сложность синтеза технической системы на основе широты системного подхода, разработанного в СИ. С другой стороны, новые маршруты учитывают глубину системно-модельного подхода в НПТИ.

В рамках идентификации инженерно-графовой методологии ФМС на основе формат-факторного комплекта графов (см. рис. 5) дано описание маршрутов перехода от одного формат-фактора к другому. Визуализируемые переходы лежат в основе сравнительного анализа трактовок жизненного цикла (ЖЦ) системы в обеих инженериях. Жизненный цикл промышленной системы в НПТИ индуцирует маршрутный мост от науки к серийному производству технических изделий через конструкторско-технологическую связку (рис. 5а), задавая глубину ФМС си-

стемы и конвергируя с широтой прикладной системной методологии сложных систем.

Жизненный цикл – это специальная графовая модельная структура (рис. 5б – 5г), идентифицирующая пути, которые показывают, как доводить результаты научного исследования до реального сектора экономики. Снижение конкурентоспособности выпускаемой продукции обусловлено недооценкой высшей инженерной школой и отечественной промышленностью ведущей роли конвергирующих друг с другом научной проектно-технической и системной инженерий. С помощью ЖЦ в структурной теории осуществлена глубинная графовая идентификация тернарной (триадной) связной парадигмы «инвестиции – инновации – производство», задающая инновационно-ориентированный экономический потенциал крупного промышленного предприятия.

В начале на первом шаге формирования экономического потенциала в [11] построена принципиально новая графовая модель, формирующая двухслойную бинарную парадигму «затраты – выпуск» в рамках научно-технического и затратного экономического поведения крупной промышленной системы. Полная графовая конвергенция жизненных циклов НПТИ и СИ будет проведена в дальнейшем.

Список литературы:

1. *Г.Гуд, Р.Макол.* Системотехника. Введение в проектирование больших систем. Пер. с англ. под ред. Г.Н.Поварова. – М.: СовРадио, 1962. – 383с.

2. *А.Косяков, У.Свит, С.Сеймур, С.Бимер*. Системная инженерия. Принципы и практика. Пер. с англ. под ред. В.К.Батоврина. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 634с.

3. *В.К.Батоврин*. Толковый словарь по системной и программной инженерии: учеб. пособие для вузов. М.: ДМК Пресс, 2012. – 280с.

4. *В.Б.Немтинов*. Докторская диссертация на тему «Структурная теория и математическое моделирование ОиЛзЭлнС» 2004 // http://www.dissercat.com/content/strukturnaya-teoriya-i-matematicheskoe-modelirovanie-optiko-i-lazerno-elektronnykh-sistem#ixzz2stxrYkAa.

5. *А.Ф.Белозёров.* Оптика России. Очерки истории и развития. – Казань: Центр инновационных технологий, 2013. – Т. 2 – 612с. // Раздел 11.3.6. Структурная теория оптико- и лазерно-электронных систем, созданная В.Б.Немтиновым: научные основы современного оптико-электронного приборостроения. С. 515-522.

6. *Б.Г.Кузнецов.* Принцип дополнительности. – М.: Наука, 1968. – 88с.

7. *Л.В.Тарасов.* Этот удивительно симметричный мир. – М.: Просвещение, 1982. – 176с.

8. *В.Б.Немтинов, С.А.Кузнецов, В.Ю.Сериков.* Структура и качество процесса преобразования сигналов в оптико- и лазерно-электронной системе. Ч.I. Качество ППС и топологическая модель тернарного типа системы как структурного критерия качества. – Контенант ©, 2016, т 15, №1. С. 39-54.

9. *В.Б.Немтинов, В.Ю.Сериков*. Графовая идентификация научной проектно-технической инженерии для разработки и апробации оптико- и лазерно-электронных приборов. – Контенант ©, 2015, т 14, №2. С. 3-19.

10. *В.Б.Немтинов, В.Ю.Сериков*. Структурно-графовая методология в задачах анализа и синтеза оптико-электронных систем. – Контенант ©, 2014, т 13, №4. С. 12-26.

11. *В.Б.Немтинов, А.П.Патрикеев, В.Ю. Сериков.* Графовая идентификация инновационно-ориентированного потенциала крупного промышленного предприятия в области оптико- и лазерно-электронного приборостроения. // Сб. тезисов докладов ВНТК «Инновационные проекты в оптико-электронном приборостроении». ПАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева». 2016. С. 141-143.

КИТАЙ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

ПЕЛИХ С.А., доктор экономических наук, профессор

Академии управления при Президенте Республики Беларусь, г. Минск

E-mail: dashkevich_alesya@mail.ru

Глобальный системный кризис, сменивший длительный экономический подъем развитых стран, является закономерным проявлением длинных волн экономической активности, известных как «волны Кондратьева». В основе каждой из них лежит жизненный цикл соответствующего технологического уклада – воспроизводящейся целостной системы технологически сопряженных производств. Кризис военно-политический является, в свою очередь, проявлением смены системных циклов накопления, в основе каждого из которых лежит свой институциональный мирохозяйственный уклад: система взаимосвязанных институтов, обеспечивающая расширенное воспроизводство, в том числе воспроизводство капитала и определяющий механизм глобальных экономических отношений. Наложение этих двух циклических процессов в фазе кризиса создает опасный резонанс, угрожающий разрушением всей системы мировых экономических и политических отношений.

В процессе смены технических и мирохозяйственных укладов происходит глубокая структурная перестройка экономики на основе принципиально новых технологий и новых механизмов воспроизводства капитала. В такие периоды, как показывает опыт мирового развития за последние пять веков, происходит резкая дестабилизация системы международных отношений, разрушение старого и формирование нового миропорядка. Исчерпываются возможности социально-экономического развития на основе сложившейся системы институтов и технологий. Лидировавшие до этого страны сталкиваются с непреодолимыми трудностями в поддержании прежних темпов экономического роста. Перенакопление капитала в устаревающих производственно-технологических комплексах ввергает их экономику в депрессию, а сложившаяся система институтов затрудняет формирование новых технологических цепочек. Такие цепочки – вместе с новыми институтами организации производства – пробивают себе дорогу в других странах, прорывающихся в лидеры экономического развития.

Для удержания своего лидерства развитым странам и их лидеру США приходится активизировать силовую составляющую своей внешней политики и экономики. Не случайно в периоды смены технологических укладов резко возрастает военно-политическая напряженность, повышаются риски крупных международных конфликтов. Назидательным примером может служить трагический опыт двух предыдущих структурных кризисов мировой экономики.

Третий технологический уклад «угля и стали» был преодолен милитаризацией экономики, результатом которой стала ее технологическая перестройка на основе широкого использован я двигателя внутреннего сгорания и органической химии, переход на нефть в качестве основного энергоносителя

и на автомобиль как ведущее транспортное средство. Переход экономики ведущих стран мира на новый четвертый технологический уклад проходил через катастрофу Второй мировой войны, повлекшей за собой кардинальное изменение всего мироустройства.

Депрессия середины 1970-х – начала 1980-х годов, обусловленная исчерпанием потенциала этого технологического уклада, повлекла за собой гонку вооружений с широким использованием информационно-коммуникационных технологий, которые составили ядро нового пятого технологического уклада. Последовавший в след за этим коллапс мировой системы социализма, не сумевшей своевременно перевести экономику на новый технологический уклад, позволил ведущим капиталистическим странам воспользоваться ресурсами бывших социалистических стран для перехода на новую длинную волну экономического роста. Вывоз капитала и утечка умов из бывших соцстран, колонизация их экономик облегчили структурную перестройку экономики стран ядра мировой капиталистической системы во главе с США в качестве эмитента основной резервной валюты.

Исчерпание потенциала роста пятого технологического уклада стало причиной глобального кризиса и депрессии, охватившей ведущие страны мира в последние годы.

Уже видны ключевые направления развития нового шестого технологического уклада, рост которого обеспечит передовым странам подъем экономики на новой длинной волне: биотехнологии, основанные на достижениях молекулярной биологии и генной инженерии, нанотехнологии, системы искусственного интеллекта, глобальные информационные сети и интегрированные высокоскоростные транспортные системы «зеленой» экономики, энергетика на возобновляемых источниках.

В настоящее время новый технологический уклад переходит из эмбриональной фазы развития в фазу роста. Его расширение сдерживается как незначительным масштабом и неотработанностью соответствующих технологий, так и неготовностью социально-экономической среды к их широкому применению. Однако несмотря на кризис, расходы на освоение новейших технологий и масштаб их применения растут с темпом около 20-35% в год [1]. Падение цен на нефть является характерным признаком завершения периода «родов» нового технологического уклада и выхода его на экспоненциальную часть траектории роста за счет бурного распространения новых технологий, кардинально повышающих ресурсоэффективность и снижающих энергоемкость производства.

Именно в такие периоды глобальных технологических сдвигов у остальных стран возникает возможность для экономического рывка к уровню передовых стран, пока последние сталкиваются с перенакоплением капитала в устаревших производственно-технологических комплексах. В частности, для Китая, который быстро наращивает свои конкурентные преимущества, последовательно осваивая все новые технологические переделы и приближаясь к передовому фронту НТП. Для Беларуси и России, упустивших возможности лидерского прорыва на основе информационно-коммуникационного технологического уклада в 1970-1980-е годы прошлого века, следствием чего стало разрушение СССР, этот вызов носит экзистенциальный характер. Либо нам удастся воспользоваться окном возможностей технологического прорыва на новую длинную волну экономического подъема, либо повторный проигрыш очередной научно-технологической революции собьет нас на обочину мирового экономического развития.

В настоящее время на наших глазах в Китае и других быстро растущих странах Юго-Восточной Азии формируется новая, более эффективная по сравнению с американо-европейской социально-экономическая система, адекватная требованиям нового технологического уклада.

Американоцентричная модель глобальной либерализации достигла пределов своего развития и вошла в фазу саморазрушения под воздействием внутренних диспропорций. Поэтому ее следует считать отживающей и устаревшей по отношению к производствен-

ным отношениям, формирующимся в Китае и других странах ядра нового векового цикла накопления.

Спецификой последнего является его гуманитарный характер – крупнейшими отраслями экономики становятся здравоохранение, образование, наука и культура, на долю которых в совокупности вскоре будет приходиться около половины ВВП. В силу общественного характера этих отраслей, обладающих большим внешним эффектом, не подлежащим приватизации в современном демократическом обществе, развитие нового технологического уклада требует намного большего участия государства, чем это наблюдалось в развитии предыдущих. Сегодня оптимальным считается доля государственного участия в системе образования около 80%, в здравоохранении – около 60%, в культуре – не менее 30%. Эти отрасли не могут функционировать исключительно на коммерческой основе, значительная часть работающих в них организаций имеют некоммерческий характер, что существенно затрудняет их кредитование в расчете на прибыль. Для их развития нужны значительные государственные ассигнования в инфраструктуру, субсидии, долгосрочные дешевые кредиты.

Образующие китайскую социалистическую экономику институты государственного планирования, бюджетирования, субсидирования и ценообразования намного лучше подходят для целей развития нового технологического уклада. С подъемом Китая, Индии, Вьетнама вслед за Японией и Кореей все более явственно просматриваются контуры перехода от англо-американского к азиатскому мирохозяйственному укладу с совершенно иной, соответствующей интересам устойчивого и гармоничного развития человечества системой институтов, открывающей дорогу новому вековому циклу накопления капитала. Решение Китая о прекращении наращивания своих долларовых резервов обозначило предел бесконфликтного разрешения противоречия между расширенным воспроизводством американских долговых обязательств и глобальными инвестиционными возможностями. Это означает завершение начатой еще с начала реформ стратегии построения собственной национальной денежно-кредитной системы, которая разительно отличается от построенной с помощью американцев монетарной системы в России, Беларуси и других странах СНГ.

Например, монетизация экономики Китая составляет 140% от ВВП, отсутствует свободная конвертация валюты и долларизация экономики, так как населению запрещены все операции в зарубежной валюте.

Очень эффективной является институциональная структура регулирования экономики. Прежде всего – в государственном контроле за основными параметрами воспроизводства капитала посредством механизмов планирования, кредитования, субсидирования, ценообразования и регулирования базовых условий предпринимательской деятельности. Государство при этом не столько приказывает, сколько выполняет роль модератора, формируя механизмы социального партнерства и взаимодействия между основными социальными группами. Чиновники не пытаются руководить предпринимателями, а организуют совместную работу делового, научного, инженерного сообщества для формирования общих целей развития и выработки методов их достижения. На это настраиваются и механизмы государственного регулирования экономики.

Государство обеспечивает предоставление долгосрочного и дешевого кредита (под 1-3% годовых), а бизнесмены гарантируют его целевое использование в конкретных инвестиционных проектах для развития производства. Государство обеспечивает доступ к инфраструктуре и услугам естественных монополий по низким ценам, а предприятия отвечают за производство конкурентоспособной продукции.

Китайский подход к построению рыночной экономики кардинально отличается от постсоветского своим прагматизмом и творческим отношением к реформам. В их основе лежат не догматические шаблоны и лозунги,

исходящие из идеологических и оторванных от реальности представлений о социально-экономических процессах, а практика управления хозяйством. Подобно инженерам, конструирующим новую машину, китайские руководители последовательно отрабатывают новые производственные отношения через решение конкретных задач, проведенных экспериментов, отбор лучших решений. Терпеливо, шаг за шагом они строят свой вариант экономики, постоянно совершенствуя систему государственного управления на основе отбора только тех институтов, которые работают на развитие экономики.

Это можно проиллюстрировать опытом деятельности нынешнего руководителя Китая Си Цзиньпина. Начав свою деятельность секретарем уездного комитета Чжэндин провинции Хэбэй – одном из беднейших уездов беднейшей провинции – создал «китайский Голливуд», где снято более 170 фильмов и ежегодно приезжает до 1,5 млн человек. Задумав учредить в своем отсталом уезде научно-производственный центр, он лично отыскал сотни инженеров и известных ученых и убедил их приехать в «глубинку». 15 июня 1985 г. став заместителем секретаря парткома г. Сямэнь в провинции Фуцзянь он разрабатывает «Стратегию социально-экономического развития Сямэня на 1985 – 2000 гг.». Согласно ей было развернуто обширное жилищное строительство. За три года работы под суд отправились более 400 кадровых работников, были налажены прямые контакты власти с населением.

Первые опыты стратегического планирования были продолжены после назначения Си Цзиньпина в 1990 г. секретарем парткома г. Фучжоу, крупного промышленного центра Китая. Была создана программа развития региона на 3, 8 и 20 лет вперед, причем эта программа неуклонно выполнялась. Здесь же он впервые внедрил систему «одного окна».

В 2000 г. он стал губернатором провинции Фуцзяни, где сразу создал «руководящую группу по повышению эффективности органов власти – ситуационный штаб, лишенный бюрократических ограничений и наделенный дополнительными полномочиями для решения конкретных проблем. Впервые в Китае была начата работа по обеспечению безопасности продуктов питания, что привело в итоге к созданию в провинции «экологического рая», где качество воды, воздуха и ситуация в целом оценивается на «отлично». Его успехи были оценены, и в 2002 г. он стал руководителем богатой провинции Чжэцзян, четвертой по объему ВВП в стране. Тут же появилась Программа создания могучей морской провинции Чжэцзян. Началось освоение тысяч островов, десятки тысяч удобных для развития аквакультуры бухточек и отмелей. Темпы роста экономики моря приблизились к 20% в год и она стала давать 8% ВВП провинции. В 2003 г. Си Цзиньпин начал реализацию программы «тысяча деревень образцовых и 10 тысяч деревень упорядоченных».

В сельской местности появились коммунальные службы, началась система раздельного сбора мусора и его переработка. Параллельно он организовал строительство гигантского моста общей протяженностью 35,7 км через Ханчжоуский залив. Мост сократил путь от Шанхая до порта Нинбо с 400 км до 80 км. Провинция в 2005 году заняла первое место в Китае по состоянию окружающей среды, доходы населения приблизились к отметке 4000 долл. США в год. Это был пик карьеры молодого руководителя и он завершился в 2007 г. его переводом руководить г. Шанхаем. Через 7 месяцев на проходившем в октябре 2007 г. XVII съезде КПК он был избран одним из девяти членов Постоянного комитета Политбюро ЦК, а на XVIII съезде КПК 2012 г. он был избран Генеральным секретарем партии.

Китай становится мировым инженерно-технологическим центром. Доля китайских инженерно-технологических и научных работников в их мировой численности достигла в 2007 году 20%, удвоившись по сравнению с 2000 годом с 1420 и 690 тыс. соответственно. К 2030 г., по прогнозам китайских ученых, в мире будет насчитываться 15 млн. инженеров и научных работников, из которых 4,5 млн. человек (30%) будут из Китая. К 2030 г.

Китай по объему затрат на научно-технические разработки выйдет на 1 место в мире, и его доля составит 25% от общемировых затрат на эти цели.

Китайское экономическое чудо впечатляет. За три десятилетия реформ, инициированных Дэн Сяопином, Китай добился впечатляющих успехов. Из глубокой периферии мировой экономики он шагнул в число лидеров, выйдя к 2014 г. на первое место в мире по объему ВВП и экспорту высокотехнологической продукции. За три десятилетия объем ВВП вырос в Китае в 30 раз (с 300 млрд. долл. США до 9 трлн. долл. США по текущему курсу юаня к доллару, а по паритету покупательской способности валюты – до 18 трлн. долл. США), промышленного производства – в 40-50 раз, валютные резервы – до 4 трлн. долл. США.

Апологеты рыночного фундаментализма стараются не замечать ключевых элементов китайского подхода к реформам. Вместо того, чтобы взять китайский опыт на вооружение, они придумывают «объективные объяснения» быстрого роста китайской экономики то иностранными инвестициями, то имитацией западных технологий, то перетоком дешевых трудовых ресурсов из отсталого сельского хозяйства в городскую промышленность, забывая о главном: почему все эти процессы оказываются ошеломляюще эффективными с финансово-экономической точки зрения и не приводят к серьезным социальным конфликтам.

Сложившиеся в Китае производственные и общественно-политические отношения следует рассматривать не как переходные к «западным стандартам», а как переходные для самой передовой в этом столетии социально-экономической системы.

Поэтому Беларуси надо брать курс на «встраивание» всей социально-экономической системы в орбиту Азиатского центра накопления с центром в Китае.

Что же касается реализации инициативы главы Китая Си Цзиньпина по строительству «Экономического пояса Великого шелкового пути», то стороны Беларуси предложили к реализации разработанные, но не начатые инвестиционные проекты по развитию трансконтинентальной транспортной инфраструктуры – железнодорожных, автомобильных магистралей и авиационных коридоров. Очень перспективным является проект по созданию в районе аэропорта Минск-2 мощного узлового, мультимодального логистического центра перевозки товаров из Китая в Европу по мощности аналогичному аэропорту Инчхон в Южной Корее. Он обеспечивает перевозку 100 млн. пассажиров в год и 8 млн. тонн грузов. Он признан узловым логистическим центром, так как перевалка грузов составляет 50% оказываемых услуг и это обеспечивает половину объема национального экспорта и импорта. Аэропорт планирует превратить свои окрестности в «Аэрогород» – это новая многоаспектная концепция, которая объединяет в себе пространство для логистики бизнеса, отдыха и развлечений. Это позволит Беларуси получить до 25 млрд. долл. вклада в ВВП страны.

Список литературы:

1. *Глазьев, С.* Нанотехнологии как ключевой фактор нового технологического уклада в экономике. – М. : Тровант, 2009.