

КОНТЕНАНТ

ISSN: 2307-5767

Том 17, № 2, 2018

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Учредитель и издатель – Общественная научно-техническая академия «Контенант»

Издается с 2002 г.

СОДЕРЖАНИЕ	
Остроумов И. З-я научная рота КВ ВКС	3
НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПТИКЕ	
Ярлыков Д.И. Разработка модуля ввода/вывода для использования в перспективной оптико-электронной аппаратуре Грунтовский Г.И., Парамонов А.А., Литвинов С.А.	9
Использование космоса в военных целях: история и современность	21
Хальметов Д.Н., Жук Ю.А. Современная навигация космических мобильных роботов с использованием алгоритма визуальной одометрии	26
Бобриков А.А. Развитие методов обнаружения нефтяных пленок на мор- ской поверхности, на основе поляризационных измерений в видимой области спектра	32
Ширчков Д.А. Развитие метода анализа матричной диаграммы инфоло- гической модели предметной задачи	34
Баженов И.А. Основные проблемы и пути решения подготовки персонала оборонно-промышленного комплекса российской федерации	38
Сидоренко А.А., Деревянко Д.Н. Разработка ядра системы числового программного управления намоточно-выкладочных станков	41
Борбенчук А.С., Чернышев А.О., Балданов Д.Ш. Реализация алгоритма измерения объемной твердости конструкционных материалов методом динамического индентирования	48
Николаев С. А., Хорохоров А. М. Физические основы колориметрического метода контроля документооборота	54
Квитка В.Е., Клюшников М.В., Блинов В.Д. Алгоритмы шумоподавления, реализуемые в бортовой аппаратуре	56
Борбенчук А.С., Чернышев А.О. Оценка твердости материалов современными методами	63
РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	
Пясецкий В.Б., Гавриченкова А.А. Методика оценки качества видеокамер с фотоэлектриче- скими сенсорами на основе стандарта EMVA 1288	61



КОНТЕНАНТ

ISSN: 2307-5767

Том 17, № 2, 2018

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Учредитель и издатель – Общественная научно-техническая академия «Контенант»

Издается с 2002 г.

СОДЕРЖАНИЕ					
(продолжение)					
Погонышев А.О., Ширанков А.Ф. Методика аберрационного синтеза лазерных оптических систем	68				
Азарова В.В., Лобанов П.Ю., Мануйлович И.С., Сидорок О.Е. Установка для контроля обратного рассеяния на зеркалах					
кольцевых Не-Nе лазеров	74				
ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ					
Абдулкадыров М.А., Дружин В.В., Лазарева Н.Л., Патрикеев В.Е., Пуряев Д.Т., Семенов А.П. Интерферометр для многофункционального оптического					
контроля	80				
Кузьмичев А.М. Филиал АО «РКЦ «ПРОГРЕСС» – НПП «ОПТЭКС»					
Семенов А.П., Патрикеев В.Е., Пуряев Д.Т., Дружин В.В.					
Интерферометр для контроля выпуклых гипероолоидов	89				
Виноградов М.А., Денисов Д.І., Патрикеев В.Е., Семенов А.П.					
Технология производства и метод контроля астрономического зеркала с гиперболическим профилем поверхности – «М1»	94				
ИСТОРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ					
Полянский В.В., Денисов Д.Г., Патрикеев В.Е., Семенов А.П.					
Гехнология производства и метод контроля асферического астрономического зеркала с облегчённой конструкцией	100				
Введенская А.В., Введенский В.В. Гинс М.С., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф.					
Спектральные методы контроля состояния сельскохозяй- ственных растений	107				



БОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКИХ СИЛ



НАУЧНАЯ РАБОТА 3 научной роты КВ ВКС за 2017-2018 год

За прошедший период военнослужащие вели активную работу в сфере разработок в интересах КВ ВКС, результаты которой были представлены на различных научных мероприятиях, конференциях, симпозиумах, выставках.

25 мая в ОАО РТИ им. А.Л. Минца прошла V Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития информационно-управляющих систем, РЛС ВЗГ дальнего обнаружения, интегрированных систем и комплексов информационного обеспечения ВКО и комплексов управления и обработки информации».



Команда 3 научной роты на Международной олимпиаде по информатике

Операторы 3-й Научной роты ефрейтор Резов А.С., рядовой Самбаров Г.Е., рядовой Акимов Е.В., рядовой Шуваев И.Н., рядовой Лебедев И.И., рядовой Яковчук Е.А., рядовой Васенков С.Н., рядовой Распутин М.С., рядовой Сигов А.С., представили шесть работ.

19 мая 2017 года в Бауманском университете прошла I молодежная конференция «Космическая безопасность в 21 веке. Проекты и решения». Конференция стала завершающим этапом конкурса студенческих научных проектов.



Операторы 3 научной роты на конференции в ОАО «РТИ» 3-ю научную роту представляли рядовые Шуваев И.Н., Самбаров Г.Е., Акимов Е.В., Куркин М.С.. Работы операторов были охарактеризованы, как имеющие высокий уровень инженерной и конструкторской проработки, а также научную и практическую ценность.

В период с 15 по 19 мая проводилась Международная олимпиада по информатике на базе Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии Хрулева (филиал) в г. Пенза. Старший команды – капитан Поздняков

А.А., состав команды – рядовые Отрезников С.А., Шипилов А.А., Юрченко Н.С., Сигов А.О. Личный состав 3 научной роты показал высокие результаты и по итогам занял 3 место во внеконкурсном зачете среди научных рот.



21 и 22 июня операторы 3 научной роты, занимающиеся научной деятельностью в ПАО «КМЗ» и в ОАО «Корпорация «Комета» успешно прошли итоговую аттестацию. В результате данного мероприятия операторы роты получили итоговые оценки результатов научно-исследовательской деятельности и опыт представления своих работ.

5 июля 2017 года военнослужащие 3 научной роты приняли участие в выставке достижений роты (научной), проводимой в рамках торжественных мероприятий на чествовании лейтенантов и военнослужащих, увольняемых в запас. На выставке перед Командующим 15 армией ВКС ОН были продемонстрированы результаты работы операторов по направлениям их научно-исследовательской деятельности.

В соответствии с указаниями Министра обороны Российской Федерации в период с 22 по 27 августа 2017 года проводился Международный Военно-технический форум «Армия 2017», на котором была представлена экспозиция научной роты Космических войск Воздушно-космических сил, также военнослужащие научной роты принимали участие в качестве волонтеров по обеспечению работы форума.

7 сентября было проведено награждение победителей конкурса на лучшего специалиста научной роты. В рамках ежегодного конкурса профессионального мастерства «Центр управления – 2017» оператор научной роты рядовой Куркин М.И. стал лауреатом, заняв 2 место, и был награжден памятным знаком и дипломом, а его научная рота кубком.

19 октября на площадке Красногорского Механического завода имени С.А. Зверева прошла научно-практическая конференция «Оптико-электронные приборы и комплексы» посвященная 75-летнему юбилею завода. В Научно-исследовательском центре центрального научно-исследовательского института войск ВКО МО прошла конференция по космической тематике в пяти секциях.

Операторы 3-й Научной роты ефрейтор Яковчук Е.А., ефрейтор Васенков С.В., ефрейтор Махарашвили А.Г., рядовой Царьков В.И., рядовой Брюнин В.С., рядовой Самбаров Г.Е. представили шесть работ.

Доклады операторов с интересом выслушали и высоко оценили как организаторы конференций, так и ее посетители. С каждым из операторов научной роты после его выступления аудитория активно вступала в дискуссию по теме доклада и с интересом обсуждала проблематику и новизну научных исследований.





Участие операторов 3 научной роты на Международном военно-техническом форуме «Армия-2017»



21 ноября военнослужащие 3 научной роты приняли участие в XII Всероссийской инновационной молодежной научно-инженерной выставке «ПОЛИТЕХНИ-КА-2017»;

В работе выставки принимали участие ефрейторы Распутин М.С., Сигов А.С., Васенков С.В. Проекты операторов были с интересом выслушаны и высоко оценены. С каждым из операторов научной роты проводились активные дискуссии, а также обсуждение проблематики и новизны научных исследований. Проекты участников были отмечены дипломами, при этом ефрейтор Васенков С.В. был награжден дипломом за решение актуальной научно-технической задачи.





Операторы 3 научной роты представляют свои разработки на выставке «ПОЛИТЕХНИКА-2017»



Участники конференции «Минцевские чтения-2017»

23 ноября 2017 года состоялось V Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Минцевские чтения -2017», являющейся современной динамичной коммуникационной площадкой для молодых инженеров, исследователей и конструкторов.

Операторы 3 научной роты рядовые Шуваев И.Н., Самбаров Г.Е., Акимов Е.В., Куркин М.С., Захаров Р.В; ефрейторы Васенков С.В. и Распутин М.С. представили 7 работ. Доклады операторов с интересом выслушали и высоко оценили как организаторы конференции, так и ее

посетители. Доклад рядового Захарова Р.В. был оценен как лучший секционный доклад.

22, 28 и 30 ноября на площадках научной деятельности была проведена аттестация военнослужащих, где были оценены эффективность научно- исследовательских работ и соблюдение сроков их выполнения. Данная аттестация стала итоговой для призыва 2-2016 и полугодовой для призыва 1-2017.

НАУЧНАЯ РОТА
космических войск вкс



Выступление рядового Делова В. А. на конференции «Искусственный интеллект: проблемы и пути их решения-2018»



Операторы научной роты на выставке *Мер* в рамках конференции *НИЯ* «Искусственный интеллект: проблемы *рах.* и пути их решения-2018». 3 /



Команда 3 научной роты на всеармейской международной олимпиаде по математике

1 и 12 февраля роту посетила комиссия Военно-научного комитета Воздушно-космических сил и Министерства обороны. Комиссиями были отмечены высокая практическая значимость проводимых разработок и подготовка операторов научной роты.

12 февраля военнослужащие 3 научной роты приняли участие в научно-технической конференции «Расплетинские чтения-2018». 3 научную роту представляли рядовые Маликов Р.Р., Кузьмин П.Г., Иванов Д.К., Делов В. А.

14-15 марта состоялась конференция «Искусственный интеллект: проблемы и пути их решения-2018». Операторы научной роты присутствовали на пленарном заседании конференции и приняли активное участие в дискуссии, посвященной анализу реального состояния ИИ в России и мире. Ефрейтор Делов В.А. представил свою работу на выставке, проходящей в рамках конференции. Работа нашла широкий отклик у посетителей, которые охотно участвовали в обсуждении представленных результатов исследований.

15 марта прошла 3-я международная научно-практическая конференция «Военная безопасность Российской Федерации: взгляд в будущее». В работе конференции принимал участие ефрейтор Шепелев И.В.. Доклад встретил живой интерес, и завязавшаяся после выступления дискуссия была продолжена в кулуарах.

3 научная рота выдвинула свои команды для участия во Всеармейских международных олимпиадах по математике и информатике, проводящихся в целях повышения качества подготовки военных кадров, их профессиональной мотивации, формирования и раскрытия научных и творческих способностей.

Олимпиада по математике проходила со 2 по 6 апреля в ВА МТО им. генерала армии А.В. Хрулёва (г. Пенза). Команда, включавшая ефрейторов Захарова Р.В. и Хальметова Д.Н., а также рядовых Балданова Д.Ш. и Сидорова А.Ю., продемонстрировала глубокие знания, широкую эрудицию и отличные способности, за что была награждена дипломами II степени.



Олимпиада по информатике, в свою очередь, проходила с 16 по 20 апреля 2018 года в ВА МТО им. генерала армии А.В. Хрулёва (г. Санкт-Петербург), где команда в составе ефрейторов Шепелева И.В., Делова В.А. и рядового Шастина А.Д. показала отличные результаты.

С 9 по 13 апреля состоялась международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2018». З научную роту представляли ефрейторы Захаров Р.В., Бобриков А.А. и рядовой Балданов Д.Ш. Доклады операторов были высоко оценены: работы Захарова Р.В. и Бобрикова А.А. рекомендованы конкурсной комисси-



Операторы научной роты на конференции «Ломоносов-2018»

ей к публикации в электронном журнале «Ученые записки физического факультета МГУ»; работа Балданова Д.Ш. награждена как лучшая в секции.

20 апреля в МГТУ им. Н.Э. Баумана была приведена II Всероссийская конференция «Актуальные вопросы развития вооружения, военной и специальной техники войск ПВО и ПРО, Космических войск ВКС». В работе конференции приняли участие операторы научной роты Захаров Р.В. и Сулейманов Г.М.



Выступление ефрейтора Бобрикова А.А. на конференции «Инновационная деятельность в науке и технике»

26 апреля в АО «НИИЭМ» была организована вторая молодежная конференция «Инновационная деятельность в науке и технике. Электромеханика, автоматика и робототехника», в рамках которой рядовые Чубанов С. В., Васин А.О. и ефрейтор Бобриков А.А. представили свои работы. По результатам конкурса на лучший доклад работа Бобрикова А.А. заняла второе место.

С момента своего создания 3 научная рота принимает активное участие в выполнении научно-прикладных задач по заказу и в интересах Космических войск Воздушно-космических сил: ведутся перспективные научно-исследовательские, опытно-конструкторские и испытательные работы, развивается изобретательская и рационализаторская

деятельность. Помимо этого, 3 научная рота успешно готовит перспективные кадры для военно-научного и оборонно-промышленного комплексов Российской Федерации. Служба в научной роте способствует развитию у военнослужащих рот творческого мышления и самостоятельности в решении актуальных научных задач, а также повышению мотивации продолжения занятия научной деятельностью в интересах Вооруженных Сил. Служба в научной роте это смелый выбор образованного человека, которому по плечу решение задач государственной важности.

> Командир взвода - младший научный сотрудник 3 научной роты Космических войск ВКС лейтенант И. Остроумов

УДК 621.382.2/.3

российский индекс научного цитирования Science Index

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ВВОДА/ВЫВОДА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПЕРСПЕКТИВНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

ЯРЛЫКОВ Д.И. – старший оператор 3-й научной роты КВ ВКС РФ

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

E-mail: 9denis4@mail.ru



Аннотация: В данной статье рассматриваются необходимые этапы при разработке электронного модуля ввода/вывода оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли. Приводятся исходные данные на модуль с указанием его характеристик, требований к модулю и функциональных возможностей, анализируются схемные решения и осуществляется подбор элементной базы, отвечающих требованиям по радиационной стойкости.

Ярлыков Д.И.

Ключевые слова: оптико-электронная аппаратура, дистанционное зондирование Земли, исходные данные, радиационная стойкость.

DEVELOPMENT OF THE INPUT/OUTPUT MODULE FOR USE IN A PERSPECTIVE OPTICAL ELECTRONIC EQUIPMENT

YARLYKOV D.I.

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

E-mail: 9denis4@mail.ru

Abstract: This article considers the necessary steps in the development of an electronic module for input / output of optoelectronic equipment for remote sensing of the Earth. The initial data on the module is given with indication of its characteristics, requirements for the module and functional capabilities, circuit solutions are analyzed and the selection of the element base meeting the requirements for radiation resistance is carried out.

Keywords: optoelectronic equipment, remote sensing of the Earth, initial data, radiation resistance.

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является разработка модуля ввода/вывода (MBB) на перспективной отечественной элементной базе для использования в изделиях ШМАСР.

Решаемые в ходе выполнения работы задачи:

• сбор и анализ прототипов устройств, аналогичных проектируемому;

• аналитический обзор схемотехнических решений для модуля ввода/вывода; формирование исходных данных на модуль ввода/вывода;

• разработка структурной схемы модуля ввода/вывода;

• разработка схемы электрической принципиальной модуля ввода/вывода, подбор ее элементной базы;

 разработка технического задания на разработку конструкторской документации печатной платы модуля ввода/вывода;

• разработка алгоритма и встроенного программного обеспечения; отладка встроенного программного обеспечения на отладочной плате;

• сопровождение изготовления модуля ввода/вывода в производстве; проверка работоспособности и его отладка.

Основополагающими документами, определяющими направления развития российской космической системы Д33, являются: «Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года», государственная программа «Космическая деятельность Российской Федерации», Федеральная космическая программа (ФКП) России. В соответствии с этими документами отечественная космическая система Д33 развивается по следующим основным направлениям:

наращивание количественного и качественного состава российской орбитальной группировки ДЗЗ;

 совершенствование наземной космической инфраструктуры приема, обработки, хранения и распространения данных ДЗЗ;

• создание и развитие приборного ряда целевой аппаратуры для оснащения космических аппаратов (КА) Д33;

• совершенствование нормативной правовой базы в области ДЗЗ из космоса.

Качественное развитие отечественной космической системы ДЗЗ невозможно без учета современных тенденций развития цифровой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) специального назначения. Они направлены на уменьшение массово-габаритных показателей РЭА с одновременным повышением ее функционала и увеличением числа элементов на единицу площади платы (высокая интеграция). При этом к современной радиоэлектронной аппаратуре предъявляются все большие требования к ее надежности и устойчивости к различным внешним воздействиям и факторам (механические воздействия, высокие температурные перепады, влажность и специальные факторы). Особенно это актуально для постоянно развивающейся и совершенствующейся аппаратуры для космических аппаратов, и, в частности, широкозахватной многоспектральной аппаратуры среднего разрешения (ШMACP).

Все эти противоречивые требования, возникающие при проектировании и модернизации цифровой РЭА, возможно решить с помощью:

• применения современной электронной компонентной базы специального назначения;

• применения новых схемотехнических решений для цифровой логики;

• применения многофункциональных микросхем с высокой интеграцией элементов;

• применением микроконтроллеров (МК).

Стоит отметить, что создание новых приборов цифровой РЭА основывается на модульном принципе компоновки, где неисправные модули либо заменяются, либо резервируются.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В связи с этими тенденциями развития цифровой РЭА предлагается усовершенствование и разработка нового модуля ввода/вывода (MBB), задействованного в ШМАСР, с улучшенными характеристиками на основе уже имеющихся и новых схемотехнических решений. В таблице 1 представлены технические параметры разрабатываемого MBB.

Требования к выполняемым функциям:

 приемопередача информации между управляющим контроллером и модулем ввода/вывода через интерфейс UART;

N⁰	Наименование параметра	Количественная	Примечание								
п/п	Паименование параметра	характеристика									
	Общие характеристики										
	Максимальная	• •	Линии питания 5 В								
1	потребляемая мощность,	2,3	гальванически развязаны								
	BT		с управляющей шиной								
2	Номинальное напряжение	27 ± 5									
	ПИТАНИЯ, В										
3	частота тактирования	4									
4	ЕЕРВОМ Кбит	256	1 м/с × 1644РС2Т								
	Габаритные размеры	230	1 11/0 1 10111 021								
5	модуля. мм	90,17 × 95,89	Формат РС/104								
6	Масса модуля, кг	0,3	Уточняется на этапе КЛ								
7	Температура	50 160	En								
/	эксплуатации, °С	-30+00	1 pyilla 5.3								
	Каналы	ввода/вывода инфо	ормации								
8	Каналы ввола/вывола	64	Подтянуты к 5 В через резисторы								
0	Тапалы ввода вывода	01	4,7 кОм								
9	Максимальный выходной	2									
10	ток на канал, мА	0.07									
10	Входной ток не облее, мА	0,05									
11	частота обновления	2,6									
-	информации, кі ц Напряжение питания										
12	внешней нагрузки В	5									
	Максимальный ток		64 латчика								
13	нагрузки по линии 5 В, мА	100	$I_{\text{HOTD.}} = 1.5 \text{ MA}$								
14	Подключение линий	На отдельный									
14	ввода/вывода	разъем									
	И	нтерфейс управлен	ия								
	Интерфейс связи	9 разр. данные									
15	с управляющим	(8pa3p. + «0»)	Мультипроцессорный режим								
10	контроллером	9 разр. адрес	работы UART								
		(8pa3p. + «1»)									
16	I альваническая развязка	+	Трансформаторная								
	Интерфенса										
17	передаци данных кбит/с	250	Уточняется при макетировании								
	передачи данных, коит/е		начиная с Мл Зн Разр								
18	Формат посылки	1Start+9bit+1Stop	(Stop bit всегла = $\ll 1$ »)								
10	Адресное пространство	0.00.0	(
19	модуля	$0x00 \div 0xFF$									
20	Количество адресов	1	8 nongrop								
	модуля, шт	1	в разрядов								
		Состояние линии									
21	Программная телеметрия	5 B:	Передача по UART								
		включен/выключе									
		н модуль									
		ОВ РО/РО									
22	Cyaniiag Totovotova	9B DC/DC	Линии гальванически развязан								
22	Слемная телеметрия	преобразователя,	и заведены на отдельный разъем								
		стабилизаторов									
		e nuo mansuropob	Осуществляется по отлельной								
23	Управление питанием	+	линии от управляющего МК								

 подача стабилизированного напряжения питания 5 В на компоненты, входящие в состав платы;

• возможность подключения внешних устройств к модулю для осуществления между ними приемопередачи по 64 линиям ввода/вывода;

• возможность хранения полученных данных от внешних устройств в энергонезависимой микросхеме памяти;

• последовательное программирование контроллера (1881ВГ4Т) модуля через интерфейс SPI с тактовой частотой f_{SCK} ≤ 834 кГц (T_{SCK} ≥ 1,2 мкс); передача данных начинается со старшего знакового разряда (СЗР).

Требования к управлению:

• при подаче питания 27 В модуль должен оставаться в выключенном состоянии;

 модуль должен включаться после подачи сигнала на включение от управляющего контроллера; выключение модуля также должно осуществляться по команде;

• возможность отслеживания состояния модуля (включен/выключен) по команде от управляющего контроллера.

2. РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ

Начальным этапом работы было изучение пояснительной записки эскизного проекта ШМАСР «Управление и контроль ACP».

На функциональной схеме АСР, приведенной на рис. 1, показаны следующие функциональные части:

• блок управления БУ–СР;

• система оптико-механическая (COM), включающая привод крышки (ПК), узел калибровки (УК), узел фокусировки (УФ) и систему термостабилизации (СТС);

• система приема и преобразования информации СППИ–СР;

• звездные датчики ЗД1, ЗД2 [1].

Контроллер управления СТС предназначен для измерения и стабилизации температуры на поверхности СОМ. Это необходимо для выравнивания температуры линз СОМ для предотвращения оптических искажений изображения вследствие изменения их кривизны из-за неравномерного нагрева. КУ–СТС принимает команды управления от БУ–СР, после чего опрашивает датчики температуры СОМ в 30 точках измерения, и полученные данные измерений температуры накапливает в памяти. КУ–СТС формирует управляющие сигналы на нагревательные элементы, по результатам измерений формирует протокол измерительного цикла (ПИЦ), а также осуществляет командноинформационный обмен с БУ–СР [1].

Контроллер управления СТС получает напряжение питания от БУ-СР, командно-информационный обмен с БУ-СР осуществляется по интерфейсу RS-485. Термодатчики имеют цифровой выход и встроенный АЦП, информационный обмен микроконтроллера с датчиками температуры реализован по последовательной двунаправленной шине интерфейса 1-Wire. Термонагреватели также получают напряжение питания 27 В и команды включения/ отключения. Цепи питания и каналы обмена RS-485 гальванически развязаны друг с другом и корпусом, резервированы и разнесены в отдельные соединители. КУ-СТС питается постоянным током с напряжением величиной от 23 до 32 В [1].

КУ–СТС состоит из следующих компонентов: преобразователя напряжения 27/12 В, стабилизаторов напряжения 12/5 В и 12/3,3 В, микроконтроллера, приемопередатчика RS–485, ключей управления термонагревателями, цифровых датчиков температуры.

3. ВЫБОР СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Имеется опытный образец модуля ввода/ вывода (MBB), находящий применение в оптико-электронной аппаратуре ШМАСР, где в качестве нагрузок могут использоваться датчики температуры. Структурная схема MBB представлена на рис. 2.

При обращении процессорного модуля к МВВ происходит рассылка определенных наборов 8-разрядных адресов. Если один из этих адресов совпадает с адресом, заложенном в модуле, то он обрабатывается в дешифраторе адреса. Затем происходит включение логики управления, выполненной на отдельных дискретных логических элементах, которая управляет работой всего устройства и распределе-





Рисунок 2. Структурная схема MBB (действующее решение)

нием потоков данных в MBB. Цифровая логика управления, выполненная на отдельных логических элементах, занимает много места на печатной плате и требует большого количества цифровых микросхем для ее функционирования, что в целом снижает надежность работы логики управления.

Регистр-защелка на 32 разряда выполняет функцию записи принятых от внешнего процессора данных, а также запись телеметрических данных с нагрузок перед отправкой их на внешний процессор.

Далее следует часть ввода/вывода модуля, разделенная оптронными гальваническими развязками, и осуществляющая коммутацию питания +27В для включения нагрузок. Эта коммутация осуществляется силовыми транзисторными ключами, при быстром переключении которых могут наводиться помехи на работающие в модуле цифровые узлы.



Рисунок 3. Структурная схема MBB (предлагаемое решение)

Часть ввода/вывода состоит из 32 линий вывода, подключенных от оптронов напрямую к разъему XP1 и 32 линий ввода, реализованных на триггерах Шмитта для улучшения крутизны фронта поступающих от датчиков температуры сигналов. Также для реализации интерфейса 1-Wire предусмотрена подтяжка линий ввода к напряжению питания 5В с помощью подтягивающих резисторов. Все 64 линии независимы друг от друга.

В целях модернизации существующего прототипа MBB предлагались и отрабатывались различные схемотехнические решения.

Предполагалось в качестве логики управления использовать новейшую ПЛИС отечественного производства М1 «Миландр» [3], удовлетворяющую всем предъявляемым параметрам по радиационной стойкости, температуре и т. д. Но для МВВ использовать весь мощный потенциал ПЛИС оказалось нецелесообразным, также эта микросхема на данный момент еще не запущена в производство и еще не испытана.

В данной работе предлагается заменить логику управления MBB, собранную на отдельных дискретных логических элементах, программируемым микроконтроллером 1881ВГ4Т белорусского производителя «Интеграл» [4]. Он будет размещен на плате с разъемами для последовательного программирования с помощью интерфейса SPI. То есть в режиме отладки модуля можно вносить изменения в программное обеспечение МК без распайки этого МК или внесения каких либо изменений в электрическую схему платы. Новая структурная схема MBB представлена на рисунке 3.

Микроконтроллер будет выполнять функции:

• дешифрации адреса;

 приема данных с управляющего процессора через изолированный последовательный интерфейс UART;

• прием данных с датчиков температуры;

• вывод ее на внешние устройства через изолированный последовательный интерфейс UART.

Применение микроконтроллера позволит уменьшить массово-габаритные показатели всего устройства в целом, повысит надежность устройства, т. к. МК устойчивый к внешним воздействиям и специальным факторам.

Внешнее взаимодействие устройства с про-

Таблица 2.

Характеристика фактора	7И1	7И7	7C1	7C4	7K1	7К4
Группа исполнения	1Ус	2Ус	1Ус	1Ус	5·1K	0,5·1K

цессорным модулем осуществляется по UART через трансформаторную гальваническую развязку и сдвоенные интерфейсные приемопередатчики, реализующие основной и резервный канал передачи данных. Применение импульсных трансформаторов в качестве развязки вместо оптронов определено тем, что он надежнее и стойких к радиации в отличие от полупроводниковой архитектуры оптрона. Интерфейсные приемопередатчики управляются микроконтроллером MBB через блок логики, тем самым включая, либо выключая основной или резервный канал на прием или на передачу.

В части ввода/вывода модуля исключаются оптроны каналов ввода и вывода, а также исключаются триггеры Шмитта. Вместо этого были использованы дешифраторы и шинные формирователи для приемопередачи между МК и датчиками температуры.

Таким образом, в цифровой части схемы логики управления MBB множество микросхем заменяется одним MK. Появляется возможность ее усовершенствования путем неоднократной прошивки MK. Упрощается часть ввода/вывода MBB, появляется возможность увеличения линий ввода/вывода в 2 раза. Обеспечивается гальваническая развязка всех каналов между собой, а также их развязка от линий питания и сигнальных линий шин управления. Надежность модуля повышается, массово-габаритные показатели уменьшаются, модуль становится более универсальным для различного применения. Далее необходимо осуществить подбор элементной базы.

4. ВЫБОР ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

4.1. Общие требования, предъявляемые к электронной компонентной базе

В процессе проектирования MBB используется современная отечественная электронная база. К ней предъявляются высокие требования по надежности, высокой наработке на отказ (100000 ч и более), устойчивости к воздействию влажности, высокому перепаду температур (-60°С...+100°С), габаритным размерам и наличием металло-керамического корпуса (желательно изготовленного для монтажа по SMD-технологии), устойчивости к воздействию специальных факторов (радиация).

Элементная база должна быть стойкой к воздействию специальных факторов (таблица 2):

Таким жестким требованиям в условиях космоса удовлетворяют микросхемы следующих отечественных производителей: ОАО «ИНТЕ-ГРАЛ», АО «Протон», ЗАО «Группа Кремний Эл», ООО «АЛЕКСАНДЕР ЭЛЕКТРИК источники электропитания», АО «ПКК Миландр», ОАО «НПО «ЭРКОН», ОАО «ВЗРД «Монолит», ОАО «МСТАТОР».

4.2. Микроконтроллер

Микроконтроллер (1881ВГ4Т «Интеграл») является 8-разрядным (с RISC- архитектурой) и предназначен для встраиваемых приложений. Микроконтроллер построен по Гарвардской архитектуре, которая характеризуется раздельной памятью программ и данных, каждая из которых имеет собственные шины доступа к ним. Микроконтроллер изготавливается по малопотребляющей КМОП-технологии, которая в сочетании с усовершенствованной RISCархитектурой позволяет достичь наилучшего соотношения показателей быстродействие/ энергопотребление. Благодаря тому, что подавляющее большинство команд выполняется за один такт, быстродействие этого микроконтроллера может достигать значения 1 MIPS (миллионов операций в секунду) на 1 МГц тактовой частоты. Корпус металло-керамический 4183.28-4 [4].

Основные особенности данного микроконтроллера:

• возможность вычислений со скоростью до 1 MIPS/MГц;

• FLASH-память программ объемом 2 Кбайт

(число циклов стирания/записи не менее 1000);

• память данных на основе статического ОЗУ (SRAM) объемом до 128 байт;

 память данных на основе ЭСППЗУ (EEPROM) объемом до 256 байт (число циклов стирания/записи не менее 100000);

 возможность защиты от чтения и модификации памяти программ и данных (в EEPROM);

 программирование в параллельном (с использованием программатора) либо в последовательном (непосредственно в системе через последовательный SPI-интерфейс) режимах;

 различные способы синхронизации: внешний сигнал синхронизации или внешний резонатор (пьезокерамический или кварцевый);

• наличие нескольких режимов пониженного энергопотребления [4].

Микроконтроллер содержит:

• 8-разрядный таймер/счетчик с предделителем;

 16-разрядный таймер/счетчик с предделителем;

• сторожевой таймер (WDT);

• модуль ШИМ (8-, 9, или 10-битный режим);

• последовательный синхронный интерфейс <u>SPI;</u>

• последовательный асинхронный интерфейс UART;

• аналоговый компаратор;

• 10-разрядный 6-канальный АЦП;

• схема BOD;

• порты ввода/вывода [4].

Структурная схема микроконтроллера 1881ВГ4Т приведена на рис. 4.

Микроконтроллер имеет в своем составе модуль полнодуплексного универсального асинхронного приемопередатчика (UART). Через него осуществляется прием и передача информации, представленной последовательным кодом, поэтому модуль UART часто называют также последовательным портом. С помощью этого модуля микроконтроллер может обмениваться данными с различными внешними устройствами. Скорость передачи данных может варьироваться в широких пределах, причем высокие скорости передачи могут быть достигнуты даже при относительно низкой тактовой частоте микроконтроллера [4].

Режим многопроцессорного обмена позво-

ляет осуществлять связь между несколькими ведомыми микроконтроллерами и одним ведущим.

Последовательный периферийный интерфейс SPI (Serial Peripheral Interface) имеет два назначения. Прежде всего через него может быть осуществлено программирование микроконтроллера (так называемый режим последовательного программирования). Вторым назначением интерфейса является организация высокоскоростного обмена данными между микроконтроллером и различными периферийными устройствами, такими как цифровые потенциометры ЦАП/АЦП, Flash-ПЗУ и др. Посредством этого интерфейса также может производиться обмен данными между несколькими микроконтроллерами имеющими интерфейс SPI (режим Master, и режим Slave) [4].

В режиме последовательного программирования программирование памяти программ и данных осуществляется через последовательный интерфейс SPI. Данный режим используется, как правило, для программирования (перепрограммирования) микроконтроллера непосредственно в системе (ISP, In System Programming). Наличие этого режима позволяет значительно упростить и удешевить модернизацию программного обеспечения [4].

4.3. Шинный формирователь

Микросхема 5584АП6У – восьмиканальный двунаправленный приемопередатчик с тремя состояниями на выходе [5]. Позволяет осуществлять посылку данных от МК модуля ввода/вывода на датчики температуры и наоборот. Тем самым каждая линия может работать как на вход, так и на выход. Следовательно, существующие в предыдущем схемном варианте 32 линии ввода и 32 линии вывода теперь можно объединить и получить 64 линии ввода/вывода вместо 32 линий, используя 4 шинных формирователя. Однако, в условиях ограниченного количества ножек ввода/вывода МК, 64 линии к МК невозможно подключить. В новом схемном решении были применены дешифраторы, которые позволяют выбирать какой из четырех шинных формирователей будет включен и также направление передачи (вход/выход). Тем самым одновременно активны только 8 линий



Рисунок 4. Структурная схема микроконтроллера 1881ВГ4Т

ввода/вывода. Это позволяет опрашивать 64 датчика температуры по 64 линиям данных, но при этом использовать 8 линий данных микро-контроллера.

4.4. Интерфейсные приемопередатчики

Микросхема 5559ИН67Т – сдвоенные приемопередатчики манчестерского кода с принудительной установкой выходов приемника в состояние низкого уровня и высокого уровня соответственно. Микросхемы предназначены для применения в устройствах автоматики и вычислительной техники в гальванически развязанных линиях передачи информации радиоэлектронной аппаратуры специального назначения.

Микросхемы изготавливаются в металлокерамических корпусах 4153.20-6 [6].

Особенности:

• напряжение питания микросхем – (5,5 ± 0,15) В;

• ток потребления (нет передачи информации) – не более 14мА;

• динамический ток потребления (один канал, рабочий цикл передачи информации 50%) – не более 280мА;

• динамический ток потребления (один канал, непрерывная передачи информации) – не более 550мА;

• допустимое значение статического потенциала - не менее 2000В;

• диапазон рабочих температур среды - от минус 60 до плюс 125°С [6].

4.5. DC/DC модуль электропитания

Низкопрофильные DC/DC модули электропитания серии МИРАЖ предназначены для жестких условий эксплуатации в технике промышленного и специального назначения. Модули выполнены на отечественной элементной базе. Для снижения уровня высокочастотных помех все модули содержат встроенные входные и выходные помехоподавляющие фильтры. Полный комплекс защит и дистанционное управление обеспечивают удобство эксплуатации [7].

Особенности:

- диапазон рабочих температур:
 - минус 60 °C … +85 °C минус 60 °C … +105 °C

- отечественная элементная база;
- высокая надёжность;
- эффективные помехоподавляющие фильтры;
- защита от перегрузки и перенапряжения;
- тепловая защита;
- дистанционное вкл/выкл;
- два исполнения корпуса;
- приемка «5».

4.6. Телеметрия

В процессе работы модуля в космическом пространстве необходимо получать от него телеметрическую информацию. Для решения этой задачи было решено использовать схемную и программную телеметрию.

Программная телеметрия показывает включен или выключен модуль путем подачи команды от процессорного модуля на МК модуля. Передача осуществляется по UART. Если МК отвечает процессорному модулю, значит на модуль подано питание 5В и МК работает штатно.

Схемная телеметрия показывает состояние DC/DC модуля электропитания (наличие напряжения 9В на его выходе), а также наличие на выходе стабилизаторов напряжения 5В.

Линии телеметрии выведены на отдельный разъем и гальванически развязаны с помощью оптронов 249КП8У для защиты процессорного модуля от возможных скачков напряжения [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты научной работы:

1. осуществлен сбор и анализ прототипов устройств, аналогичных проектируемому;

 осуществлен аналитический обзор схемотехнических решений для модуля управления нагрузками; сформированы исходные данные на модуль ввода/вывода;

3. изучен эскизный проект ШМАСР «Управление и контроль АСР»;

4. разработана структурная схема модуля ввода/вывода;

5. разработана схема электрическая принципиальная модуля ввода/вывода и подобрана элементная база модуля;

6. разработано техническое задание на разработку конструкторской документации печатной платы модуля ввода/вывода; 7. оформлены перечень элементов и ведомость покупок на модуль ввода/вывода.

В дальнейшем планируется разработка встроенного программного обеспечения с его отладкой и сопровождение модуля в производстве на всех этапах его изготовления.

Список литературы:

1. Пояснительная записка эскизного проекта ШМАСР «Управление и контроль АСР»

2. Спецификация программируемой аналоговой микросхемы «КомПАС-1» // АО «ДИЗАЙН ЦЕНТР «СОЮЗ».

URL: http://dcsoyuz.com/files/content/PAIS/ specifikacija_5400tr035.pdf (дата обращения: 13.02.2018);

3. ПЛИС М1: форум // Интегральные микросхемы AO «ПКК Миландр». URL: http://forum.milandr. ru/viewtopic.php?f=48&t=3540 (дата обращения: 13.02.2018); 4. Микросхема 1881ВГ4Т // ОАО «ИНТЕГРАЛ». URL: http://integral.by/ru/products/mikrokontrolleryi-supervizory-pitaniya-serii-1880-1881-1842-588-1345-5518ap1tbm?product=1795 (дата обращения: 13.02.2018);

5. Микросхема 5584АП6У // ОАО «ИНТЕГРАЛ». URL: http://integral.by/ru/products/seriya-

5584?product=2053 (дата обращения: 13.02.2018);

6. Микросхема 5559ИН67Т // ОАО «ИНТЕГРАЛ». URL: http://integral.by/ru/products/interfeysnye-imsserii-588-5102-5559-5560-1554in1ubm?product=1823 (дата обращения: 13.02.2018);

7. DC/DC преобразователи серии «Мираж» // ООО «АЛЕКСАНДЕР ЭЛЕКТРИК источники электропитания». URL: http://www.aeip.ru/images/pdf/mdm7-5.pdf (дата обращения: 13.02.2018);

8. Транзисторная оптопара 249КП8У // АО «Протон». URL: http://www.proton-orel.ru/files/products/ optopary/germetic/tranzistornye/6-04-2017/249kp8u. pdf (дата обращения: 13.02.2018).



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМОСА В ВОЕННЫХ ЦЕЛЯХ: ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОСТЬ

ГРУНТОВСКИЙ Г.И. - старший оператор 3 научной роты КВ ВКС РФ ПАРАМОНОВ А.А. - командир 3 научной роты КВ ВКС РФ ЛИТВИНОВ С.А. - командир взвода 3 научной роты КВ ВКС РФ

«Корпорация «Комета»», г. Москва

E-mail: G.J.Gruntovsky@yandex.ru



Грунтовский Г.И.

Аннотация: В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с краткой историей освоения космоса ведущими государствами мира, его использование в целях вооруженного противоборства, как сферы столкновения национальных интересов различных государств, инициирующих передел сфер влияния в стратегической космической зоне.

Ключевые слова: космос, стратегическая космическая зона, космические системы.

USE OF SPACE IN MILITARY AIMS: HISTORY AND CONTEMPORANEITY

GRUNTOVSKY G.J., PARAMONOV A.A., LITVINOV S.A.

JSC «Corporation «Kometa»», Moscow

E-mail: G.J.Gruntovsky@yandex.ru

Abstract: The article deals with the issues devoted to the history of space exploration by leading world powers and its use in the aims of armed confrontation. The author considers space as the sphere of national interest conflict among the states that initiate redistribution of spheres of influence in strategic space zone.

Keywords: space, strategic space zone, space systems.

ВВЕДЕНИЕ

Середина XX века ознаменовалась важной вехой в истории развития человечества – началом широких исследований и практического освоения космического пространства. В XXI веке это направление приобрело еще более интенсивный характер по планомерному исследованию, освоению и использованию космического пространства в интересах международного сообщества, в том числе и военных целях. Принятые в конце XX – начале XXI вв. во многих странах мира национальные космические программы и программы международного сотрудничества продемонстрировали широкие возможности использования космоса не только для научных, хозяйственно-прикладных, но и военных целей. Перечень областей применения космических средств в мирных целях обширен, от исследования Земли, Солнца, планет Солнечной системы до загрязнения окружающей природной среды, производство материалов в космосе и т.д.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМОСА В ВОЕННЫХ ЦЕЛЯХ

Практически с первых лет освоения космоса стало развиваться и направление космической деятельности, связанное ролью космических средств в обеспечении обороноспособности государств. Изначально в СССР и США были проведены широкие исследования областей возможного применения космической техники в военных целях. В последующем был создан и принят на вооружение целый ряд космических средств военного назначения, получивших общее наименование - космические обеспечивающие системы. Они не были связаны с размещением какого-либо оружия в космосеи использовалисьв целях разведки, предупреждения о ракетном нападении, обнаружения ядерных взрывов, для связи, метеорологического, навигационного, топогеодезического и картографического обеспечения вооруженных сил. Космические системы такого назначения заняли важное место в структуре вооружений космических держав.

Глубокому изучению в государствах осваивавших космос, подвергся вопрос о возможности размещения в космосе оружия для действия по наземным, морским и воздушным целям. Ключевым критерием для определения целесообразности разработки таких средств было соотношение возможной стоимости их создания и ожидаемой эффективности выполнения поставленной задачи в сравнении с системами оружия аналогичного назначения других (некосмических) видов базирования. Известные результаты исследований, проведенных в частности за рубежом, не показали в ту пору превосходства космических систем оружия перед иными, и в силу этого они не получили сколь-либо заметного развития. Тем не менее, некоторые типы ударных систем оружия массового уничтожения с частичным полетом их поражающих элементов (ядерных боеголовок) по орбите – так называемые глобальные ракеты, или, как их именовали за рубежом, системы FOBS (Fractional orbital bombardment system- частично орбитальная ударная система) – все же были созданы и некоторое время реально существовали.

Большое внимание в ходе проводившихся исследований было уделено изучению возможностей создания космических систем борьбы с баллистическими ракетами – систем противоракетной обороны (ПРО). В США после многих лет разрозненных исследований такие работы были собраны в выдвинутую в 1983 году и широко разрекламированную программу «Стратегическая оборонная инициатива» (СОИ). В качестве возможного оружия для космических систем ПРО рассматривалось кинетическое (на основе прямого соударения поражающего элемента с боеголовкой ракеты), лазерное, пучковое (на основе направленных потоков заряженных частиц), электромагнитное.

На пути появления таких систем стояли фундаментальные международные договорные запреты. В частности, Договором по ПРО 1972 года запрещалось развертывать системы противоракетной обороны территории страны, а также создавать, испытывать и развертывать – в числе целого ряда систем мобильных видов базирования –системы и компоненты ПРО космические базирования.Ноработы по созданию космической техники для противоракетной обороны в разрешаемых Договором по ПРО рамки, продолжались в США.

Широкие исследования были проведены и в области противоспутниковых систем (ПСС). Причины интереса космических держав к проблеме ПСС лежали в двух плоскостях. Вопервых, находящиеся в космосе средства различного целевого назначения, безусловно являвшиеся достижением всего человечества, были вместе с тем собственностью отдельных государств и международных организаций, создавших, развернувших и эксплуатирующих соответствующие космические системы. В силу признанного всеми странами мира принципа экстерриториальности космического пространства, то есть его непринадлежности какому-либо одному государству или группе государств, и, следовательно, его правовой доступности для любой страны неизбежно возник вопрос о гарантиях сохранения и защите «космической собственности». Будучи в принципе закономерным применительно к космическим системам любого назначения,

такой вопрос имеет особую значимость для военных космических систем, от которых напрямую зависит обороноспособность государства. Во-вторых, в военно-стратегическом контексте в США сформировалась и получила широкое распространение точка зрения на тот счет, что «кто владеет космосом, тот владеет и Землей». Такая концепция имела поддержку в высоких военно-политических кругах и, несмотря на кажущуюся гипотетичность, во многом явилась истоком современных взглядов США на будущую роль космического пространства. Уже на заре космической эры США вели разговор об обеспечении военного присутствия в космосе на постоянной основе, о важности военного доминирования в космическом пространстве, о возможном постепенном превращении космоса в сферу размещения оружия, арену вооруженной борьбы и потенциальный театр военных действий. Советский Союз вынужден был адекватным образом реагировать на такую ситуацию¹.

В США и СССР были осуществлены и практические разработки в области противоспутниковых систем. В США сначала была создана противоспутниковая система на основе ракеты-перехватчика наземного стационарного базирования, затем в 1980-х годах – противоспутниковая система самолетного базирования, успешно испытанная в 1985 году по реальной цели в космосе, но не развернутая и не поступившая на вооружение. В СССР в 1970-х годах была также развернута противоспутниковая система наземного базирования, которая находилась в опытной эксплуатации, но, начиная с 1983 года, испытательные пуски космических аппаратов-перехватчиков, не проводились.

Таким образом, перед нами предстает достаточно обширная картина того, что было сделано в сфере исследования, освоения и использования космического пространства за первые десятилетия космической эры. В целом этот период можно назвать временем выявления научного, хозяйственно-прикладного и военного потенциалов космоса, осмысления направлений практического применения космической техники, понимания роли космических средств в обеспечении обороноспособности государства, поддержании стратегической стабильности и международной безопасности.

Параллельно с этим шло формирование правового режима освоения и использования космического пространства, в том числе и в военных целях. В СССР, США, а в последующем и в современной России, как правопреемнице СССР, началось создание информационноударных систем (ИУС). СамиИУС представляют собой автоматизированные системы вооружения, предназначенные для высокоэффективного огневого поражения одного, нескольких или многих объектов (целей) ударными высокоточными средствами на больших расстояниях в соответствии с планом операции (боевых действий, сражения, удара, боя) или ее замыслом.

Таким образом, освоение космоса осуществлялось не только в мирных, но и в военных целях. Освоение космоса в военных целях позволило обеспечить:

1. Влияние космических средств на увеличение глубины ударного воздействия в операциях войск (сил).

2. Влияние космических средств на возможность реализации концепции ядерного сдерживания.

3. Влияние космических сил и средств на развитие форм и способов военных действий.

В целях защиты от ракетного нападения в России началось создание системы предупреждения о ракетном нападении (СПРН), состоящей из двух эшелонов – космического (первого) и наземного (второго). Очевидно, что назначение первого эшелона состоит в обнаружении пусков ракет противника максимально быстро, то есть еще на их взлете. Применение космических аппаратов для обнаружения пусков межконтинентальных баллистических ракет (МБР) обеспечивает реализуемость Россией концепции стратегического сдерживания – дает возможность на первых же минутах определить факт запуска и оценить число стартовавших ракет.

¹ Малов А. Центр военно-политических исследований.30.01.2014. http://www.eurasian-defence.ru. Дата обращения 05.02.2018

Очевидно, что наличие первого (космического) эшелона системы ПРН позволяет исключить нанесение внезапного (обезоруживающего, обезглавливающего) ракетно-ядерного удара, обеспечить реализацию не ответных, а ответно-встречных действий ядерных сил и, как следствие, обеспечить нанесение противнику неприемлемого ущерба. Все это в совокупности позволяет в полной мере реализовать концепцию ядерного сдерживания.

Необходимо отметить, что силы и средства воздушного и космического нападения и обороны становятся важнейшим средством универсального назначения, основным оружием войн XXI в. Они способны самостоятельно решать в военных конфликтах оперативно-стратегические и стратегические задачи, даже при применении лишь обычных средств поражения.

Активное использование космического пространства в военных целях может обеспечить стране:

- получение полной и достоверной информации о противнике в масштабе времени, близком к реальному, и оперативное доведение ее до всех органов управления и элементов войск (сил);

 развертывание сил и систем оружия, способствующих достижению военных целей в конфликтах низкой интенсивности с минимальными потерями и минимальным ущербом для гражданского населения и окружающей среды;

 контроль использования другими странами космического пространства, а также акваторий морей и океанов;

- защиту национальной территории и развернутых группировок войск от оружия массового поражения и ударов средств воздушно-космического нападения, в первую очередь баллистических и крылатых ракет.

Новые технологические достижения, воплощенные в ударных и оборонительных авиационных, ракетных, космических системах вооружения, в соответствии с новыми стратегическими и оперативными концепциями фундаментальным образом меняют характер и содержание вооруженной борьбы.

Несомненно, что в конце XX – начале XXI века изменился характер вооруженной борьбы. Как свидетельствует опыт войн и вооруженных конфликтов последних лет, одной из основных характерных особенностей явилось неуклонное повышение удельного веса войск, сил и средств, действующих в воздушной сфере и околоземном космическом пространстве (СКЗ), по отношениям к другим сферам вооруженной борьбы.

Перемещение эпицентра вооруженной борьбы в воздушную и космическую сферу предопределено их особым положением и свойствами:

 во-первых, воздушная и космическая сферы
по отношению к другим сферам занимают охватывающее, господствующее положение;

 во-вторых, физические свойства этих сфер оказывают минимальное сопротивление перемещению материальных тел и распространению электромагнитной энергии, что позволяет достичь высоких скоростей и больших дальностей полета, передачи информации и энергии.

В связи с этим изменяются пространственные характеристики вооруженной борьбы, усилия в которой перераспределяются в пользу воздушной и космической составляющих. Активное использование космического пространства в военных целях может обеспечить получение полной и достоверной информации о противнике в масштабе времени, близком к реальному, и оперативное доведение ее до всех органов управления и элементов войск (сил).

В войнах и вооруженных конфликтах XXI века уже используются и, максимально широко будут использоваться силы и средства воздушно-космического нападения, дальнего огневого и электронного поражения. В связи с этим для достижения поставленных военных целей меняется последовательность действий группировок войск вооруженных сил развитых государств:

• вначале осуществляется упреждающее ведение информационной войны в целях завоевания информационного превосходства над противником в комплексе с применением экономических, политических, юридических и других невоенных мер;

• при обозначившемся успехе информационного противоборства проводятся наступательные операции, основу которых составляют массированные авиационно-ракетные удары. Они наносятся по ключевым элементам системы государственного и военного управления противостоящей стороны, ее важнейшим экономическим объектам, группировкам войск;

 обеспечивается господство в стратегической космической зоне своих космических информационных систем, а в перспективе возможно и самостоятельные военные действия в космосе по завоеванию господства в стратегической космической зоне и защите своих космических информационных ресурсов;

 после достижения целей воздушной наступательной операции (кампании) могут быть начаты операции наземными группировками войск¹.

Итак, силы и средства воздушного и космического нападения и обороны становятся важнейшим средством универсального назначения, основным оружием войн XXI в.

Они способны самостоятельно решать в военных конфликтах не только оперативнотактические и оперативные, но и оперативно-стратегические и стратегические задачи, даже при применении лишь обычных средств поражения.

Космическое пространство предоставляет уникальные возможности по ведению разведки удаленных территорий, обеспечению связи, боевому управлению, навигации, картографированию, метеорологическому обеспечению, решению других задач в глобальном масштабе в реальном масштабе времени. В связи с этим космос становится сферой столкновения национальных интересов различных государств, инициирующих передел сфер влияния в СКЗ. Этот процесс сопровождается активными попытками вытеснения России из такого стратегически важного домена.

Наибольшую активность в области милитаризации космоса проявляют США, руководство вооруженными силами которых рассматривает космические средства в качестве важнейших стратегических инструментов, обеспечивающих военное ведомство страны, командование различного уровня и разведывательные органы данными предупреждения о ракетном нападении, другой необходимой разведывательной информацией, а также возможностью осуществлять эффективное боевое управление вооруженными силами в глобальном масштабе².

Можно сделать однозначный вывод – завоевание и удержание превосходства в информационной и космической сферах имеет решающее влияние на ход и исход современного высокотехнологичного вооруженного противоборства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, активное использование космического пространства в военных целях может обеспечить:

 получение полной и достоверной информации о противнике в масштабе времени, близком к реальному, и оперативное доведение ее до всех органов управления и элементов войск (сил);

 развертывание сил и систем оружия, способствующих достижению военных целей в конфликтах низкой интенсивности с минимальными потерями и минимальным ущербом для гражданского населения и окружающей среды;

 контроль использования другими странами космического пространства, а также акваторий морей и океанов;

 защиту национальной территории и развернутых группировок войск от оружия массового поражения и ударов средств воздушно-космического нападения, в первую очередь баллистических и крылатых ракет.

Список литературы:

1. Васильев Ю. Взгляды ведущих стран НАТО на использование космоса в военных целях. Зарубежное военное обозрение. 2016, №1, С. 62-68.

2. *Малов А*. Центр военно-политических исследований.30.01.2014. http://www.eurasian-defence.ru. Дата обращения 05.02.2018.

3. *Морозов И., Баушев С., Каминский О.* Космос и характер современных военных действий.

http://www.vko.ru/koncepcii/kosmos-i-harakter-

sovremennyh-voennyh-deystviy. Дата обращения 05.02.2018.

¹ См.: Морозов И., Баушев С., Каминский О. Космос и характер современных военных действий.http://www.vko.ru/koncepcii/kosmosi-harakter-sovremennyh-voennyh-deystviy.Дата обращения 12.02.2018.

² ВасильевЮ. Взгляды ведущих стран НАТО на использование космоса в военных целях. Зарубежное военное обозрение. 2016, №1, С. 62-68.



СОВРЕМЕННАЯ НАВИГАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА ВИЗУАЛЬНОЙ ОДОМЕТРИИ

ХАЛЬМЕТОВ Д.Н. – старший оператор 3 научной роты КВ ВКС РФ ЖУК Ю.А. – инженер ОАО ГНПП «РЕГИОН»

ПАО «Красногорский завод им С.А. Зверева», г. Красногорск ОАО «Государственное научно-производственное предприятие «Регион», г. Москва

E-mail: dinar.baikonur@mail.ru, juliazhyk@gmail.com



Аннотация: В статье рассматривается навигация космическим мобильным роботом с использованием оценки изменения положения и ориентации по методу визуальной одометрии. Рассмотрено использование стереозрения в навигации ровера и соответствующая структура навигационной системы ровера. Подробно описан алгоритм визуальной одометрии и его основные элементы. Сделаны выводы по применению этого метода в современных космических роверах.

Хальметов Д.Н.

Ключевые слова: *мобильный робот, визуальная одометрия, навигация, отслеживание траектории.*

MODERN NAVIGATION OF PLANETARY ROVERS USING VISUAL ODOMETRY

KHALMETOV D.N. ZHYK Y.A.

«PJSC Krasnogorsky plant him S.A. Zvereva», Krasnogorsk OJSC GNPP «Region», Moscow

E-mail: dinar.baikonur@mail.ru, juliazhyk@gmail.com

Abstract: The article deals with navigation of planetary rovers based on using estimation of changes in position and orientation of rover using the method of visual odometry. Using stereovision in rover navigation and corresponding structure of rover navigation system are examined. The algorithm of visual odometry and its main elements are described in detail. Conclusions are drawn on the application of this method in modern space rovers.

Keywords: mobile robot, visual odometry, navigation, path-following.

ВВЕДЕНИЕ

Стереозрение – это одно из направлений машинного зрения, основанное на использовании принципов человеческого зрения для получения представления о глубине изображения и расстоянии до объектов. Благодаря этому становится возможным получение трехмерного окружения робота, в результате чего стереозрение нашло широкое применение в решении таких задач робототехники как навигация и распознавание образов.

Стереозрение особенно перспективно для использования в навигации роверов на поверхности удаленных планет благодаря своей малой энергозатратности и надежности - при использовании достаточного количеством камер, обеспечивающих широкое поле зрения, отпадает необходимость в дополнительных приводах в системе.

Визуальная одометрия является одним из самых распространенных методов оценки перемещения робота наряду с одометрией, использованием инерциальных измерительных блоков и отслеживанием перемещения с помощью спутниковых систем навигации. Каждый из этих методов обладает своими преимуществами и недостатками, но использование одновременно нескольких методов позволяет добиться существенно лучших результатов.

В настоящее время роверы, использующие для навигации все вышеперечисленные методы одновременно, способны безопасно перемещаться через неизвестные и потенциально опасные пространства, используя автономное пассивное стереозрение для предварительного обнаружения потенциально опасных для прохождения мест [1].

НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Система для автономной работы робота, показанная на рис. 1, состоит из нескольких ключевых подсистем, благодаря совместной работе которых ровер может точно следовать указанному пути, компенсировать проскальзывание и достигать заданной цели независимо от рельефа местности (проходимость ровера зависит только от механических ограничений системы движения). Эти подсистемы включают в себя блоки визуальной одометрии, полной кинематики ровера, фильтра Калмана, оценивающий положение робота, и компенсатор проскальзывания, соединённый с контроллером траектории [2], [3].

Визуальная одометрия – это алгоритм, который использует полученный с камер робота стереопары для того, чтобы привести ровер в заданное положение независимо от характеристик поверхности.

Блок полной кинематики робота использует данные датчиков положения системы движения (например, датчиков взаимного положения узлов шасси и датчиков оборотов колес) для получения собственной оценки движения.

Фильтр Калмана объединяет оценки от блока визуальной одометрии и бортового блока инерциальных измерений для получения оценки перемещения ровера. Обе поступающие на вход фильтра оценки не зависят от взаимодействия ровера с окружающей средой. Полученная на выходе фильтра оценка перемещения сравнивается с оценкой движения блока кинематики, которая существенно зависит от действия окружающей среды на робота. Сравнение проводится для выполнения статистического анализа разницы этих двух оценок и определения наличия проскальзывания и его величины. Если оценка от блока кинематики не может улучшить оценку фильтра Калмана, то считается, что статистически значимого проскальзывания не произошло. Если же проскальзывание было, то из разности двух оценок вычисляется вектор проскальзывания ровера, который впоследствии используется вместе с алгоритмов следования пути для вычисления команд движения, благодаря которым робот выдерживает заданную траекторию, компенсируя проскальзывание.

АЛГОРИТМ ВИЗУАЛЬНОЙ ОДОМЕТРИИ

Алгоритм визуальной одометрии был разработан в 1989 году Ларри Матисом. Несмотря на то, что с тех пор его работа была усовершенствована для повышения робастности и точности, ключевая идея осталась неизменной – для определения изменения местоположе-



Навигационная система мобильного робота

ния и ориентации двух и более пар стереоизображений используется оценка максимального правдоподобия.

Базовые шаги метода следующие:

1. Выбор особенностей, которые можно легко сопоставить на стереопарах и отслеживать при получении новых изображений.

Оператор интереса Фёрстнера применяется к левому изображению первой стереопары. Пиксели с более низкими значениями интереса являются наилучшими особенностями. Для того чтобы гарантировать равномерное распределение особенностей по всему изображению, задается минимальное расстояние между любыми двумя особенностями. Для уменьшения объема сортируемых данных изображение делится на сетки с размером ячейки существенно меньшим, чем минимальное расстояние между двумя особенностями. Только пиксель с наименьшим значением интереса в каждой сетке выбирается в качестве потенциальной особенности. Затем все потенциальные особенности сортируются в порядке убывания. Первые N пикселей, отвечающих требованию минимума расстояния, выбираются как особенности.

2. Анализ интервалов между особенностями Трехмерное положение выбранных особенностей определяется путем стереосопоставления. В идеальных условиях, лучи от одной особенности левого и правого изображения пересекаются в пространстве. Но из-за шумов на изображениях и ошибки сопоставления, так происходит не всегда. Величина интервала, то есть наименьшее расстояние между двумя особенностями, указывает на добротность стереосопоставления. Особенности с большим разрывом исключаются из дальнейшей обработки.

3. Отслеживание особенностей

После того, как ровер проехал некоторое расстояние, получают вторую пару стереоизображений. Особенности, выбранные по предыдущей паре, проецируются на вторую пару, используя информацию о приближенном движении, получаемую от блока бортовой одометрии колес.

Определение положения характеристик на плоскости второй пары изображений проводят с использования корреляции (для поиска) и аффинных шаблонов (для отслеживания). Отслеживание по аффинным шаблонам позволяет устранить ошибку отслеживания, вызванную большим креном и изменением масштаба между изображениями.

Затем на этих отслеженных особенностях второй пары изображений определяется их новое трехмерное положение. Если первоначальное предположение о движении верно, то разница между этими двумя трехмерными вычисленными положениями должна быть в заданных пределах. Когда же это предположение неверно, разница между двумя вычисленными положениями показывает ошибку начального предположения и может использоваться для определения изменения положения ровера.

4. Оценка движения

Оценка движения проводится в два этапа – в грубом приближении с помощью оценки Шонеманна и в более точном через оценку максимального правдоподобия [4].

Оценка Шонеманна использует сингулярное разложение (SVD) с ортогональным ограничением оценки матрицы поворота и перевода, которые преобразуют положения особенностей на изображении I₁ в найденные на изображении I₂. Метод Шонеманна отличается простотой и скоростью работы, но при этом крайне нестабилен при наличии больших ошибок. Для устранения этой проблемы используется метод наименьшего квадрата срединного значения. В этом методе случайным образом выбирается подмножество особенностей. Затем каждая особенность предыдущего кадра проецируется на текущий кадр и рассчитывается расстояние между этой проекцией и положением соответствующей особенности на І. После вычисляется общее число характеристик при заданном допуске ошибки. Такую процедуру выполняют несколько раз. Движение с наибольшим числом подходящих особенностей выбирается как наилучшее.

Наилучшая оценка движения, найденная с помощью описанной процедуры, улучшается с использованием оценки максимального правдоподобия движения. Эта оценка принимает разницы трехмерного положения и связанные с ними модели ошибок для того, чтобы оценить движение. Данный алгоритм обладает двумя отличающими его свойствами: во-первых, он оценивает непосредственно вращение трех осей таким образом, что устраняется ошибка, связанная со вращением матрицы оценок, которая появляется при использовании метода наименьших квадратов. Во-вторых, в его оценке включены модели ошибок, что существенно повышает точность.

АЛГОРИТМЫ КИНЕМАТИКИ

Алгоритмы кинематики робота выполняют две роли. Первая – решение прямой задачи кинематики ровера, в результате чего получается оценка его перемещения в зависимости от углов поворота колес и изменения взаимоположения узлов шасси. Вторая – решение обратной задачи кинематики робота, в результате чего определяются скорости колес необходимые для выполнения заданного движения.

Эти алгоритмы определяются конфигурацией системы движения робота [5][6].

ФИЛЬТР КАЛМАНА

Для оценки изменения положения и ориентации ровера используются инерциальные данные с блока инерциальных измерений IMU и относительные данные о положении от блоков визуальной одометрии и кинематики ровера. Так как для моделирования используется информация с датчиков, чаще всего используют непрямую форму расширенного фильтра Калмана, где для оценки состояния используются данные от IMU, а данные одометрии, в том числе визуальной, используются для обновления оценки состояния и выполнения периодических коррекций.

КОМПЕНСАТОР ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ

Компенсатор проскальзывания и алгоритм следования траектории являются центральным элементом системы навигации, показанной на рис 1.

Оба алгоритма используются вместе. На их вход поступают:

– вектор скольжения $[\dot{x} \, \dot{y} \, \dot{z}]_{slin}$,

- вектор положения $[x y z]_{pose}$

- вектор желаемого пути [x y]_{path}

На выходе алгоритма получается вектор скорости $[\dot{x} \, \dot{y} \, \dot{z}]_{cmd}$

Алгоритм выдерживания направления, работа которого показана на рис. 2, принимает желаемый путь ровера и вычисляет требуемую коррекцию направления движения. Этот алгоритм используется из-за своей устойчивости к ошибкам пути. Нужный путь состоит из набора линейных сегментов между точками маршрута. Однако точки маршрута могут быть расположены на любом расстоянии друг от друга, что позволяет составлять пути различной сложности. Алгоритм определяет желаемое направление движения путем вычисления пересечения окружности с центром-ровером с желаемой траекторией и расчета направления этого пересечения. Всегда выбирается точка пересечения, которая находится дальше по траектории. Ошибка направления вычисляется как разница углов направления на желаемую цель, ψ_{carrot} , и текущего направления, ψ_{nose} :



Рисунок 2. Выдерживание направления (carrot-heading, следование за морковкой)

Использование большего радиуса окружности приводит к сглаживанию особенностей траектории и более плавному движению ровера. Небольшой радиус окружности дает в результате большие изменения направления движения ровера, но с меньшей ошибкой отслеживания траектории. Радиус окружности выбирается, балансируя между близостью к желаемой траектории и величиной изменения направления. По начальным условиям, ошибка следования траектории ровера всегда будет меньше радиуса окружности. Если это условие не выполняется, то радиус окружности увеличивается до тех пор, пока не произойдет пересечение [7].

Когда компаратор Махаланобиса определяет, что произошло проскальзывание, выполняется расчет его величины путем сравнения выходного сигнала фильтра Калмана и выходного решения задачи прямой кинематики. Если же статистически значимого проскальзывания не произошло, то вектор проскальзывания состоит из нулей и алгоритм компенсации проскальзывания сводится к алгоритму контроля направления. Алгоритм компенсации проскальзывания состоит из двух отдельных контуров управления. Первый – контроллер направления, определяет скорость поворота ровера вокруг вертикальной оси как объединенную функцию ошибки направления и проскальзывания в направлении движения. Он старается достичь оптимального направления по алгоритму «следование за морковкой». Второй контур вычисляет скорость ровера в направлении, то есть перпендикулярно к нормальному прямолинейному движению ровера, полностью основываясь на проскальзывании в этом направлении за предыдущий период выборки. Оба контура используют предположение о том, что скольжение за предыдущий период выборки имеет некоторую корреляцию с проскальзыванием на текущем периоде. При уменьшении периода выборки это предположение становится более действительным.

Вычисленные команды скоростей ровера в дальнейшем отправляются на вход алгоритма решения обратной задачи кинематики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная в статье система навигации позволяет роверу точно следовать намеченному пути, компенсируя влияние проскальзывания, достигать поставленных целей независимо от геометрии местности и характеристик грунта (в рамках механических ограничений системы движения робота).

В рамках программ MER и MSL NASA визуальная одометрия показала себя как высокоэффективное средство обеспечения безопасности ровера при движении рядом с препятствиями [8].

В настоящее время наибольшими ограничениями использования данного метода для планетарных исследований заключается в существенном времени обработки изображений на существующих моделях бортовых компьютеров. Использование же более робастных методов определения особенностей на изображениях и автономного определения местности позволят создать по-настоящему робастную технологию.

Список литературы:

1. Helmick D. M., Cheng Y., Clouse D. S., Matthies L. H., Roumeliotis S. I. Path following using visual odometry for a Mars rover in high-slip environments // IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2004. Vol. 2. P. 772-789.

2. Olson C. F., Matthies L. H., Shoppers M., Maimone M. Robust stereo ego-motion for long distance

navigation // Proceedings of the IEEE Conference in Computer Vision and Pattern Recognition, 2000. Vol. 2. P. 453-458

3. Olson C. F., Matthies L. H., Shoppers M., Maimone M. Stereo ego-motion Improvements for robust rover navigation // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2001. P. 1099-1104

4. *Schonemann P. H.* A generalized solution of the orthogonal Procrustes problem // Psychometrika, 1966. Vol. 31. P. 1-10

5. *Muir P. F., Neumann C. P.* Kinematic Modeling of Wheeled Mobile Robots // Journal of Robotics Systems, 1987. Vol. 4. P. 281-340

6. *Craig J. J.* Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Pearson Education International, 2005. 480 p.

7. *Singh S.* FastNav: A System for Fast Navigation // Robotics Institute Technical Report. Carnegie Mellon University, 1991. 103 p.

8. *Maimone M., Cheng Y., Matthies L.* Two years of Visual Odometry on the Mars Exploration Rovers // Journal of Field Robotics, 2007. Vol. 24. P. 169-186



РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ПЛЕНОК НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ, НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ВИДИМОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

БОБРИКОВ А.А. - старший оператор 3 научной роты КВ ВКС РФ

ПАО «Красногорский завод им С.А. Зверева»

E-mail: rostok661@mail.ru



Аннотация: В данной статье представлены результаты полевых исследований контрастов поляризационных компонент отраженного от морской поверхности излучения между сликовой и чистой поверхностью при различных углах визирования. Результаты моделирования сравнивались с экспериментальными данными.

Ключевые слова: слики, поляризация, нефть.

Бобриков А.А.

DEVELOPMENT OF THE METHODS OF DETECTING OIL SLICKS ON THE MARINE SURFACE, BASED ON POLARIZATION MEASUREMENTS IN THE VISIBLE SPECTRUM

BOBRIKOV A.A.

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

E-mail: rostok661@mail.ru

Abstract: This paper presents the results of field studies of the contrasts of the polarization components of the radiation reflected from the sea surface between a slick and clean surface at different viewing angles. The results of the simulation were compared with the experimental data.

Keywords: slick, polarization, oil.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к Арктике в мире как никогда высок. Такое повышенное внимание связано, с одной стороны, с ресурсным потенциалом и транспортным значением Севера и Арктики, а с другой – с отсутствием признанной и нормативно оформленной демаркацией международных северных морских пространств и арктического шельфа.

Сложные климатические условия, слабо развитая инфраструктура ограничивают присутствие в регионе наземных сил, поэтому одну из главных ролей в защите экономических интересов Российской Федерации в арктической зоне играет ВКС. Перечень задач возлагаемых на ВКС в данном регионе чрезвычайно широк и включает в себя мониторинг морской поверхности и обеспечение поисково-спасательных мероприятий. В свете того, что краеугольным камнем мирового интереса к Арктике выступают углеводородные ресурсы, как в контексте их транспортировки, так и добычи, важное значение приобретает мониторинг нефтяных разливов.

Мониторинг разливов сопровождается значительными трудностями, связанных с огромными пространствами и разнообразием морской поверхности. Наиболее распространенным способом исследования нефтяных разливов по-прежнему останется фото/видео съемка в видимом диапазоне спектра. На данный момент, она служит, в первую очередь, для документирования и выявления особенностей уже обнаруженных нефтяных разливов.

Появление нефтяных пятен на поверхности воды приводит к изменению некоторых оптических характеристик в спектральном диапазоне от УФ до ближнего ИК [1-3]. Сюда относятся коэффициенты отражения и поглощения, а также контраст между чистой водой и нефтяными пятнами. Эти характеристики меняются в зависимости от типа нефти, степени ее выветривания, а также атмосферных условий. Отличия между водой и нефтью до сих пор не были получены экспериментально для всех возможных длин волн, атмосферных и погодных условий. Обобщение имеющихся данных представлено в работе *Fingas, 2014* [4]. Низкий контраст между нефтью и чистой водой в видимом спектре, зависимость от внешних условий, ориентации камеры, типа и толщины нефти, подверженность ложным целом (мелководье, водоросли, речные выносы) - все это делает автоматическое детектирование нефтяных разливов в видимом диапазоне по цветовым характеристикам весьма проблематичным.

С целью повышения контраста изображения, видеокамеры часто используются с различными оптическими фильтрами. Тем не менее, регистрируемое увеличение контраста не достаточно для уверенной идентификации нефтяных разливов.

Известно, что нефть на воде лучше видна в поляризационном свете. Таким образом, было предположено, что благодаря использованию поляризационных эффектов можно улучшить методы детектирования нефти. Но на практике это сопряжено с некоторыми трудностями, т.к. коэффициенты отражения вообще и поляризованного света в частности сильно зависят от условий съемки: высоты солнца, облачности, направления и скорости ветра, азимута солнца и наблюдателя, длины волны и типа нефтепродуктов [5]. В серии работ авторов [6-8] были проедены экспериментальные и теоретические исследования, направленные на поиск оптимальных условий наблюдения сликовых пятен на морской поверхности. Общий вывод заключается в использовании Р компоненты отраженного излучения в плоскости, содержащей вектор скорости ветра. Эти условия справедливы для оптимального наблюдения контрастов при скользящих углах визирования. Тем не менее, наблюдение величины контраста при фиксированным угле обзора не дает информации о природе слика. Такой вывод можно сделать только после анализа угловой зависимости контраста [6].

ОБОРУДОВАНИЕ

В качестве измерительного прибора использовалось камера с разрешением в 1920х1080 пикселей.

К изображению, которое выдает камера, применяется гамма коррекция для повышения контрастности и разборчивости темных участков. В связи с этим яркость пикселя на изображении отличается от истинного значения

$I_{\rm kop} \sim C I_{\rm MCT}^{\gamma}$

где $I_{\rm кор}$ яркость пикселя на экране, $I_{\rm ист}$ – численное значение цвета, а γ – показатель гамма-коррекции. Поэтому, перед анализом изображения полученного камерой необходимо произвести процедуру обратную гамма коррекции. Для этого предварительно была определена передаточная функция камеры, к которой и была применена линеаризация.

Для измерения векторов Стокса, принимаемого камерой излучения, перед объективом было смонтировано устройство вращения поляризатора-анализатора, приводимого в движение двигателем постоянного тока. Скорость вращения – 2 оборота в секунду.

В результате мы получаем последовательность изображений, полученных при различных углах поворота поляризатора. Положение, при котором пропускание поляризатора максимально определяется по метке нанесенной на пленку поляризатора.

РАСЧЕТ ВЕКТОРОВ СТОКСА

При определении векторов Стокса мы исходим из того, что излучением, обладающим круговой поляризацией при рассмотрении света, рассеянного атмосферой и морской поверхностью, можно пренебречь:

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_p \\ I_p \cos 2\psi \\ I_p \sin 2\psi \end{bmatrix}$$

где ψ - угол поворота поляризационного эллипса относительно некоторой системы координат, I_p – интенсивность поляризованного света.

В таком случае измеряемая камерой интенсивность будет равна

 $I_k = I_p \cos^2(\psi - \varphi) I_0/2$

где φ – угол поворота поляризатора относительно некоторой системы координат, I_0 – интенсивность неполяризованного света. Таким образом, мы имеем три неизвестные: I_p , I_0 и ψ ; которые находятся путем решения системы

линейных уравнений, полученных при разных углах φ . Хотя достаточно системы из трех уравнений, для увеличения точности вычислений используется гораздо больше.

Угол φ нам известен, только если рассматриваемый пиксель находится на оптической оси, тогда он равен углу поворота поляроида φ_0 . В противном случае его необходимо рассчитать, поскольку для других пикселей соотнесенная к ним ось визирования проходит не под прямым углом к плоскости поляризатора

$$\begin{split} \sin \varphi &= (P_1 \cdot P_2) \cdot W\\ \cos \varphi &= P_1 \cdot P_2 \end{split}, \\ \textbf{где} \ P_1 &= \frac{N * V}{|N * V|}; \ P_2 &= \frac{W * V}{|W * V|} \end{split}$$

здесь *V* – вектор визирования, указывающий на соответствующий пиксель; *N* - вектор нормали поверхности в фотограмметрической системе координат; *W* - вектор в направлении маркера, указывающего направление максимального пропускания пленочного поляризатора

$$N = R_{\alpha\omega}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0\\0\\1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0\\\sin(\omega)\\\cos(\omega) \end{bmatrix}; W = \begin{bmatrix} \sin(\varphi_0)\\0\\\cos(\varphi_0) \end{bmatrix};$$

Контраст между сликовой и чистой морскими поверхностями вычисляется по формуле

$$K = \frac{I_c - I_{\rm q}}{I_{\rm q}}$$

где I_c , I_q – интенсивность компонент излучения, отраженных от силковой области и чистой поверхности.

модель

При вычислении характерных зависимостей Р и S поляризованных компонент отраженного излучения, мы опирались на аналитическую модель, разработанную нами ранее [6]. Модель учитывает основные внешние факторы, влияющие на характеристики отражённого излучения взволнованной морской поверхностью (скорость и направление ветра, координаты солнца и наблюдателя, тип поверхности, восходящее излучение моря, облачность).

При расчете модели неба использовались уже существующие модели распределения

яркости по небосводу, величина степени поляризации вычисляется исходя из модели Рэлея. С этими данными нетрудно восстановить вектор Стокса для нисходящей диффузной радиации.

С помощью данной модели были рассчитаны контрасты между силковой и несликовой поверхностями моря в различных условиях. В качестве входных параметров выступают следующие характеристики: Зенитный и Азимутальный угол наблюдения; Зенитный и Азимутальный угол Солнца; скорость и направление ветра; Облачность; Сликовая поверхность или чистая вода; Коэффициент преломления; Длина волны.

Меняя соответствующие характеристики, мы можем смоделировать контраст р-и s-поляризации в широком диапазоне условий наблюдений и типов пленки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ Модельные расчеты

Рассмотрим результаты модельных расчетов контрастов между сликовой и чистой морскими поверхностями для р-и s- поляризации отраженного излучения для машинного масла в условиях ясного и пасмурного неба. Солнце имеет азимутальный угол равный 0° и зенитный равный 40°. Скорость ветра равна 6.5 м/с, направление – вдоль плоскости солнечного меридиана. Отметим, что ранее [6] мы уже пришли к выводу, что при данной геометрии тонкие слики на морской воде выгоднее наблюдать при скользящих углах с солнечной стороны в р- поляризации, это верно, как для ясного неба, так и для пасмурного.

В условиях пасмурного неба (рис.1а-б) величина контрастов отраженного излучения определяется свойствами взволнованной поверхности, а именно показателем преломления. Для величины контрастов р- и s- компонент характерны значения порядка 50-60% в интервале зенитных углов наблюдения (-30° и 30°) и (-50° и 50°), соответственно, здесь минус означает противосолнечную сторону. Максимы достигаются в интервале зенитного угла 10-30° с противосолнечной стороны и равны 60% и 56% для р- и s- компонент, соответственно.

В случае ясного неб (рис. 1в-г) а величина контрастов отражённого излучения определя-

ется не только свойствами самой отражающей поверхности, но и распределением яркости и степени поляризации по небосводу. В связи с этим, в обоих случаях мы наблюдаем бликовые максимумы в интервале зенитных углов наблюдения 30-40° с противосолнечной стороны, которые равны 120%и 96%, соответственно для ри s- компоненты. При этом в случае s- поляризации наблюдается максимум - 40% в районе зенитного угла наблюдения равного 20°, который отсутствует на графике для р- поляризации.

Полевые исследования

Проведение регулярных полевых исследований при разных условиях наблюдения для сликов различной природы представляет собой нетривиальную задачу. На данный момент нами были получены результаты для слика образованного разливом машинного масла. Измерения проводились в условиях ясной погоды, высота солнца составляла 9°, азимут относительно угла визирования порядка 90°. Степень поляризации неба исходя из модели Релея равна 53%

Рассмотрим зависимость контрастов между сликовой и чистой морскими поверхностями от угла визирования для р- и s- поляризационных компонент отраженного от морской поверхности излучения (рис. 2), в дальнейшем - Кр(ω) и Кs(ω), соответственно. При скользящих углах визирования (рис. 2а) графики контраста Кр(ω) и Ks(ω) для обеих поляризационных компонент слабо отличимы, средние значения равны 0.2 и 0.19 для р- и s- поляризации, соответственно. С уменьшением угла визирования графики Кр(ω) и Ks(ω) претерпевают значительные изменения (рис. 26-в).

В случае s- компоненты, в виде максимумов начинают проявляться интерференционные полосы, при этом значения контрастов варьируется от 0.02-0.04 до 0.2-0.25 в минимумах и максимумах, соответственно. Тогда как явного влияния интерференции на Кр(ω) не обнаруживается, при этом контраст принимает отрицательные значения в среднем варьируясь от -0.95 для угла визирования порядка 5° до -0.01 для 68°. Подобная картина характера для интервала углов наблюдения 54-64°. При дальнейшем



Гисунок 1. Контурная карта в полярной системе координат для контраста p- и s- компоненты [6]: a) – пасмурное небо, p-поляризация; б) – пасмурное небо, s-поляризация; в) – ясное небо, p-поляризация; г) – ясное небо, s-поляризация



Контраст s и р поляризационных компонент в зависимости от угла визирования при высоте измерения: a) 7 метров; б) 40 метров; в) 53 метра; г) 105 метров


Рисунок 3. Контраст между сликовой и чистой морской поверхностью в максимумах и минимумах интерференционных полос, а также контраст рассчитанный с помощью модели для: а) р-компоненты; б) s-компоненты

уменьшении углов визирования, графики Кр(ω) и Ks(ω) снова сближаются, при этом в обоих случаях проявляются четкие интерференционные максимумы и минимумы (рис. 2г).

Произведем сравнение с результатами численного моделирования для условий приведенного ранее полевого исследования (рис. 3). Ход значений контраста для р- поляризации хорошо согласуется с теорией (рис. 3а), в отличии от графика для s-компоненты (рис. 3б). Подобная разница объясняется тем, что используема модель, описывает тонкие поверхностные пленки, а значит и не предусматривает появления интерференционных полос.

Список литературы:

1. Andreou, C., Karathanassi, V., 2011. Endmember detection in marine environment with oil spill event. Proc. SPIE – Int. Soc. Opt. Eng. (8180), 81800P.

2. Otremba, Z., Piskozub, J., 2001. Modelling of the optical contrast of an oil film on a sea surface. Opt. Exp., 411–416.

3. Yin, Q.-Z., Li, K., Zhou, C., Liu, C., Chu, X.-M., Zheng, J., 2012. Research on oil spill monitoring experiments based on OFD-1 oil film detector. In: 2012

2nd International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, RSETE 2012 – Proceedings, 6260699.

4. Fingas, M., Brown, C. Review of oil spill remote sensing. Mar. Pollut. Bull. (2014), http://dx.doi. org/10.1016/j.marpolbul.2014.03.059

5. Shen, H.-Y., Zhou, P.-C., Feng, S.-R., 2011. Research on multi-angle near infrared spectralpolarimetric characteristic for polluted water by spilled oil. Proc. SPIE – Int. Soc. Opt. Eng. 8193, 81930M.

6. Шмирко К.А., Павлов А.Н., Бобриков А.А. Расчет отраженного взволнованной морской поверхностью диффузного солнечного излучения. // Вестник ДВО РАН. 2015. №3. С.36-44

7. Шмирко К.А., Константинов О.Г., Павлов А.Н., Дубинкина Е.С. Особенности формирования сликов на морской поверхности. // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 1. С. 107-114.

9. Шмирко К.А., Константинов О.Г., Кульчин Ю.Н., Столярчук С.Ю., Павлов А.Н., Коренский М.Ю. Моделирование оптического контраста тонких органических пленок на морской поверхности. // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 3. С. 422-432.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ ПОДГОТОВКИ ПЕРСОНАЛА ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

БАЖЕНОВ И.А. – оператор 3 научной роты КВ ВКС РФ

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

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



Баженов И.А.

Аннотация: В данной статье проведен анализ оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации. Оборонно-промышленный комплекс является одним из ключевых элементов образования экономики стран. Одной из необходимых задач по обеспечению национальной безопасности стран является подготовка профессиональных кадров на предприятиях оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации. К потенциальным работникам относятся выпускники высших и средне-специальных учебных заведений, военнослужащих запаса с высшим и среднем профессиональным образованием. В ходе проведенного анализа было выявлено, что на территории Российской Федерации подготовка кадров

оборонно-промышленного комплекса находится на низком уровне, поэтому предложены пути их решения в исследуемой области.

Ключевые слова: оборонно-промышленный комплекс, подготовка кадров, развитие, производство, система образования.

MAIN PROBLEMS AND WAYS OF SOLUTION FOR PREPARATION OF PERSONNEL OF THE DEFENSE INDUSTRIAL COMPLEX OF THE RUSSIAN FEDERATION

BAZHENOV I.A.

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

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

Abstract: This article analyzes the defense industry of the Russian Federation. The defense-industrial complex is one of the key elements of the education of the economies of countries. One of the necessary tasks to ensure national security of the countries is the training of professional personnel in the enterprises of the defense-industrial complex of the Russian Federation. Potential workers include graduates of higher and secondary special educational institutions, military reserve personnel with higher and secondary vocational education. In the course of the analysis it was revealed that the training of the personnel of the defense-industrial complex on the territory of the Russian Federation is at a low level, that's why the ways of their solution in the researched area are offered.

Keywords: defense-industrial complex, personnel training, development, production, education system.

Оборонно-промышленный комплекс (ОПК) является одним из ключевых элементов образования экономики стран. ОПК позволяет Вооруженным Силам обеспечивать национальную безопасность страны, которая заключается в обеспечении территориальной и государственной целостности, а также защите независимости государств [1].

Российская Федерация унаследовала от Советского Союза огромный плацдарм ОПК, который насчитывает около 1400 предприятий [2]. Данные предприятия делятся по следующим отраслям промышленности [3]:

 авиационно-космическая промышленность (авиационная и ракетно-космическая);

 производство боеприпасов (промышленность боеприпасов и спецхимии);

- производство обычного вооружения;

 судостроение (судостроительная промышленность);

 производство систем управления (радиопромышленность, промышленность средств связи, электронная промышленность)

Предприятия оборонной промышленности осуществляют перевооружение армии новейшими образцами вооружения и военной техники, позволяя Вооруженным силам решать сложные задачи [2]. Помимо этого ОПК решает следующие задачи [4]:

- создание новых образцов вооружения;

 внедрение на оборонных предприятиях новых технологических процессов.

Для решения перечисленных задач необходимо решить одну и более значимую задачу на оборонных предприятиях Российской Федерации – подготовить соответствующие кадры ОПК [4].

Однако существует проблема подготовки кадров оборонной промышленности. Она заключается в нескольких аспектах:

1) потенциальные работники;

2) предприятия ОПК;

 образовательные учреждения подготовки кадров.

К потенциальным работникам относятся выпускники высших и средне-специальных учебных заведений, военнослужащих запаса с высшим и среднем профессиональным образованием. Вышеперечисленным лицам присуще завышать уровень заработной платы на оборонных предприятиях Российской Федерации. Кроме того, выпускники ВУЗов и ССУЗов имеют низкий уровень мотивации для работы на предприятиях ОПК. Молодежь стремится работать в сферах, не связанных с производством.

Также стоит отметить, что завышение заработной платы и отсутствие соответствующей мотивации может быть вызвано низким уровнем компенсации труда в данной отрасли экономики, завышением требований квалификации работодателей к потенциальным работникам, завышением уровня мотивации молодежи, неправильности прогнозирования с целью удовлетворения оборонных предприятий соответствующими инженерными кадрами.

В образовательных учреждениях также существуют негативные стороны при подготовке кадров. Это связано с отсутствием системы развития рынка труда, низким уровнем компетенции преподавателей (применяют в системе образования устаревшие методики обучения), отсутствие мотивации у молодежи. К вышеперечисленному также стоит добавить, что между предприятиями ОПК и образовательными учреждениями плохо развит уровень взаимодействия между собой. Это обусловлено следующими причинами [4]:

 – ненадлежащий уровень работы кадровых служб оборонных предприятий с потенциальными работниками;

 низкий уровень мотивации абитуриентов на специальности технических направлений, что заставляет образовательным учреждениям осуществлять набор будущих студентов с низкими баллами по результатам ЕГЭ;

– низкий уровень подготовки кадров;

 отсутствие какой-либо ответственности студентов перед предприятиями ОПК, предоставившим им возможность поступить учебные заведения по целевому набору.

Из вышеперечисленных проблем вытекают неблагоприятные ситуации, которые рано или поздно необходимо будет решить [5]:

а) высокий уровень среднего возраста работников (50 лет);

б) недостаток профессиональных кадров.

в) большое количество выпускников с гуманитарным образованием, нежели выпускников с техническим образованием;

г) низкий уровень заработной платы (в среднем, около 20 тыс. руб.).

Президент Российской Федерации 7 мая 2012 года издал Указ «О реализации планов (программ) строительства и развития Вооруженных Сил Российской Федерации, других войск, воинских формирований и органов и модернизации оборонно-промышленного комплекса». Требования данного указа будет исполнять государственный оборонный заказ. Данный Указ позволит до 2020 года пересмотреть систему образовательной подготовки молодого персонала, повышению уровню жизни и быта работников оборонной промышленности [6].

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что на территории Российской Федерации подготовка кадров оборонно-промышленного комплекса находится на низком уровне, поэтому необходимо принять следующие меры по ее развитию:

1) Разработать качественную систему прогнозирования подготовки кадров обороннопромышленного комплекса Российской Федерации.

2) Сбалансировать выпуск молодежи из ВУ-Зов и ССУЗов по техническим и гуманитарным специальностям.

3) Пересмотреть систему образования в высших учебных заведениях, а именно, необходимо вернуть одноуровневую систему подготовки инженерных кадров (возврат к квалификации «специалист», так как люди с данным уровнем квалификации наиболее подготовлены). На данный момент стоит уделить должное внимание подготовке кадров по квалификации «магистр» при тесном взаимодействии оборонными предприятиями Российской Федерации. Кроме того оборонные предприятия в своем пользовании должны иметь площадки для проведения научно-исследовательских и научнотехнических работ. 4) Наладить работу кадровых служб оборонных предприятий с потенциальными работниками.

5) Улучшить уровень жизни и быта работников оборонной промышленности Российской Федерации. При улучшении произойдет мотивация молодежи, что в свою очередь скажется на снижении среднего возраста всех работников оборонной промышленности.

5) Введение материальной ответственности абитуриента/студента за нарушение условий договора поступления в учебные заведения по целевому набору.

Список литературы:

1. Суворова А.А., Оборонно-промышленный комплекс России: состояние и проблемы развития / А.А. Суворова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Серия: Современные проблемы экономической теории и регионалистики – 2016. – С.690-691.

2. Катык К. В., Крушенко Г.Г., Оборонно-промышленный комплекс России: проблемы и решения / К.В. Катык, Г.Г. Крушенко / Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева – 2012. – С.212-215.

3. *Ковбаса Н.А.*, Современное состояние оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации. Российское предпринимательство. Серия: Экономика отрасли. 2012. № 12 (210). С. 94-100.

4. Григорьев С.Н., Еленева Ю.Я., Подготовка кадров оборонно-промышленного комплекса России: проблемы и пути их решения / С.Н. Григорьев, Ю.Я. Еленева // Высшее образование в России.–2013. – №6. – С.3-11.

5. Латышенок Д.К., Современное состояние оборонно-промышленного комплекса России / Д.К. Латышенок // Вестник СибГАУ. Том 16. – 2015. – № 1. – С.253-260.

6. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2012 г. № 603 «О реализации планов (программ) строительства и развития вооруженных сил Российской Федерации, других войск, воинских формирований и органов и модернизации оборонно-промышленного комплекса».



РАЗРАБОТКА ЯДРА СИСТЕМЫ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАМОТОЧНО-ВЫКЛАДОЧНЫХ СТАНКОВ

СИДОРЕНКО А.А. – оператор 3 научной роты КВ ВКС РФ ДЕРЕВЯНКО Д.Н. – оператор 3 научной роты КВ ВКС РФ

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

E-mail: sidorenko1993@icloud.com



Сидоренко А.А. Деревянко Д.Н.

Аннотация: В данной статье рассматриваются практические аспекты разработки ядра системы числового программного управления намоточно-выкладочных станков, используемых для создания изделий из композиционных материалов. Предложен алгоритм look-ahead использующий динамически определяемое количество просматриваемых наперед кадров. Описан способ ограничения скорости при смене направления движения рабочих органов станка, позволяющий свести к минимуму рывки на стыке кадров управляющей программы. Представлен подход. применяе-

мый при построении профиля скорости, учитывающий возможность изменения подачи во время отработки исполняемой программы и предложена собственная классификация блоков интерполятора. Представлена общая структура ядра и подробно описано взаимодействие его основных частей, работающих как с различными приоритетами. Показаны результаты работы системы под управлением операционной системы Linux с ядром реального времени Linux Debian SMP PREEMPT RT, позволяющим выполнять задачи интерполяции и управления движущимися частями станка в режиме жесткого реального времени.

Ключевые слова: система числового программного управления, интерполяция, профиль скорости, алгоритм look-ahead, блоки интерполятора.

DEVELOPMENT OF THE COMPUTER NUMERICAL CONTROL SYSTEM'S CORE FOR WINDING AND LAYING MACHINES

DEREVIANKO D. N., SIDORENKO A. A.

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

E-mail: sidorenko1993@icloud.com

Abstract: This article discusses practical aspects of the software system's core's development for winding machines, that are used for creation composite materials products. A look-ahead that uses a dynamically determined number of frames algorithm is proposed. The speed limitation method allowing to minimize jerks at the junction of frames is described. The approach used in constructing the profile velocity, that consider the speed changing during the execution of programs and classification of interpolator's blocks is proposed. The general structure of the core is presented and described in detail. The results of the system's work running on Linux operating systems with the real-time kernel Linux Debian SMP PREEMPT RT, allowing to perform interpolation and drive control tasks in hard real-time mode, are shown.

Keywords: *numerical control system, interpolation, speed profile, look-ahead algorithm, interpolator's blocks.*

ВВЕДЕНИЕ

Изделия из композиционных материалов, изготовленные на намоточно-выкладочных станках методами сухой и мокрой намотки, находят все более широкое применение при изготовлении различных изделий, начиная от рыболовных удочек и корпусов лодок и заканчивая лопастями вертолетов и корпусами твердотопливных ракетных двигателей. При этом вопросы, связанные с управлением процессом намотки с учетом специфики требований, предъявляемых к кинематике, точности и быстродействию подобных станков недостаточно широко освещены.

Вследствие несовершенства алгоритмов, применяемых при расчете законов движения намоточно-выкладочного оборудования, возникают погрешности воспроизведения заложенных в управляющих программах траекторий, а в некоторых случаях – возрастает динамическая нагрузка на составные части станка, что приводит к уменьшению срока его эксплуатации. Исходя из этого, актуальной является тема разработки ядра системы управления станком с числовым программным управлением, в котором будет учитываться специфика процессов намотки и выкладки.

1. АЛГОРИТМ LOOK-AHEAD С ДИНАМИ-ЧЕСКИ ОПРЕДЕЛЯЕМЫМ КОЛИЧЕСТВОМ ПРОСМАТРИВАЕМЫХ КАДРОВ

Для решения задачи сокращения нагрузок на составные части станка, необходимо оптимизировать работу интерполятора ядра системы числового программного управления. Для этой цели используется алгоритм look-ahead, позволяющий для каждого кадра управляющей программы найти такую конечную скорость, которая позволяет:

- пройти участок максимально быстро,

 ограничить рывок на стыке кадров при смене направления движения

выполнить остановку через заданное количество кадров.

Выполнение указанных ограничений требует введения ряда требований к конечной скорости каждого кадра управляющей программы, которая должна:

 не превышать заданную управляющей программой скорость в следующем и текущем кадрах.

- достигаться из конечной скорости следующего кадра при движении с максимальным ускорением *a*;

 – учитывать смену направления движения на заданный угол α;

Введенные ограничения выражаются формулой (1)

$$Fe_{i} = \min\left(\sqrt{Fe_{i+1}^{2} + 2aL_{i+1}}, \sqrt{\frac{(aT)^{2}}{2(1 - \cos(\alpha_{i}))}}, Ff_{i}, Ff_{i+1}\right)$$
(1)

где Fe_i — конечная скорость в i-ом кадре; Ff_i — заданная программно скорость в i-ом кадре; L_i — расстояние, проходимое в i-ом кадре; T — время работы одного такта интерполятора.

Используемый способ нахождения ограничения скорости при изменении направлении движения основан на проверке рывка по каждой из осей на стыке соседних кадров. Помимо указанных ранее исходных данных, он использует значения перемещений по каждой из осей в i-ом кадре (ΔX_i ,..., ΔZ_i) и в кадре i+1 (ΔX_{i+1} ,..., ΔZ_{i+1}). По формуле (2), где ΔV_{mx} ,..., ΔV_{mz} - максимальные изменения скорости между двумя

кадрами по каждой оси, находится изменение подачи для каждой из осей на границе соседних кадров, а затем по формуле (3) находится коэффициент Q.

$$\begin{cases} \Delta V_{x} = Ff_{i} \frac{\Delta X_{i}}{L_{i}} - Ff_{i+1} \frac{\Delta X_{i+1}}{L_{i+1}} \\ \dots & (2) \\ \Delta V_{z} = Ff_{i} \frac{\Delta Z_{i}}{L_{i}} - Ff_{i+1} \frac{\Delta Z_{i+1}}{L_{i+1}} \\ Q = \min \left\{ \frac{\Delta V_{mx}}{\Delta V_{x}}; \dots; \frac{\Delta V_{mz}}{\Delta V_{z}} \right\} & (3) \end{cases}$$

Если $Q \ge 1$, то ограничение (2) не рассматривается. В противном случае, по одной либо по нескольким осям происходит превышение максимального допустимого изменения скорости между двумя соседними кадрами. В этом случае конечная скорость i-го кадра Fe_i находится по формуле (4), а начальная скорость (i + 1)-го кадра $Fs_{i,1}$ по формуле (5).

$$Fe_i = Q \cdot Ff_i \tag{4}$$

$$Fs_{i+1} = Q \cdot Ff_{i+1} \tag{5}$$

При использовании алгоритма look-ahead необходимо знать число просматриваемых кадров *N*. Классическим подходом является определение фиксированного количества просматриваемых кадров. Однако более оптимальное решение – динамически определяемое по формуле (6) число просматриваемых кадров на основе длины тормозного пути, проходимого во время снижения скорости до нуля, которую можно определить из заданного начального значения подачи и длины кадра.

 $\sum_{i=1}^{N} L_i > \frac{Fs^2}{2a} + L_0$ (6)

где Fs – начальная скорость в текущем кадре; L_0 – расстояние, проходимое в текущем кадре; a – ускорение.

Используя описанные способы нахождения скорости между кадрами и количества просматриваемых кадров, был разработан алгоритм, блок-схема которого представлена на рис. 1, отличающийся от алгоритмов с фиксированным количеством кадров более высокой скоростью выполнения за счет уменьшения количества необходимых расчетов.

2. ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ

Построение профиля скорости, используемого в дальнейшем интерполятором, выполняется планировщиком траектории. В [2, 3] предлагается хранить информацию о профиле скорости и передавать их на исполнение интерполятору в специальных структурах данных, называемых блоками.

Исходными данными, получаемыми планировщиком о кадре, являются четыре величины: проходимое в кадре расстояние L_{o} , подача в начале кадра *Fs*, заданная в управляющей программе подача для кадра *Ff*, подача в конце кадра *Fe*. Помимо этих исходных данных,



Рисунок 1. Блок схема алгоритма look-ahead

Таблица 1. Используемые в интерполяторе типы блоков



планировщику известны две константы: время выполнения одного цикла интерполяции и максимальное ускорение.

Первым шагом при построении профиля скорости является определение типа конструируемого блока. В разработанном планировщике траекторий выделяется три типа блоков, каждый из которых подробно описан в таблице 1. В зависимости от типа блока по соответствующим формулам определяются значения пяти величин: времени замедления *Tr*, времени ускорения *Ta*, времени движения с постоянной скоростью *Tc*, времени торможения *Td* и максимальной скорости *Fm*.



Нормальный блок до и после подготовки к интерполяции

3. ПОДГОТОВКА ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ К ОБРАБОТКЕ ИНТЕРПОЛЯТОРОМ

Передаче профиля скорости интерполятору должна предшествовать его предварительная обработка, связанная с тем, что результатом работы планировщика траектории является количество циклов интерполяции *N* на каждом из этапов (ускорение, постоянная скорость, торможение), выраженное целым неотрицательным числом и определяемое по формуле (7), а условие кратности не учитывается при построении профиля скорости. Из этого следует, что на каждом из участков присутствуют фрагменты, время выполнения которых меньше времени выполнения одного цикла интерполяции.

$$N_{\Im mana} = \operatorname{int}\left(\frac{T_{\Im mana}}{T_{\eta u \kappa \pi a} \ u \mu mepno\pi \eta u u}\right)$$
 (7)

На рис. 2 показан пример подготовки нормального блока к интерполяции. Для части расстояния *Lb* выделяется дополнительный цикл интерполяции с постоянной скоростью, если *Lb* > *T* · *Fm*, остальная часть этого расстояния разбивается поровну между всеми циклами интерполяции блока.

4. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Представленные в предыдущих разделах алгоритмы были реализованы при разработке ядра системы числового программного управления, работающего под управлением операционной системы Linux с ядром реального времени Linux Debian SMP PREEMPT RT, обеспечивающим режим жесткого реального времени. Общая структура ядра представлена на рис. 3.





Решаемые ядром системы задачи разделены на нити выполнения, работающие с разными приоритетами и политиками планирования. При этом для каждой из нитей выполнения явно указан номер ядра процессора, на котором он должен исполняться. Интерпретатор и поток графический интерфейс пользователя работают под управлением стандартного планировщика Linux, без использования реального времени на ядре номер 1.

Таблица 2. Результаты отработки управляющей программы



– подача, заданная в управляющей программе

– фактическая подача

Интерпретатор выполняет покадровый разбор управляющей программы, помещая результат разбора в кольцевой буфер, который используется им совместно с интерполятором. Как только буфер полностью заполняется, поток «засыпает» до тех пор, пока в буфере не появится свободное место. Интерполятор и контроллер позиции работают в режиме реального времени с использованием политики планирования Round-Robin на ядрах 2 и 3 соответственно, обмениваясь информацией между собой посредством разделяемой памяти.

Результаты работы алгоритма Look Ahead, планировщика траектории и интерполятора представлены в таблице 2 (По горизонтальной оси – время в мс, по горизонтальной оси - подача в м/мин)

Как видно из данного примера, применение алгоритма опережающего просмотра при отра-

ботке программ, состоящих из кадров с малым перемещением, существенно увеличивает скорость выполнения управляющей программы без потери точности позиционирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были рассмотрены основные аспекты создания ядра числового программного управления намоточно-выкладочных станков. Представлен алгоритм look-ahead, использующий динамически определяемое количество кадров и показывающий более высокую производительность, чем аналогичные алгоритмы с фиксированным количеством кадров. Детально описан способ нахождения ограничения скорости при изменении направлении движения рабочих органов станка на стыке соседних кадров управляющей программы. Предложен способ подготовки кадров к интерполяции, позволяющий не учитывать критерий кратности при построении профиля скорости. Представлены практические результаты работы системы.

Список литературы:

1. Jun Hu Lingjian Xiao Yuhan Wang Zuyu Wu. An optimal feedrate model and solution algorithm for a high-speed machine of small line blocks with lookahead. Springer-Verlag London Limited 2006.

2. *Lin Wang, Jianfu Cao*. A look-ahead and adaptive speed control algorithm for high-speed CNC equipment. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2012.

3. *Cheol-Soo Lee*. Generation of Velocity Profiles with Speed Limit of Each Axis for High-Speed Machining using Look-Ahead Buffer. International journal of precision engineering and manufacturing. 2010.

4. *Мартинов Г.М*. Алгоритм опережающего просмотра Look-ahead в современных системах ЧПУ и параметры его настройки. Стружка. 2007. №3.С. 52-54.

5. *Meng-Shiun Tsai, Ying-Che Huang.* A novel integrated dynamic acceleration/deceleration interpolation algorithm for a CNC controller. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016.

6. *Fangyu Peng, Xubin Chen, Yong Zhou, Li Li, Bin Li.* Look-Ahead Scheme for High Speed Consecutive Micro Line Interpolation Based on Dynamics of Machine Tool. National Numerical Control System Engineering Research Center, 2008.

7. *Hua JiYan, Li, Jian Wang.* A software oriented CNC system based on Linux/RTLinux. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008.

8. Di Li, Jiewen Wu, Jiafu Wan, Shiyong Wang, Song Li, Chengliang Liu. The implementation and experimental research on an S-curve acceleration and deceleration control algorithm with the characteristics of end-point and target speed modification on the fly. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017.

9. *Haihua Mu, Yunfei Zhou, Sijie Yan, Aiguo Han.* Third-order trajectory planning for high accuracy pointto-point motion. Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China. 2009.

10. *Li-Bing Zhang, You-Peng You, Xue-Feng Yang*. A control strategy with motion smoothness and machining precision for multi-axis coordinated motion CNC machine tools. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013.

References

1. Jun Hu Lingjian Xiao Yuhan Wang Zuyu Wu. An optimal feedrate model and solution algorithm for a high-speed machine of small line blocks with lookahead. Springer-Verlag London Limited 2006.

2. *Lin Wang, Jianfu Cao.* A look-ahead and adaptive speed control algorithm for high-speed CNC equipment. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2012.

3. *Cheol-Soo Lee*. Generation of Velocity Profiles with Speed Limit of Each Axis for High-Speed Machining using Look-Ahead Buffer. International journal of precision engineering and manufacturing. 2010.

4. *Martinov G.M.* Algoritm operezhayushchego prosmotra Look-ahead v sovremennyh sistemah CHPU i parametry ego nastrojki [Look-ahead algorithm in modern CNC systems, its parameters and configuration]. Struzhka. 2007. №3.

5. *Meng-Shiun Tsai, Ying-Che Huang.* A novel integrated dynamic acceleration/deceleration interpolation algorithm for a CNC controller. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016.

6. *Fangyu Peng, Xubin Chen, Yong Zhou, Li Li, Bin Li.* Look-Ahead Scheme for High Speed Consecutive Micro Line Interpolation Based on Dynamics of Machine Tool. National Numerical Control System Engineering Research Center, 2008.

7. *Hua JiYan, Li, Jian Wang*. A software oriented CNC system based on Linux/RTLinux. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008.

8. Di Li, Jiewen Wu, Jiafu Wan, Shiyong Wang, Song Li, Chengliang Liu. The implementation and experimental research on an S-curve acceleration and deceleration control algorithm with the characteristics of end-point and target speed modification on the fly. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017.

9. *Haihua Mu, Yunfei Zhou, Sijie Yan, Aiguo Han.* Third-order trajectory planning for high accuracy pointto-point motion. Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China. 2009.

10. *Li-Bing Zhang, You-Peng You, Xue-Feng Yang*. A control strategy with motion smoothness and machining precision for multi-axis coordinated motion CNC machine tools. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013.



РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ ТВЕРДОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

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

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

E-mail: chernych3@rambler.ru



Борбенчук А.С. Чернышев А.О. Балданов Д.Ш.

Аннотация: В данной статье предлагается использовать отношение работы, затраченной на упруго-пластическую деформацию при контакте индентора с испытуемым материалом, и деформируемого объема образца материала, определяемого по контактной глубине внедрения индентора, для расчета твердости образца. Рассматривается

схема работы магнитоиндукционной установки для динамического индентирования и алгоритм обработки данных на С# с микроконтроллера для получения характеристик материала.

Ключевые слова: динамическое индентирование, неразрушающие методы контроля, твердость, алгоритм определения твердости.

SOFTWARE OF THE REALIZATION OF THE ALGORITHM OF THE DYNAMIC METHOD OF INDENTATION THE VOLUME SOLIDITY OF STRUCTURAL MATERIALS

BORBENCHUK A.S., CHERNYSHEV A.O., BALDANOV D.Sh.

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

E-mail: chernych3@rambler.ru

Abstract: This work is devoted to the study of the dynamic indentation of materials. In this work, an energy approach was proposed in the determination of the rigidity of materials. To calculate the rigidity, it is proposed to use the ratio of the work spent on elasto-plastic deformation upon contact of the indenter with the material under test, and the deformable volume of the sample of the material, determined from the contact depth of the indenter. A program was written in the programming language C # for processing values, calculating rigidity and further transferring information for analysis and display.

Keywords: *dynamic indenting, non-destructive testing methods, hardness, algorithm for determining hardness.*

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений развития в области определения числа твердости является метод динамического индентрирования. Принцип метода основывается на непрерывной регистрации контактного взаимодействия индентора с испытуемым образцом. Регистрация движения индентора зависит от таких характеристик как: глубины проникновения, глубина остаточной деформации, упругого прогиба на границе контакта.

Таким образом, прибором, реализующим данный метод определения твердости, одновременно регистрируются зависимости контактных усилий от времени F(t) и перемещений индентора от времени h(t). В основном, от данных зависимостей переходят к зависимости F(h), которая является аналогом зависимости напряжения от относительной деформации $\delta = f(\varepsilon)$ в стандартных испытаниях [2].

Массивы данных, содержащих значения контактных усилий, скорости движения и перемещения индентора являются взаимозависимыми, и имея один из массивов можно получить остальные путем интегрирования или дифференцирования.

Возможность изменения протоколов испытаний и программы обработки данных позволяется получать более двадцати различных физико-механических характеристик материала, что делает динамическое индентирование гораздо более информативным, чем испытание на одноосное растяжение.

Таким образом, используя метод индентирования можно оперативно и безобразцово получить информацию о свойствах материала при минимальных временных затратах.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В приборах, реализующих метод динамического индентирования, исходной информацией об испытуемом объекте является зависимость $\varepsilon(t)$. Сигнал ЭДС фиксируется первичным преобразователем прибора.

Для регистрации сигнала в данном методе используется магнитоиндукционная установка, позволяющая бесконтактно измерить скорость движения индентора при внедрении в испытуемую поверхность. Сигнал поступает в электронный блок обработки информации, основным элементом которой является аналого-цифровой преобразователь (АЦП), затем обработанный сигнал поступает на персональный компьютер (ПК) для дальнейшей обработки и расчета значений характеристик.

Схема получения, обработки и расчета характеристик материала приведена на рис. 1.



Рисунок 1. Схема получения и преобразования первичных данных процесса внедрения индентора в материал: 1 – индукционный преобразователь; 2 – индентор; 3 – постоянный магнит; 4 -исследуемый материал

К индентору 2 жестко прикреплен постоянный магнит 3, при движении индентора магнит проходит через катушку индуктивности 1, которая порождает сигнал ЭДС, прямо пропорциональный скорости изменения магнитного потока. Скорость подлета индентора к материалу 4 зависит только от первоначальной высоты подъема индентора, так как в системе используется гравитационный разгон.

С помощью предварительного усилителя сигнал ЭДС усиливается, затем подается на вход АЦП. Блок синхронизации отвечает за определение начального момента времени удара. Сигнал с АЦП подается на ПК для дальнейшей обработки по разработанным алгоритмам (рис. 2).

Для метода динамического индентирования разработан ГОСТ Р 56474 – 2015 «Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий методом динамического индентирования».



Рисунок 2. Схема обработки и передачи сигнала ЭДС

В данном стандарте установлен следующий алгоритм определения твердости с помощью зависимости *F*(*h*) [1]:

$$H = \frac{F_{h \max}}{A_{nos}} = \frac{F_{h \max}}{2\pi Rh_p},$$

$$[H] = \left[\frac{H}{M^2}\right],$$
(1)

где F_{hmax} — контактное усилие при h_{max} ; A_{noe} — площадь поперечного сечения индентора на расстоянии от вершины, равном остаточной глубине внедрения h_p — остаточная глубина от-печатка после индентирования.



Рисунок 3. Кривая изменения ЭДС индукции от времени, регистрируемая магнитоиндукционной установкой

Совместное рассмотрение зависимостей F(t) и h(t) позволяет получить зависимость F(h), график которой представлен на рис. 4.

В уравнении (1) *Н* имеет смысл максимального давления и соответствует формуле твердости Мейера.

Недостатками данного алгоритма является определение твердости по одному значению

контактного усилия при максимальной глубине внедрения. Поэтому предлагается энергетический подход в определении твердости материалов с помощью полного набора данных диаграммы F(h).



На рис. 5 энергия W_{1*} равняется механической работе, затраченной на упруго-пластическую деформацию материала. Энергия W₂ является энергией «релаксации», когда при снижении контактного усилия индентор все еще углубляется в материал. Работа упругой деформации равна площади под кривой 3 и делится на контактную и внеконтактную деформации.



Рисунок 5. Зависимость F(h). Цветом выделены работы, затраченные на различные виды деформации

Для расчета твердости предлагается использовать работу, затраченную на упруго-пластическую деформацию при контакте индентора с испытуемым материалом, т.е. работу W_{I*} (рис. 5). Согласно алгоритму динамическая твердость *HD* материала определяется по формуле:

$$HD = \frac{W_{1*}}{V},$$

$$[HD] = \left[\frac{H}{M^2}\right],$$
 (2)

где *V* – объем деформированного (вытесненного) материала. Данная формула сохраняет размерность твердости, определяемую по ГОСТу и была выведена эмпирическим путем.

Объем V определяют как объем шарового сегмента радиуса R (радиус индентора) с высотой h_c (рис. 6) по формуле:

$$V = \frac{1}{3}\pi h_c^2 (3R - h_c).$$
 (3)

Для перевода твердости в шкалу по Бринеллю (*HB*) необходимо воспользоваться формулой:

$$HB = \frac{HB}{9.81} \cdot k,\tag{4}$$

где *k* – коэффициент, учитывающий динамический характер нагружения.



Рисунок 6.

Схема деформирования материала под воздействием сферического индентора: h – глубина внедрения индентора; h_p – остаточная глубина отпечатка после индентирования; h_c – контактная глубина внедрения индентора; h_s – упругий прогиб контура отпечатка; R – радиус индентора

АЛГОРИТМ И ЕГО ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Сигнал ЭДС, получаемый с первичного преобразователя, усиливается и избавляется от шумовой компоненты с помощью средств фильтрации, далее сигнал поступает на микроконтроллер (рис. 2), встроенный в плату прибора. Микроконтроллером обрабатывается полученный массив данных, рассчитываются значения скорости движения индентора в определенные промежутки времени (период дискретизации 0,5 мкс), посредством интегрирования и дифференцирования получаем массивы контактных усилий и перемещений контактного взаимодействия индентора с испытуемым материалом. Таким образом, в памяти микроконтроллера хранятся 4 массива значений: скорости, контактные усилия, перемещения и время. Данные массивы построчно записываются в генерируемый файл с расширением .csv. Посредством интерфейса USB данный файл передается на персональный компьютер.

Для обработки файла, расчета значений твердости и последующей передачи данных в программу отображения данных необходимо написать программу для определения твердости материала методом динамического индентирования. Для создания данной программы был выбран язык программирования С#.

Создание программы и ее отладка производилась в Microsoft Visual Studio Express 2012. Код является частью общей программы по получению, обработке и визуализации информации, полученной с первичного преобразователя.

В начале программы прописывается директива using, с перечислением нескольких пространств имен .NET Framework, используемых в программе.

В С# для упорядочения и оформления кода используются классы, таким образом, весь код программы должен содержаться в классе. Для данной программы классом является MainForm пространства имен Hardness.

Считывание и обработка информации происходит в методе Hardness:

private uint Hardness()

{ /* код программы */ }

При входе в метод происходит помещение в лист всех имен файлов, находящихся в заданной директории (*D:\FilePath*) и имеющим расширение *.csv*, и указаний пути к ним.

List<string> files1 = Directory.GetFiles(@"D:\ FilePath", "*.csv").ToList <string>();

Далее следует создание всех переменных и массивов, используемых в программе. Для чисел с плавающей точкой был выбран тип *double*, так как данный тип корректно работает с используемыми методами.

С помощью оператора foreach (var s in files1)

происходит перебор всех файлов в вышеупомянутом листе и присваивание пути к ним переменной s.

Считывание всех строк файла по указанной директории и помещение их в массив строк производится следующим методом:

csvRows = File.ReadAllLines(s);

Используя разделитель « ; » можно поделить всю строку на 4 части, каждая из которых будет содержать значение конкретного параметра (*F*, *h*, *V* или *t*). Каждое из значений должно быть преобразовано в числовой тип double для дальнейшей записи в массив. Рассмотрим на примере считывание, преобразование и запись по определенному индексу значения перемещения индентора:

string valueH = fields[0].Trim();

double intvalueH = Convert.ToDouble(valueH); H[i] = intvalueH;

В следующем блоке кода находим параметры как Fmax, Hmax, Hp:

double Fmax = F.Max();int IFmax = Array.IndexOf(F, Fmax); double Hmax = H.Max(); int IHmax = Array.IndexOf(H, Hmax); double Hp = H[i - 1];

Для аппроксимации функции F(h) выделим участок от до, значения запишем в отдельные массивы данных:

```
double[] DifF = new double[i - IHmax];
double[] DifH = new double[i - IHmax];
for (int j = IHmax; j \le i-1; j++)
{
      DifF[j-IHmax] = F[j];
      DifH[j - IHmax] = H[j];
```

```
if (H[i] > H[IFmax])
        Hfmax = H[i];
        IHfmax = j;
```

```
}
```

{

}

Аппроксимация производится, используя ALGLIB (кросс-платформенная библиотеку библиотека численного анализа, поддерживающая язык программирования С#). Аппроксимация полиномом осуществляется подпрограммой polynomialfit (аппроксимация без индивидуальных ограничений и весовых коэффициентов). Данная подпрограмма использует Чебышевский базис с автоматическим масштабированием для уменьшения числа обусловленности. Полученный результат конвертируется в барицентрическую форму, которая используется для вычисления полинома в заданной точке (операция barycentriccalc).

Барицентрическое представление для операций с полиномами характеризуется большей стабильностью, чем представление в степенном базисе. Результатом работы функций является объект barycentricinterpolant, в котором хранятся коэффициенты барицентрической модели:

int m = 4;

alglib.barycentricinterpolant p;

alglib.polynomialfitreport rep;

alglib.polynomialfit(DifH, DifF, m, out info, out p, out rep);

Максимально близкие значения полинома по сравнению с Matlab, полученные при аппроксимации, достигаются при степени полинома равной 4. Для более точного приближения к значению перемещения, соответствующего максимальному контактному усилию, рассчитаем значения полученного полинома с шагом перемещения 0.001 мкм и запишем данные в отдельный массив.

var step = 0.001;

var splineF = new double[10000];

var splineH = new double[10000];

for (int k = 0; k <splineF.Length; k++)

splineF[k] = alglib.barycentriccalc(p, (Hp + k * step));

splineH[k] = Hp + k * step;

```
}
```

{

{

Затем найдем значение перемещения при максимальном контактном усилии на нижней части графика (Xfmax) и его индекс.

for (int q = 0; q < 9999; q++)

```
if (splineH[q] < H[IFmax])
{
       Xfmax = splineH[q];
        IXfmax = q;
}
```

}

Для вычисления производной в точке *Hfmax* воспользуемся трехточечной схемой определения первой производной.

double tg = (splineF[IXfmax + 1] - splineF[IXfmax

- 1]) / (splineH[IXfmax + 1] - splineH[IXfmax - 1]);

Затем найдем величину глубины контактного взаимодействия и объем деформированного материала образца:

double hc = splineH[IXfmax] - splineF[IXfmax] / tg; Vsf = (PI * (hc * 0.001) * (hc * 0.001) * (2.15 - hc * 0.001))/3;

Значения энергии находим как площади под кривыми (методом трапеций).

Tv = (Ssum * 0.001* Ktv) / (Vsf *9.81);

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был предложен энергетический подход в определении твердости материалов с помощью диаграммы *F(h)*.Для расчета твердости предлагается использовать отношение работы, затраченной на упруго-пластическую деформацию при контакте индентора с испытуемым материалом, и деформируемого объема образца материала, определяемого по контактной глубине внедрения индентора.

Для обработки значений, расчета твердости и дальнейшей передачи информации для анализа и отображения была написана программа на языке программирования *С*#. Численные результаты сравнивались с полученными значениями в программном пакете Matlab и показали схожие результаты.

Список литературы:

1. ГОСТ Р 56474 – 2015. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 15-17 с.

2. *Рудницкий В.А., Рабцевич А.В.* Метод динамического индентирования для оценки механических характеристик металлических материалов//Дефектоскопия. – 1997. – № 4. – С. 79–86. Vriend N. M., Kren A. P. Polymer Testing. 2004. Vol. 23. № 4. Р. 369 – 375



ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ДОКУМЕНТООБОРОТА

НИКОЛАЕВ С.А., ХОРОХОРОВ А.М.

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

E-mail: wynaut@yandex.ru, a.horohorov@yandex.ru

Аннотация: Цель работы – объяснение явления окрашивания в радужные цвета частиц тонера, оказавшихся под слоем пасты, при наблюдении под микроскопом в отраженном свете. Данное явление служит основанием для разработки колориметрического метода контроля документооборота. Показано, что коэффициенты отражения образцов красителей, используемых в шариковых ручках, обнаруживают существенную зависимость от угла падения излучения и практически не зависят от длины волны. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что на поверхности исследуемых красителей образуется тонкая плёнка, обуславливающая высокий коэффициент отражения в жёлто-зелёной области спектра.

Ключевые слова: документооборот, отражённый свет, коэффициент отражения, красители, тонер.

PHYSICAL FOUNDATIONS OF THE COLORIMETRIC METHOD OF FORENSIC DOCUMENT ANALYSIS

NIKOLAEV S.A., KHOROKHOROV A.M.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

E-mail: wynaut@yandex.ru, a.horohorov@yandex.ru

Abstract: The objective of this work is explaining the fact that the color of the toner powder particles sprayed on paper under a layer of pen ink is significantly changing when observed in microscope in reflected light. This phenomenon serves as a rationale for developing the colorimetric method of forensic document analysis. It is shown that reflective coefficients of the ballpoint pen ink dye samples depend on incidence angle significantly and don't depend on wavelength. The results allow to assume that a thin film forms on the surface of the analyzed dyes and that the film has a high reflection coefficient in the yellow-green spectral range.

Keywords: documentation, reflected light, dyes, reflection coefficient, toner.

ВВЕДЕНИЕ

В судебной практике довольно часто рассматриваются дела, в которых основным вопросом является проблема определения взаимной последовательности двух процессов: печати текста документа и последующего утверждения его подписью или резолюцией ответственного лица. Указанный порядок делопроизводства считается юридически законным. Случаи, когда этот порядок нарушается, часто носят криминальный характер [1, 2].

Указанная проблема не является сколь-либо серьёзной, если напечатанный текст документа и резолюция на него имеют области пересечения. Она решается известными методами микроскопии и широко используется в практике судебной экспертизы. При отсутствии указанных областей эта проблема либо не имела решения вообще, либо служила источником серьёзных разногласий между сторонами обвинения и защиты.

В последнее время эксперты-криминалисты, привлекаемые к рассмотрению таких дел, обратили внимание на два обстоятельства. Вопервых, любой документ, напечатанный на лазерном принтере, изобилует множеством частичек тонера размером 2-20 мкм [3], невидимых глазом, однако легко наблюдаемых при большом увеличении. Плотность распределения этих частичек на поверхности документа, как правило, растёт с увеличением срока службы принтера, однако является достаточно высокой и для новых принтеров всех известных производителей. Во-вторых, цвет частичек тонера, оказавшихся под слоем пишущего вещества (пасты, чернил, геля) отличается от цвета, тех же частиц, находящихся на бумаге или попавших на слой пишущего вещества. Ниже приведены микрофотографии с увеличением 800 крат частиц тонера, находящихся на бумаге (рис. 1а) и на слое пасты (рис. 1б). На рисунке 2 приведены фотографии частиц, оказавшихся под слоем пасты. Визуально видно, что цвета частиц тонера на втором и первом рисунках заметно отличаются. Это обстоятельство может вполне служить основанием для экспертного заключения о временной последовательности процессов подготовки документа.

На всех судебных процессах сторона защиты, как правило, протестует против субъективных оценок экспертизы и требует объективных количественных оценок. Поэтому целью настоящей статьи является фактическое обоснование изменения цвета частиц, оказавшихся под слоем пишущего вещества и анализ возможных количественных оценок цветовых различий частиц, находящихся над и под слоем пасты.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Как уже отмечалось, характерной чертой лазерных принтеров является «распыление» частиц электрофотографического тонера по всей поверхности бумаги. Причем в области, где печатный текст отсутствует, частицы тонера распределены приблизительно равномерно и со сравнительно большой дисперсией, так что, например, в поле зрения микроскопа с увеличением 320^{*} можно наблюдать в среднем от 10 до 40 частиц.

Отдельная частица электрофотографического тонера на бумаге или на слое пасты представляет собой объект неправильной формы с выпуклой поверхностью размером порядка 2-20 мкм, обладающий высоким коэффициентом поглощения в видимой области спектра, в силу чего она наблюдается как черное пятно (рис. 1).



Рисунок 1. Рисунок 1. Изображение частицы тонера: а) на белой бумаге, б) на слое пасты

При наблюдении штрихов пасты или геля на бумаге через микроскоп в отраженном свете со светлым полем цвет красителя отличается от цвета, наблюдаемого невооруженным глазом в рассеянном свете. Это связано с тем, что наблюдаемая цветовая картина формируется сложением полихроматического излучения источника света микроскопа, диффузно отраженного от волокон бумаги и дважды прошедшего слой красителя, и излучением, почти зеркально отраженным от поверхности красителя. Вторая составляющая, как показали многочисленные наблюдения, располагается в желто-зеленой области спектра, и видимое искажение цвета, вносимое ею, тем сильней, чем плотнее фон на данном участке пленки красителя. Т.е. зо-лотистый блик особенно заметен на темных вкраплениях и участках с толстым слоем пасты или геля. Особенно отчетливый блик наблюдается в местах нахождения частиц тонера под пастой, поскольку в этих местах практически отсутствует диффузная составляющая отраженного света (рис. 2).



Рисунок 2. Изображение частицы тонера под слоем пасты

Таким образом, частицы тонера, находящиеся под слоем пасты или геля становятся окрашенными, в то время как частицы, находящиеся на пасте практически не изменяют свой цвет по сравнению с такими же частицами на бумаге. На этом основана предлагаемая методика анализа взаимного положения слоя пасты или геля и частиц тонера.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ КРАСИТЕЛЯ

Для более подробного изучения оптических свойств красителей, входящих в состав паст и гелей были исследованы три красителя, нанесенные на стеклянную подложку: бриллиантовая зелень, метил фиолетовый и родамин. На рисунке 3 показаны фотографии образцов красителей, полученные в рассеянном свете а) и в свете зеркального отражения от потолочного осветителя б). В первом случае образцы находились на белом листе писчей бумаги, а во втором, – на черной копировальной бумаге для устранения диффузной составляющей отраженного света.



a)



б) Рисунок 3.

Изображение трех красителей (родамина, бриллиантовой зелени и метил фиолетового): а) в рассеянном свете, б) под углом, зеркального отражения света от поверхности красителя

Как видно из рисунка 3, цвет красителей при зеркальном отражении значительно отличается от их цвета, наблюдаемого в рассеянном свете. Для более подробного изучения спектральных характеристик отраженного света на спектрофотометре LAMBDA-950 фирмы Perkin Elmer были проведены измерения спектральных коэффициентов зеркального отражения при различных углах падения. Результаты измерения представлены на рис. 4, 5.

Из рисунков видно, что все три образца обнаруживают сильную зависимость коэффициента отражения от длины волны света, в то время как зависимость его от угла падения не является









Рисунок 5. Зависимости спектрального коэффициентов отражения от длин волн при угле падения 15°: а) бриллиантовой зелени, б) метил фиолетового, в) родамина

столь сильной. Это позволяет сделать предположение о волновой природе наблюдаемого явления, а именно: на поверхности красителя образуется тонкая пленка, настолько тонкая, что ее оптическая толщина мало зависит от угла падения света, при этом зависимость коэффициента отражения от длины волны остается высокой. С учетом интерференционных эффектов этот коэффициент определяется следующей формулой (поглощением света в пленке пренебрегаем) [4]:

$$\rho(\lambda) = \rho_1 + \rho_2 + 2\sqrt{\rho_1 \rho_2} \cos(\delta(\lambda)) \qquad (1)$$

где ρ_1 и ρ_2 – френелевские коэффициенты отражения от первой наружной поверхности и внутренней поверхности пленки соответственно, $\delta(\lambda)$ – разность фаз интерференционных волн

$$\delta(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{4\pi d}{\lambda} n_1 \cos(\Theta') \tag{2}$$

где d и n - толщина и показатель преломления пленки, Θ' – угол преломления света в пленке, λ – длина волны света.

В дальнейшем будем предполагать, что ввиду малости угла падения (Θ =150) коэффициенты ρ_1 и ρ_2 с достаточной точностью определяются формулами Френеля [5]:

$$\rho_1 = \left(\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1}\right)^2, \ \rho_2 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 \quad (3)$$

где n_2 – показатель преломления красителя.

Формула 2 при этом допущении принимает вид:

$$\delta(\lambda) = \frac{4\pi d}{\lambda} n_1 \tag{4}$$

Коэффициенты отражения образцов, рассчитанные по формуле (1), будем сравнивать с измеренными значениями в спектральном диапазоне $\lambda = 450 \div 750$ нм (данные приведены в таблице 1).

Поскольку коэффициенты отражения пленки принимают большие значения (см. таб. 1), то следует предположить, что показатель преломления $n_1 > n_2$. В этом случае в формуле (1) следует учесть дополнительный скачок фазы на π , тогда окончательно получим:

$$\rho(\lambda) = \rho_1 \left(1 + \rho_{21} - 2\sqrt{\rho_{21}} \cos(\pi \frac{d_0}{\lambda}) \right) \quad (5)$$

где $\rho_{21} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ - относительный коэффициент отражения, ρ_1

 $d_{_0} = 4 dn_{_1}$ - учетверенная оптическая толщина пленки.

Таблица 1. Коэффициенты от	ения красителей. Угол	1 падения света 150
----------------------------	-----------------------	----------------------------

λ,[нм]	450	500	550	600	650	700	750
Бриллиантовая зелень	0,0251	0,0212	0,0534	0,0968	0,123	0,121	0,097
Метил фиолетовый	0,0262	0,156	0,209	0,201	0,21	0,257	0,23
Родамин	0,0282	0,081	0,12	0,119	0,114	0,105	0,095

Таблица 2. Параметры, при которых достигается минимум функции f

Параметр	ρ ₁	ρ ₂₁	d ₀
Бриллиантовая зелень	0,046	0,39	0,82
Метил фиолетовый	0,0888	0,428	0,748
Родамин	0,05	0,256	0,698

Таблица 3. Значения параметров п и d для различных красителей

Параметр	n ₁	n ₂	d, [мкм]
Бриллиантовая зелень	1,55	1,18	0,133
Метил фиолетовый	1,85	1,25	0,101
Родамин	1,57	1,255	0,110

Оптические параметры пленок будем оценивать из условия минимума квадратов разностей данных таблицы 1 и результатов расчета коэффициентов отражения по формуле (5), для отдельных красителей, то есть минимума функции:

$$f(\rho_1, \rho_1, d_0) = \sum_{i=1}^{7} [\rho_i - \rho(\lambda_i)]^2$$
(7)

где ρ_1 – значение коэффициентов отражения для семи длин волн в таблице, $\rho_1(\lambda_i)$ – значение $\rho(\lambda)$, посчитанные по формуле (5) для длин волн $\lambda_i = 400 + 50i$, *i*=1,2...7.

Было установлено, что функция f для каждого красителя достигает минимума при следующих значениях параметров (см. таблицу 2):

Оптические параметры пленки определялись из формулы (3) и (6):

$$n_1 = \frac{\sqrt{\rho_1} + 1}{1 - \sqrt{\rho_1}}; \quad n_2 = n_1 \frac{1 - \sqrt{\rho_2}}{1 + \sqrt{\rho_2}}; \quad d = \frac{d_0}{4n_1}$$

где $\rho_2 = \rho_{21} \rho_1$.

В результате для исследуемых красителей были получены значения (см. таблицу 3):

Таким образом, исследования показали, что на поверхности красителей возникает тонкая пленка, толщиной порядка 0,1-0,13 мкм с показателем преломления 1,55-1,85, которая обуславливает высокий коэффициент отражения в красно-зелёной части видимого диапазона длин волн. Эта пленка по оптическим свойствам аналогична окисной пленке, возникающей на поверхности металлов при отжиге (цвета побежалости), масляной пленке на поверхности воды и т.п.

На рисунке 6 представлены графики коэффициентов отражения всех трех красителей, иллюстрирующие расхождение результатов таблицы 1 и расчетов коэффициентов отражения по формуле 5. Учитывая приближения, принятые при расчете, а также погрешности измерения коэффициентов отражения, совпадение можно считать удовлетворительным.



Рисунок 6. Зависимость коэффициентов отражения красителей от длины волны: красный график – значения ρ(λ) из таблицы 1; синий график – значения ρ(λ) рассчитанные по формуле (5): а) Бриллиантовая зелень, б) Метил фиолетовый, в) Родамин

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ показал, что изменение цвета частиц тонера под слоем пишущего вещества возникает в результате интерференции в поверхностном слое вещества, образующемся после его нанесения на бумагу и последующего высыхания. Оптические свойства этого слоя отличаются стабильностью и, как показали исследования, не подвержены временным, температурным и другим воздействиям. Если учесть, что диапазон таких воздействий в условиях хранения документов, как правило, невелик, то этот параметр вполне может служить объективным критерием соблюдения или нарушения юридически чистой процедуры документооборота. Что касается оптимальных количественных оценок цветовых различий и разработки соответствующей аппаратуры для проведения криминалистической экспертизы, то это предмет дальнейшей научно-исследовательской и конструкторской работы. Однако уже сейчас с уверенностью можно сказать, что цветовые различия частиц, находящихся над и под слоем пишущего вещества весьма существенны. Так, например, для частиц, представленных на рисунках 2 и 1б, величина цветового различия при оценке по методике CIE76 равно 103,8, что значительно превышает порог чувствительности реальных колориметрических приборов.

Список литературы

1. Досова А. В. Теоретические и практические особенности комплексного криминалистического исследования документов с измененными реквизитами: дис. канд. юрид. наук : 12.00.12 / А. В. Досова. – Волгоград, 2014. – 233 л

2. *Michael J. Allen* Foundations of Forensic Document Analysis: Theory and Practice

3. Водолазов А. В., Вашкевич Н. А. Лазерная абляция и сферы ее применения. Журнал «Вопросы криминологии, криминалистики и судебной экспертизы», №1 (41), 2017, с. 136-140.

4. *Матвеев А.Н.* Оптика: Учебное пособие для физических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1985. – 351 с., ил.

5. *Ахманов С.А., Никитин С.Ю*. Физическая оптика: Учебник. 2-е изд. – М.: Издательство МГУ; Наука, 2004. – 656 с.

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 681.772.7

российский индекс научного цитирования Science Index

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВИДЕОКАМЕР С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЕНСОРАМИ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТА ЕМVA 1288

ПЯСЕЦКИЙ В.Б., ГАВРИЧЕНКОВА А.А.

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

E-mail: piasetsky@bmstu.ru

Аннотация: Приводится описание методики оценки и сравнения эксплуатационных параметров и характеристик цифровых видеокамер с фотоэлектрическими сенсорами на основе европейского стандарта EMVA 1288. Оценка производится на основе учета квантовой эффективности, емкости насыщения пикселя, отношения сигнал/шум и динамического диапазона камер.

Ключевые слова: видеокамера, фотоэлектрический многоэлементный приемник, квантовая эффективность, отношение сигнал/шум.

METHODS OF QUALITY EVALUATION OF VIDEO CAMERAS WITH PHOTOELECTRIC SENSORS BASED ON THE EMVA 1288

PIASETSKY V.B., GAVRICHENKOVA A.A.

Moscow State Technical University n.a. N.E. Bauman, Russia, Moscow

E-mail: piasetsky@bmstu.ru

Abstract: The paper presents a description of the method for evaluating and comparing the operational parameters and characteristics of digital video cameras with photoelectric sensors based on the European standard EMVA 1288. The estimation based on the quantum efficiency, pixel saturation capacity, signal-to-noise ratio and dynamic range of the cameras.

Keywords: video camera, photoelectric multi-element receiver, quantum efficiency, signal-to-noise ratio.

ВВЕДЕНИЕ

Определение, методики измерения фотоэлектрических параметров приемников излучения и фотоприемных устройств (ФПУ) на их основе регламентируются рядом отечественных стандартов. Однако стандартные определения и методики в настоящее время не в полной мере позволяют отвечать на вопросы, которые возникают в задачах оценки рабочих параметров, выбора и сравнения видеокамер на основе фотоэлектрических приемников (многоэлементных сенсоров типа ПЗС и КМОП) с цифровым выходом. В частности:

1. ГОСТ 21934-83. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения.

В стандарте дано определение 193 терминов, описывающих параметры и характеристики полупроводниковых приемников излучения и ФПУ. При этом приходится констатировать, что информация не представлена в виде единой обоснованной системы: параметры и характеристики даны в виде перечня и логически не связаны. Не определена квантовая эффективность фоточувствительного элемента (ФЧЭ) приемника.

2. ГОСТ 17772-88. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик.

Стандарт определяет методы измерения фотоэлектрических параметров различных приемников и ФПУ на их основе без учета специфики многоэлементных линейных и матричных приемников. Фактически данный стандарт распространяется на одноэлементные и координатно-чувствительные приемники. Нет учета цифровых систем ФПУ.

3. ГОСТ 25532-89. Приборы фоточувствительные с переносом заряда. Термины и определения.

Данный стандарт распространяется на многоэлементные аналоговые приемники и аналоговые ФПУ на их основе. Не определена квантовая эффективность приемников. Нет учета влияния процесса аналого-цифрового преобразования аналоговых сигналов на качество выходного сигнала таких ФПУ.

4. ГОСТ 28953-91 Приборы фоточувствительные с переносом заряда. Методы измерения параметров.

Данный стандарт дополняет ГОСТ 25532-89 в части методов измерения параметров и характеристик аналоговых многоэлементных ФПУ.

Общий недостаток перечисленных стандартов состоит в том, что они не устанавливают эксплуатационные параметры и характеристики современных ФПУ на основе многоэлементных фотоэлектрических приемников как единых фотоэлектрических систем с цифровым выходом. В частности, стандарты не дают однозначное определение критериальных признаков таких ФПУ, которые позволили бы проводить квалифицированное сравнение их возможностей в задачах, связанных с выбором видеокамер. Указанная проблема приобрела еще большую актуальность в связи с тем, что порог чувствительности современных многоэлементных приемников – как ПЗС, так и КМОП, измеряется на квантовом уровне (пороговым числом квантов, приходящих на один пиксель приемника). Поэтому монохроматическая характеристика чувствительности приемников, входящих в состав видеокамер, в настоящее время задается не в виде монохроматической токовой чувствительности S₁(λ), а в виде усредненной по пикселям монохроматической характеристики квантовой эффективности η(λ). Кроме этого, задается и неравномерность квантовой эффективности по пикселям.

До появления официального отечественного стандарта, который будет учитывать отмеченные особенности современных видеокамер с фотоэлектрическими приемниками и цифровым выходом, представляется необходимым определить по меньшей мере критерии сравнения камер с различными приемниками (черно-белыми, цветными, ПЗС и КМОП) разных производителей. Использование соответствующих документов ISO (Международной Организации по Стандартизации) затруднительно в силу коммерческого характера таких документов и, как следствие, в связи с отсутствием свободного доступа к ним (см., например, ISO 18383:2015(en) Photography – Digital cameras – Specification guideline [5]).

В то же время известна открытая для свободного доступа система описания параметров видеокамер и методик их измерения, представленная Европейской организацией по системам технического зрения – European Machine Vision Association (EMVA) – Стандарт EMVA 1288 [6]. В отечественных публикациях ссылки на данный стандарт и его описание встречаются достаточно редко (см, например, [7]), что, на наш взгляд, неоправданно. Стандарт EMVA признан во всем мире и многие производители матричных ПЗС и КМОП приемников приводят в технических описаниях параметры и характеристики в соответствии с этим стандартом (см, например, [8]).

Основные характерные особенности EMVA 1288

Стандарт EMVA 1288 устанавливает метод измерения, вычисления и представления специфических параметров и характеристик для камер и видеосенсоров ФПУ, применяемых в системах технического зрения (СТЗ). Стандарт EMVA 1288 представляет практический интерес при проведении энергетического расчета ФПУ для любых СТЗ, поскольку определяет форму и содержание паспортных технических описаний камер и видеосенсоров (фотоэлектрических матричных приемников), представляемых фирмами-производителями. Это касается таких основополагающих параметров и характеристик, как чувствительность, порог чувствительности, шумы, линейный динамический диапазон, количественные оценки отклонения основных параметров от их среднего значения и др.

Стандарт не распространяется на какие-либо конкретные типы видеосистем и их параметры, а устанавливает общий порядок описания поведения камер и их ФПУ в определенных условиях. Действие стандарта распространяется на монохромные и цветные камеры с цифровым выходом и линейными энергетическими характеристиками в отношении принимаемого излучения.

Стандарт предлагает учитывать следующие аксиоматические допущения:

1) число квантов излучения, принимаемых пикселем, зависит от энергетической облученности поверхности сенсора $E\left(\frac{B_T}{M^2}\right)$ и времени экспозиции $E \cdot t_{exp}$ (сек), то есть от энергии экспозиции в плоскости фоточувствительных элементов (ФЧЭ) сенсора;

2) ФПУ является линейным устройством, то есть его выходной цифровой сигнал «у» возрастает пропорционально числу принимаемых квантов;

3) все источники шума являются стационарными в широком смысле и «белыми» во времени и пространстве – также, как параметры шума являются инвариантными во времени и пространстве;

 от длины волны принимаемого излучения λ зависит только общая квантовая эффектив- ность сенсора. Реакция на излучение со слож- ным составом может быть определена как суперпозиция реакций на совокупность моно- хроматических потоков, составляющих поток, сложный по составу;

5) от температуры зависит только темновой ток сенсора.

Перечисленные допущения описывают идеальные камеры (ФПУ). Действующая версия стандарта в полной мере применима только к устройствам, которые отвечают этим допущениям.

В математической модели (см. рис.1) неизвестными считаются три параметра:

1) $\sigma \frac{L}{d}$ – дисперсия числа термогенерированных электронов (мера отклонения от среднего значения), то есть мощность флуктуаций

темнового тока сенсора (ФПУ);

2) η – квантовая эффективность сенсора;

3) К – системное усиление сенсора (ФПУ).

Описание сигнала

В течение времени экспозиции среднее число квантов, которые достигают площади А одного пикселя – μ_p . В результате в пикселе происходит фотогенерация некоторого числа электронов – μ_p .

Общая квантовая эффективность пикселя

$$\eta(\lambda) = \frac{\mu_e}{\mu_p} \tag{1}$$



Рисунок 1.

Математическая модель пикселя:

 $\mu_{\rho} - число квантов; \quad \sigma \frac{2}{\rho} - дисперсия числа квантов; \\ \mu_{e} - число электронов; \quad \sigma \frac{2}{\rho} - ducnepcus числа квантов; \\ \mu_{d} - число термогенерированных электронов; \\ \sigma \frac{2}{e} - ducnepcus числа электронов; \quad \mu_{d} - число термогенерированных электронов; \\ \sigma \frac{2}{q} - ducnepcus числа термогенерированных электронов; \\ \eta - квантовая эффективность ФЧЭ; \quad \alpha - системное усиление; \\ \sigma \frac{2}{q} - ducnepcus цифрового квантования; \\ \mu_{y} - число электронов, onpedeляющих выходной сигнал; \\ \sigma \frac{2}{v} - ducnepcus числа «выходных» электронов$

Этот параметр отвечает не только за область, доступную для приходящего излучения, а вообще за всю площадь, занимаемую пикселем. Таким образом, учитываются все факторы геометрии пикселя: в площадь пикселя включается как оптическая, так и вспомогательная его части.

Число квантов

$$\mu_p = \frac{AEt_{exp}}{h\nu} = \frac{AEt_{exp}}{h\frac{c}{\lambda}}$$
(2)

h = 6,6260755·10⁻³⁴ Дж·с – постоянная Планка, c = 2,99792458·10⁸ м·с⁻¹ – скорость света в вакууме. Таким образом, число фотонов, приходящих на пиксель с площадью А за время экспозиции t_{exp} при энергетической облученности E,

$$\mu_p = 5,034 \cdot 10^{24} \cdot A[\mathsf{M}^2] \cdot t_{exp}[\mathsf{c}] \cdot \lambda[\mathsf{M}] \cdot E\left[\frac{\mathsf{B}\mathsf{T}}{\mathsf{M}^2}\right] (3)$$

Для более подходящих для рассматриваемой задачи единиц измерения

$$\mu_{p} = 50,34 \cdot A[\text{mkm}^{2}] \cdot t_{exp}[\text{mc}] \cdot \\ \cdot \lambda[\text{mkm}] \cdot E\left[\frac{\text{mkBT}}{\text{cm}^{2}}\right]$$
(4)

В электронной части ФПУ электрический заряд трансформируется в напряжение, усиливается и в конце конвертируется в цифровой сигнал с помощью АЦП. Весь процесс подразумевается как линейный и может быть описан одним параметром – общим усилением системы К с размерностью [число/электрон] или, в международном обозначении, [DN/*ē*].

Результирующий выходной цифровой сигнал

 $\mu_v = K \left(\mu_e + \mu_d \right)$

или

$$\mu_v = \mu_{v \, dark} + K \cdot \mu_e \tag{5}$$

где μ_d – число электронов, связанных с темновым током в пикселе;

 $\mu_{y \ dark} = K \cdot \mu_d$ – выходной сигнал ФПУ в цифровой форме при E = 0 (темновой сигнал ФПУ). Темновой сигнал зависит от времени экспозиции t_{exp} и температуры.

Таким образом, получаем выражение для сигнала пикселя ФПУ при некотором среднем уровне облученности (для уровня «серого» сигнала):

$$\mu_{y} = \mu_{y\,dark} + K \cdot \eta \cdot \mu_{p} = \mu_{y\,dark} + K \cdot \eta \cdot \frac{\lambda A}{hc} Et_{exp}$$
(6)

Выражение (6) может быть использовано для проверки линейности сенсора и определения его чувствительности *К*·*η*. Если заранее из-

вестно усиление *K*, то уравнение (6) можно использовать для нахождения квантовой эффективности η .

Описание шума

Для описания среднего квадратического отклонения числа фотогенерированных электронов используется статистическая зависимость Пуассона, то есть

$$\sigma_e^2 = \mu_e$$

Этот шум еще называют дробовым. Для всех камер в текущей версии стандарта применяют два дополнительных вида шума. Все источники шума, связанные с чтением сенсора и цепями усиления, описываются независимым от сигнала μ_e источником шума с нормальным распределением σ_d^2 . Окончательная конвертация из аналоговой формы в цифровую характеризуется отклонением $\sigma_d^2 = \frac{1}{12DN^2}$.

Тогда временная флуктуация цифрового сигнала «у» может быть представлена как

$$\sigma_y^2 = K^2 (\sigma_d^2 + \sigma_e^2) + \sigma_q^2 \tag{8}$$

Так как $\sigma_e^2 = \mu_e = \frac{\mu_y - \mu_{y \ dark}}{K}$

(с учетом (5) и (7)), шум, связанный с измеренным значением цифрового сигнала,

$$\sigma_y^2 = K^2 \sigma_d^2 + \sigma_q^2 + K \left(\mu_y - \mu_{y \, dark} \right) \tag{9}$$

Первые два слагаемые уравнения (9) определяют постоянную составляющую (смещение) цифрового сигнала, а усиление К – наклон (крутизну) данной характеристики. Уравнение (9) является центральным в характеризации сенсора. Из линейной зависимости между σ_y^2 и числовым значением фотогенерированного «серого» сигнала ($\mu_y - \mu_{y \ dark}$) можно определить усиление системы К, а из смещения – флуктуацию темнового сигнала σ_d^2 .

Отношение сигнал/шум

Исходя из определений сигнала и шума, отношение сигнал/шум в цифровой форме

$$SNR = \frac{\eta \mu_p}{\sigma_y} \tag{10}$$

С учетом уравнений (6) и (8)

$$SNR = \frac{\eta \mu_p}{\sqrt{\sigma_d^2 + \frac{\sigma_q^2}{K^2} + \eta \mu_p}}$$
(11)

Во многих случаях усиление *К* исключает шум квантования, так что *SNR* зависит только

от квантовой эффективности $\eta(\lambda)$ и шума темнового тока σ_d (в единицах электронов). Интерес представляют два предельных случая:

- высокий уровень облученности сенсора, когда 2

$$\eta \mu_p \gg \sigma_d^2 + \frac{\sigma_q^2}{K^2}$$

- слабый оптический сигнал, когда

$$\eta \mu_p \ll \sigma_d^2 + \frac{\sigma_q^2}{K^2}$$

Этим двум случаям соответствует отношение сигнал/шум

$$SNR = \sqrt{\eta \mu_p} \tag{12a}$$

$$SNR = \frac{\eta \mu_p}{\sqrt{\sigma_d^2 + \frac{\sigma_q^2}{K^2} + \eta \mu_p}}$$
(126)

Уравнения (12а) и (12б) описывают изменение крутизны зависимости отношения сигнал/ шум от уровня оптического сигнала.

Реальный сенсор может быть сравнен с идеальным, у которого квантовая эффективность $\eta = 1$, нет шума темнового тока ($\sigma_d = 0$) и пренебрежимо мал шум квантования ($\sigma_q/K = 0$). Для идеального детектора отношение сигнал/ шум определяется только числом принимаемых квантов:

$$SNR = \sqrt{\mu_p} \tag{13}$$

Используя выражение (13) и график зависимости SNR(µ_p), можно сравнить реальный сенсор с идеальным и узнать, насколько он отличается от идеального.

Насыщение сигнала и абсолютный порог чувствительности

Для камеры с k-разрядным АЦП (k бит) диапазон «серого» сигнала лежит между точками «0» и «2^k-1». Практически полезный диапазон меньше.

Значение темнового сигнала $\mu_{y \ dark}$ должно быть выше нуля. Предполагается, что не происходят какие-либо изменения шума во времени, в том числе не изменяется темновой ток. При этом используемый полезный «серый» сигнал меньше, чем 2^k-1 вследствие присутствия шума и неоднородности фотосигнала. Поэтому облученность насыщения $\mu_{n \ sat}$ определяется как максимум измеренного отношения между изменением значения «серого» и облученностью в единицах [фотон/пиксель]. Обоснованием данного определения является то, что в соответствии с (9) выходной цифровой сигнал увеличивается с ростом «серого» оптического сигнала до момента достижения цифровым сигналом значения 2^k-1.

На основе параметра $\mu_{p \, sat}$ определяют параметр, который называется «емкость насыщения» или «мощность насыщения»:

$$\mu_{e\,sat} = \eta \; \mu_{p\,sat} \tag{14}$$

Емкость насыщения не следует смешивать с полной емкостью ячейки пикселя. Она меньше полной емкости, поскольку выходной цифровой сигнал достигает значения 2^k-1 раньше, чем наступает физическое насыщение пикселя.

Минимальная детектируемая облученность (абсолютный порог чувствительности) $\mu_{p\ min}$ можно найти, используя выражение (11). Связь между некоторым числом принимаемых квантов при заданном соотношении сигнал/шум представляется как

$$\mu_p(SNR) = \frac{(SNR)^2}{2\eta} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4\left(\sigma_d^2 + \frac{\sigma_q^2}{K^2}\right)}{(SNR)^2}}\right] (15)$$

Для большого и малого значений отношения сигнал/шум 2

$$\mu_p(SNR) \approx \frac{(SNR)^2}{\eta} \left(1 + \frac{\sigma_d^2 + \frac{\sigma_q^2}{K^2}}{(SNR)^2}\right)$$
(16a)

$$\mu_p(SNR) \approx \frac{SNR}{\eta} \left(\sqrt{\sigma_d^2 + \frac{\sigma_q^2}{K^2}} + \frac{SNR}{2} \right)$$
(166)

Выражение (16а) получается при условии $(SNR)^2 \gg (\sigma_d^2 + \frac{\sigma_q^2}{K^2})$

с применением разложения в ряд Тейлора функции $(1+x)^{\alpha}$ при x<<1 (учитывается только первый член ряда) : $(1+x)^{\alpha} \approx 1+\alpha x$. Уравнение (16б) получается при условии

$$SNR)^2 \ll (\sigma_d^2 + \frac{\sigma_q^2}{K^2}),$$

когда

$$\boxed{1 + \frac{4\left(\sigma_d^2 + \frac{\sigma_q^2}{K^2}\right)}{(SNR)^2}} \approx \sqrt{\frac{4\left(\sigma_d^2 + \frac{\sigma_q^2}{K^2}\right)}{(SNR)^2}} = \frac{2}{SNR}\sqrt{\sigma_d^2 + \frac{\sigma_q^2}{K^2}}$$

с подстановкой этого результата в (15). Это значит, что для почти всех камер, когда отношение сигнал/шум мало, а >>1, абсолютный порог чувствительности может быть представлен как

$$\mu_{p \min} = \mu_p(SNR = 1) \approx$$

$$\approx \frac{1}{\eta} \left(\sqrt{\sigma_d^2 + \frac{\sigma_q^2}{K^2}} + \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{\eta} \left(\frac{\sigma_{y \, dark}}{K} + \frac{1}{2} \right) \tag{17}$$

Отношение сигнала насыщения к абсолютному порогу чувствительности определяется как динамический диапазон DR сенсора:

$$DR = \frac{\mu_{p \ sat}}{\mu_{p \ min}} \tag{18}$$

Пример: Сравнение чувствительности камер Basler A102f (ПЗС) и A600f (КМОП).

Расчет отношения сигнал/шум (*SNR*) и учет квантовой эффективности (*QE*) для указанных камер позволяет построить в двойном логарифмическом масштабе диаграмму зависимости *SNR* от числа принимаемых за время экспозиции фотонов (*µ*_n) (рис. 2).



Рисунок 2. Сравнение чувствительности камер A102f (A) и A600f (B).

Зеленые линии – квантовый шум в электронной форме с учетом квантовой эффективности сенсоров; нижние части диаграмм (от нуля до точек излома) – проявление темнового шума сенсоров

Квантовая эффективность камеры A102f составляет 56%, что позволяет оценить ее пороговое значение экспозиции в 16 квантов. Для камеры A600f квантовая эффективность 32%, порог чувствительности – 353 кванта. То есть в условиях низкого уровня принимаемого сигнала камера A102f в 22 раза (отношение пороговых значений принимаемых за время экспозиции квантов) более чувствительна, чем А600f. При высоком уровне облученности, когда SNR>>1, A102f также обладает несколько большей чувствительностью, чем A600f: отношение соответствующих значений квантовой эффективности дает оценку в 1,8 раза. Кроме того, максимальное и минимальное значение принимаемых сигналов позволяет оценить динамический диапазон камер: динамический диапазон ПЗС-камеры существенно больше динамического диапазона камеры с КМОПсенсором: для A102f – примерно 10⁴, для A600f - не более 600.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, методика стандарта EMVA 1288 описания фотоэлектрических камер с цифровым выходом дает критериальные параметры оценки технических параметров таких устройств и может рассматриваться как основа для квалифицированного их сравнения и выбора в задачах, связанных с применением различных вариантов систем технического зрения.

Список литературы

1. ГОСТ 21934-83 Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения [Электронный pecypc]. URL: http://gostexpert.ru/gost/gost-21934-83 (дата обращения 21.02.2018).

2. ГОСТ 17772-88 Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик [Электронный ресурс]. URL: http://gostexpert.ru/gost/gost-17772-88 (дата обращения 21.02.2018).

3. ГОСТ 25532-89 Приборы фоточувствительные с переносом заряда. Термины и определения [Электронный ресурс]. URL: http://gostexpert.ru/gost/gost-25532-89 (дата обращения 21.02.2018).

4. ГОСТ 28953-91 Приборы фоточувствительные с переносом заряда. Методы измерения параметров [Электронный ресурс]. URL: http://gostexpert.ru/gost/gost-28953-91 (дата обращения 21.02.2018).

5. ISO 18383:2015(en) Photography – Digital cameras – Specification guideline [Электронный ресурс]. ISO [сайт]. URL:https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:18383:ed-1:v1:en (дата обращения 21.02.2018).

6. European Machine Vision Association. [Сайт]. URL: http://www.emva.org/standards-technology/emva-1288 (дата обращения 21.02.2018г.)

7. *Оздиев А.Х., Карпов Д.А.* Автоматизация установки для измерения параметров цифровых быстродействующих камер // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции. Томск, 2015. С. 328.

8. Tokyo Instruments, Inc. Nanotechnology and photonics [Сайт]. URL: http://www.tokyoinst.co.jp/ product_file/file/PC06_tec08_ja.pdf (дата обращения 21.02.2018г.).



МЕТОДИКА АБЕРРАЦИОННОГО СИНТЕЗА ЛАЗЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ПОГОНЫШЕВ А.О., ШИРАНКОВ А.Ф.

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

E-mail: pogon.andrey1@gmail.com, ashirankov@mail.ru

Аннотация: В статье предлагается методика аберрационного синтеза лазерных оптических систем (ЛОС). При наличии аберраций в ЛОС подобие пучков на входе и выходе нарушается, что ухудшает выходные параметры лазерного пучка, требуемые для решения практических задач. Поэтому сохранить подобие полей можно с помощью ЛОС, обладающей минимальной волновой аберрацией. Минимизация волновой аберрации основана на выявленной связи конструктивных параметров (КП) ЛОС с ее коэффициентами разложения. На основании представленной методики разработан алгоритм аберрационного синтеза ЛОС, позволяющий получить наилучшие КП по критерию минимума волновой аберрации.

Ключевые слова: лазерная оптика, лазерная оптическая система, аберрационный синтез, волновая аберрация, конструктивные параметры.

METHOD OF THE ABERRATIONAL SYNTHESIS OF LASER OPTICAL SYSTEMS

POGONYSHEV A.O., SHIRANKOV A.F.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

E-mail: pogon.andrey1@gmail.com, ashirankov@mail.ru

Abstract: The method of aberrational synthesis of laser optical systems is proposed in the article. In the presence of aberrations in laser optical system, the similarity of the beams at the input and output is violated, which worsens the output parameters of the laser beam required for solving practical problems. Therefore, it is possible to preserve the similarity of fields by means of a laser optical system with a minimum wave aberration. Minimization of the wave aberration is based on the revealed relationship between the design parameters of laser optical system and its coefficients of decomposition. On the basis of the presented technique, an algorithm for aberrational synthesis laser optical systems has been developed, which makes it possible to obtain the best design parameters by the criterion of minimum wave aberration.

Keywords: laser optics, laser optical system, aberrational synthesis, wave aberration, design parameters.

ВВЕДЕНИЕ

Целью аберрационного синтеза лазерной оптической системы (ЛОС) является определение конструктивных параметров (КП) оптических компонентов: радиусов кривизны r, толщин d, световых D_{ce} и полных диаметров D_p , показателей преломления n, а также расстояний между оптическими компонентами d_{κ} , при которых обеспечивается минимум фазовых искажений лазерного пучка на выходе ЛОС [1, 3]. В качестве исходных данных выступают параксиальные параметры входного (z_{κ} , h'_p , θ') лазерных пучков, параметры ЛОС, полученные в результате габаритного синтеза, показатели преломления выбранных марок стекол n_1 и n_2 [1].

Известно, что в параксиальной области распределения энергии в сформированном и исходном пучках подобны [1, 2]. При наличии аберраций в ЛОС подобие пучков на входе и выходе нарушается, что отрицательно сказывается на выходных параметрах лазерного пучка, обеспечивающих решение различных практических задач. Поэтому сохранить подобие полей можно с помощью ЛОС, обладающей минимальной волновой аберрацией. Волновая аберрация описывает отклонение волнового фронта реального пучка от идеального на выходе оптической системы [1, 3].

Важно отметить, что методы расчета оптических систем для классических источников излучения не учитывают пространственную когерентность лазерного излучения, поэтому их нельзя применять в данной ситуации. Следовательно, для аберрационного синтеза ЛОС используется метод скалярной теории дифракции [4].

1. МЕТОДИКА АБЕРРАЦИОННОГО СИНТЕЗА ЛОС

Разложение волновой аберрации от поперечных координат (ξ', η') на выходе ЛОС имеет вид (рис. 1) [1, 3, 5]:

$$W(x', y') = -\frac{h'^2}{2 \cdot f'} \cdot (\chi + \alpha \cdot h'^2 + \beta \cdot h'^4 + \omega \cdot h'^6), \quad (1)$$

где $h'^2 = \xi'^2 + \eta'^2$; f' - заднее фокусное рас $стояние ЛОС; <math>\chi$, α , β , ω - коэффициенты разложения функции волновой аберрации, определяющие дефокусировку плоскости анализа (χ), аберрации ЛОС 3-го (α), 5-го (β) и 7-го порядков (ω) (рис. 1). Для оптического компонента, состоящего из двух линз [1, 3]:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{4} \cdot \frac{\rho_{1}^{3} - \rho_{2}^{3}}{\rho_{1} - \rho_{2}} \cdot \varPhi_{1} \cdot f' + \frac{1}{4} \cdot \frac{\rho_{2}^{3} - \rho_{3}^{3}}{\rho_{2} - \rho_{3}} \cdot \varPhi_{2} \cdot f', \\ \beta &= \frac{1}{8} \cdot \frac{\rho_{1}^{5} - \rho_{2}^{5}}{\rho_{1} - \rho_{2}} \cdot \varPhi_{1} \cdot f' + \frac{1}{8} \cdot \frac{\rho_{2}^{5} - \rho_{3}^{5}}{\rho_{2} - \rho_{3}} \cdot \varPhi_{2} \cdot f', \end{aligned}$$

$$\omega &= \frac{5}{64} \cdot \frac{\rho_{1}^{7} - \rho_{2}^{7}}{\rho_{2} - \rho_{3}} \cdot \varPhi_{1} \cdot f' + \frac{5}{64} \cdot \frac{\rho_{2}^{7} - \rho_{3}^{7}}{\rho_{2} - \rho_{3}} \cdot \varPhi_{2} \cdot f', \end{aligned}$$

где $\Phi_1 = (n_1 - 1) \cdot (\rho_1 - \rho_2)$ – оптическая сила первой линзы компонента; $\Phi_2 = (n_2 - 1) \cdot (\rho_2 - \rho_3)$ – оптическая сила второй линзы компонента; $\rho_j = \frac{1}{r_j}$ – кривизна преломляющей поверхности верхностей компонента;

 $j = \overline{1, 3}; n_1, n_2$ – показатели преломления линз оптического компонента.

С позиций геометрической оптики лазерный пучок представляют в виде совокупности лучевых пакетов, которые, в свою очередь, есть набор косых лучей, описывающих гиперболоид вращения и каждый из которых описывает часть пучка на определенном уровне мощности [1].

Функция волновой аберрации определяется через оптическую длину хода лучей между входным и выходным фронтами (рис. 1), т. е [4, 5]:

$$W(h) = \frac{L(\overline{q}) - L(0)}{\lambda}, \qquad (3)$$

где $L(\overline{q})$ – оптическая длина хода косого луча, соответствующего определенному уровню плотности мощности; L(0) – оптическая длина хода луча, соответствующего осевому уровню плотности мощности.

Расчет оптической длины хода косого луча можно провести, например, с помощью формул Федера [6]. Действительный луч описывается в системе координат Федера данной поверхности шестью величинами: тремя линейными координатами *x*, *y*, *z* – проекциями радиус вектора



Преобразование лазерного пучка ЛОС

 $s = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ какой-либо точки на луче и тремя угловыми *X*, *Y*, *Z* – проекциями орта

> Y направления луча. Из этих шести ко-Z ординат независимыми являются четыре, так как:

$$z = \sqrt{1 - x^2 - y^2} ;$$

$$Z = \sqrt{1 - X^2 - Y^2} .$$
(4)

Вектора положения *s* и направления *q* произвольного луча текущего лучевого пакета имеют вид:

$$s = \begin{pmatrix} h \cdot \cos(\psi) \\ h \cdot \sin(\psi) \\ 0 \end{pmatrix}; \quad q = \begin{pmatrix} -\frac{h_p}{z_k} \cdot \sin(\psi) \\ \frac{h_p}{z_k} \cdot \cos(\psi) \\ \sqrt{1 - \left(\frac{h_p}{z_k}\right)^2} \end{pmatrix}.$$
(5)

Согласно соотношению для волновой аберрации W(x', y') (1) изменение фазы пучка тонким оптическим компонентом может быть представлено в виде [1, 3]:

$$\varphi = \frac{k}{2 \cdot f'} \cdot (h^2 + \alpha_{\Sigma} \cdot h^4 + \beta_{\Sigma} \cdot h^6 + \omega_{\Sigma} \cdot h^8). \quad (6)$$

Коэффициенты α_{Σ} , β_{Σ} , ω_{Σ} характеризуют аберрации оптической системы и свободного пространства.

В работах [1, 3] предлагается находить КП ЛОС, исходя из условия устранения коэффициента эквивалентной аберрации третьего порядка (т. е. при $\alpha_{\Sigma} = 0$). В случае синтеза двухлинзового склеенного объектива условие $\alpha_{\Sigma} = 0$ приводит к уравнению третьей степени [2]:

$$n_{11} \cdot (1 + m^3 \cdot n_{11}^2) \cdot y^3 + 3 \cdot n_{11} \cdot (1 + n_{11} \cdot b \cdot m^3) \cdot y^2 + 3 \qquad (1 + 3 \cdot n_{11} \cdot (1 + b^3 \cdot m^3)) \cdot y + \left(a + \frac{b^3 \cdot m^3}{n_{11}}\right) = 0$$

$$(7)$$

3

где
$$y = \frac{\rho_1}{\rho} - 1$$
; $x_4 = \frac{\rho_4}{\rho}$; $m = \frac{f}{z_{IA}}$;
 $n_{11} = n_1 - 1$; $n_{21} = n_2 - 1$;
 $b = n_{21} \cdot (1 - x_4)$; $a = n_{21} \cdot (1 - x_4^3)$.

Уравнение (7) связывает переменные *у*, *m*, *x*₄. Выбирается марка стекла линз оптического компонента и задаются *x*₄ и *m*, далее решается уравнение (7) относительно переменной *у*, которое дает одно или три действительных решения, каждое из которых определяет одну из возможных схем оптического компонента. Рассчитываются радиусы кривизны преломляющих поверхностей линз оптического компонента:

$$r_{2} = (n_{11} \cdot y + b) \cdot f';$$

$$r_{1} = \frac{r_{2}}{y + 1};$$

$$r_{3} = \frac{r_{2}}{x_{4}}.$$
(8)

По световому диаметру компонента D_c , получаемому при габаритном синтезе ЛОС, определяется полный диаметр оптического компонента с помощью соотношения [7, 8]:

$$D_p = D_c + \Delta D , \qquad (9)$$

где ΔD – припуск на крепление линзы в оправе. Значение ΔD определяется в зависимости от значения светового диаметра оптического компонента и способа крепления линз в оправе.

Стрелки прогиба *S_j* преломляющих поверхностей линз оптического компонента могут быть найдены из соотношений [7, 8]:

$$S_{j} = r_{j} - \left(r_{j}^{2} - \frac{D_{p}^{2}}{4}\right)^{1/2}$$
, если $r_{j} > 0;$
 $S_{j} = r_{j} + \left(r_{j}^{2} - \frac{D_{p}^{2}}{4}\right)^{1/2}$, если $r_{j} < 0.$ (10)

Толщины линз *d*_{*n*} оптического компонента могут быть найдены из соотношений:

$$d_n = d_{\kappa p} + S_1$$
, если $r_1 > 0$ и $r_2 > 0$;
 $d_n = d_{\kappa p} + 2$, если $r_1 < 0$ и $r_2 > 0$;
 $d_n = d_{\kappa p} + S_2$, если $r_1 < 0$ и $r_2 > 0$;
 $d_n = d_{\kappa p} + S_1 + S_2$, если $r_1 > 0$ и $r_2 < 0$; (11)

где $d_{\kappa p}$ – толщина линзы по краю; S_1 – стрелка прогиба первой поверхности линзы; S_2 – стрелка прогиба второй поверхности линзы; r_1 – радиус кривизны первой поверхности линзы; r_2 – радиус кривизны второй поверхности линзы. Значение $d_{\kappa p}$ определяется в зависимости от значения светового диаметра оптического компонента. Определение кардинальных отрезков оптического компонента f', $S_{f'}$, Δ' может быть произведено с помощью расчета хода нулевого луча [9, 10].

Задача расчета хода нулевого луча состоит в определении его координат на данной поверхности по известным координатам на предыдущей поверхности и в повторении этого процесса от первой до последней поверхности оптической системы.

Значения f, S_{f} , Δ также могут быть рассчитаны с помощью расчета хода нулевого луча, но в обратном ходе (рис. 2). При этом порядок расположения КП системы и знаки радиусов кривизны оптических поверхностей меняются на обратные.

При переходе от тонких оптических компонентов к толстым их фокусные расстояния изменяются. Для того, чтобы фокусное расстояние компонента оставалось прежним, выполняется процедура редуцирования, при которой радиусы кривизны и толщины компонента умножаются на коэффициент редуцирования. Коэффициент редуцирования определяется как [3, 4]:

$$A_{peo} = \frac{f_{c-c}}{f_{a-c}} \quad , \tag{12}$$

где f_{z-c} – фокусное расстояние компонента, полученное при габаритном синтезе; f_{a-c} – фокусное расстояние компонента, полученное при аберрационном синтезе.



Рисунок 2. Кардинальные элементы оптической системы

2. АЛГОРИТМ АБЕРРАЦИОННОГО СИНТЕЗА ЛОС

На основании представленного выше математического аппарата разработан алгоритм аберрационного синтеза ЛОС. Он включает в себя следующие этапы:

1) Задаются: параметры входного и выходного лазерных пучков, параметры ЛОС, полученные в результате габаритного синтеза, показатели преломления выбранных марок стекол n_1 и n_2 .

2) Задаются наборы значений неопределенных коэффициентов x_4 и *m* (для двухлинзового склеенного объектива), представляющие собой последовательности значений с фиксированным шагом, находящимися в заданных диапазонах [$x_{4\min}$; $x_{4\max}$] и [m_{\min} ; m_{\max}].

В разработанном алгоритме для каждой комбинации перебираемых значений x_4 и *m* находятся все КП ЛОС, и проверяется выполнение всех заданных ограничений. Лишь в этом случае данная комбинация КП ЛОС является решением. Это решение исследуется далее и сравнивается с другими решениями по значениям волновой аберрации ЛОС.

2.1) Организуется цикл для перебора значений x_4 с заданным шагом.

2.2) Организуется цикл для перебора значений *m* с заданным шагом. Данный цикл находится внутри цикла для перебора значений *x_a*.

3) Решается уравнение (7) относительно переменной *у*. Находится действительное решение этого уравнения.

4) Рассчитываются радиусы кривизны преломляющих поверхностей линз оптического компонента с помощью соотношений (8).

5) Определяется полный диаметр оптического компонента D_p с помощью соотношения (9). Проверяются условия: $r_j > \frac{D_p}{2}$. Если хотя бы одно из условий не выполняется, то производится переход на следующий шаг в пункте 2.2 алгоритма.

6) Находятся стрелки прогиба S_j преломляющих поверхностей линз с помощью соотношений (10). Находятся толщины линз d_{π} оптического компонента из соотношений (11).

7) Рассчитывается заднее фокусное расстояние *f* ′ компонента согласно алгоритму расчета хода нулевого луча через оптическую систему [9, 10]. 8) Приводятся КП оптического компонента к тем, при которых обеспечивается его требуемое фокусное расстояние (редуцирование компонента). Коэффициент редуцирования определяется по формуле (12).

9) Рассчитываются кардинальные отрезки f', $S_{f'}$, Δ' , f, S_{f} , Δ согласно алгоритму расчета хода нулевого луча через оптическую систему [9, 10]. Передние кардинальные отрезки рассчитываются в обратном ходе лучей (рис. 2).

10) Проверяются условия: $r_j \in [r_{\partial onmin}; r_{\partial onmax}]$, $d_n \in [d_n \min \partial on; d_n \max \partial on]$, где $[r_{\partial onmin}; r_{\partial onmax}]$, $[d_n \min \partial on; d_n \max \partial on]$ – диапазоны допустимых радиусов кривизны и толщин линз оптического компонента. Если хотя бы одно из условий не выполняется, то производится переход на следующий шаг в пункте 2.2 алгоритма.

11) Рассчитываются расстояние от входной перетяжки до первой поверхности оптического компонента d_{1p} и расстояние от последней поверхности оптического компонента до выходной перетяжки d_{2p} с помощью соотношений:

$$d_{1p} = d_1 - \Delta$$
$$d_{2p} = d_2 + \Delta'$$
(13)

12) Производится расчет функции волновой аберрации с помощью соотношения (3). Расчет $L(\bar{q})$ и L(0) проводится согласно алгоритму расчета хода лучей через оптическую систему [6].

13) Данная комбинация КП ЛОС является решением и записывается в массив решений для исследования далее и сравнения с другими решениями по значению волновой аберрации.

14) Поставленная задача имеет большое количество решений, то есть множество комбинаций перебираемых КП могут обеспечить ее решение. Выбирается решение с наименьшим значением волновой аберрации *W*(*h*).

15) Если в выбранном решении один из параметров x_4 или *m* находится на границе выбранных интервалов, то изменяем интервалы $[x_{4\min}; x_{4\max}]$, $[m_{\min}; m_{\max}]$ таким образом, чтобы полученное решение не лежало на границе интервалов. Повторяются пункты 2 – 14 алгоритма аберрационного синтеза до тех пор, пока не получится решение, лежащее не на границе заданных интервалов.

16) Производится переход к следующему оп-
тическому компоненту ЛОС. Повторяются пункты 2 – 15 алгоритма аберрационного синтеза для текущего компонента ЛОС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате, были разработаны методика и алгоритм аберрационного синтеза, позволяющие получить наилучшую комбинацию конструктивных параметров ЛОС по критерию минимума волновой аберрации. Разработанная методика дает возможность синтезировать высококачественные ЛОС для решения различных практических задач.

Список литературы:

1. *Пахомов И.И., Цибуля А.Б.* Расчет оптических систем лазерных приборов. – М.: Радио и связь, 1986. – 152 с.

2. Пахомов И.И., Рожков О.В., Рождествин В.Н. Оптико-электронные квантовые приборы. М.: Радио и связь, 1982. – 456 с.

3. Носов П.А., Пахомов И.И., Ширанков А.Ф. Состояние и перспективы развития методов расчета преобразования лазерного излучения оптическими системами // Инженерный журнал: наука и инновации. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал 2012. №9. Режим доступа: http://engjournal.ru/ articles/363/363.pdf (дата обращения 16.04.2017).

4. Носов П.А., Павлов В.Ю., Пахомов И.И., Ши-

ранков А.Ф. Аберрационный синтез оптических систем, предназначенных для преобразования лазерных пучков // Оптический журнал, 2011. Т. 78; № 9. с. 34 – 44.

5. Ширанков А.Ф., Носов П.А., Пахомов И.И., Григорьянц А.Г., Якунин В.П., Третьяков Р.С. Разработка лазерно-оптических систем технологических установок на основе теории лазерной оптики // Инженерный журнал: наука и инновации, 2013. № 9. Режим доступа: http://engjournal.ru/catalog/pribor/ optica/926.html (дата обращения 17.08.2017).

6. *Родионов С.А*. Автоматизация проектирования оптических систем. – Ленинград: Машиностроение, 1982. – 270 с.

7. *Толстоба Н.Д., Цуканов А.А.* Проектирование узлов оптических приборов. Учебное пособие. – СПб, 2002. – 128 с.

8. Быков Б.З. Перов В.А. Оформление рабочих чертежей оптических деталей и выбор допусков на оптические детали – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 99 с.

9. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем (изд. 3-е). М.: Машиностроение, 1992. 488 с.

10. Русинов М.М., Грамматин А.П., Иванов П.Д., Андреев Л.Н., Агальцова Н.А., Ишанин Г.Г., Василевский О.Н., Родионов С.А. Вычислительная оптика. Справочник. – Ленинград: Машиностроение, 1984. – 424 с.



УСТАНОВКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ НА ЗЕРКАЛАХ КОЛЬЦЕВЫХ Не-Ne ЛАЗЕРОВ

АЗАРОВА В.В., ЛОБАНОВ П.Ю., МАНУЙЛОВИЧ И.С., СИДОРЮК О.Е.

АО НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха, г.Москва

E-mail: azarova_v_v@mail.ru, o.e.sidoryuk@gmail.com

Аннотация: Представлены результаты работ по созданию автоматизированной установки для контроля азимутальной зависимости модуля коэффициента рассеяния зеркал «назад» на длине волны 632,8 нм в телесный угол, сопоставимый с телесным углом моды кольцевого резонатора (~0,6·10⁻³ стерадиан). Чувствительность метода и разработанного устройства не хуже чем 10⁻³ ppm. Реализована задача оперативного анализа пространственного распределения этого параметра по поверхности зеркала. Особое внимание уделено рассмотрению прикладных возможностей установки при выборе оптимальных ориентаций образцов для снижения уровня обратного рассеяния.

Ключевые слова: *дифференциальное рассеяние, фотометрическая установка, интерференционные зеркала.*

BACK SCATTERING CONTROL UNIT ON MIRRORS OF RING He-Ne LASERS

AZAROVA VALENTINA., LOBANOV PYOTR YURIEVICH, MANOJLOVICH IVAN SERGEEVICH, OLEG E. SIDORYUK

JSC research Institute «Polyus» them. M. F. Stelmakh, Moscow, Russia

E-mail: azarova_v_v@mail.ru, o.e.sidoryuk@gmail.com

Abstract: The results of the work on the creation of an automated system for monitoring the azimuth dependence of the back scattering coefficient module at a wavelength of 632.8 nm in the solid angle comparable to the solid angle of the ring resonator mode ($\sim 0.6 \cdot 10^{-3}$ steradian) are presented. The sensitivity of the method and the developed device is not worse than 10^{-3} ppm. The task of the operational analysis of the spatial distribution of this parameter on the surface of the mirror. Special attention is paid to the applied possibilities of the installation when choosing the optimal sample orientations to reduce the backscattering level.

Keywords: differential scattering (ARS), photometric installation, interference mirrors.

ВВЕДЕНИЕ

Контроль параметров рассеяния света в многослойных интерференционных покрытиях является важным фактором обеспечения качества оптических деталей, улучшения их характеристик. Метрологические методики в этой области к настоящему времени достигли высокого уровня стандартизации с унификацией требований к ряду параметров используемых технических средств. В частности, стандартизованная процедура измерений интегрального (Total scattering - TS_b) [1] и дифференциального (Angle-resolved scattering - ARS) [2,3] pacсеяния оптических элементов устанавливает строгие рамки выбора: от вариантов принципиальной схемы до допустимого диаметра пучка тестирующего лазерного излучения. Обычно обсуждаются лишь смежные вопросы по автоматизации измерений или способам презентации экспериментальных результатов [4].

Следование предписанным правилам является гарантией идентичности результатов, полученных различными исследователями, основой достоверности сравнительных характеристик оптических элементов разных производителей. Однако такой подход не исключает возможность расширенного анализа с получением специальных характеристик исследуемых деталей, необходимых для применений в конкретных областях оптического приборостроения. В частности, актуальна задача измерения величины обратного рассеяния, т.е. интенсивности потока рассеянного света в малом телесном угле по направлению, обратном падающему лучу лазерного излучения. Именно этот параметр зеркал кольцевого резонатора является одной из ключевых причин нелинейности частотной характеристики [5] лазерных гироскопов и, соответственно, сужения границ работоспособности навигационных приборов [6].

В настоящей работе изложены результаты создания установки для фотометрического контроля обратного рассеяния интерференционных зеркал лазерных гироскопов и приведены характерные примеры анализа исследуемых образцов.

СХЕМА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема и внешний вид установки для исследований амплитудных коэффициентов обратного рассеяния представлены на рис. 1 и фото 1, соответственно.



1 - Не-Ne лазер, 2 - электро-механический прерыватель, 3,5 – поворотные зеркала, 4 - ослабитель излучения, 6,8,9 – линзы, 7 – диафрагма формирователя пучка, 10 – алюминиевое зеркало с диафрагмой, 11 – исследуемый образец, 12 - механическое устройство позиционирования образца,

13 - цифровая видеокамера, 14 - светоделительная пластина, 15 - модуль фотоэлектронного умножителя, 16 - диафрагма фотоприемного устройства, 17, 18, 19 – защитные диафрагмы, 20 – поглотитель, 21 – зеркало для калибровки, 22 - опто-электронный блок, 23 – микроконтроллер, 24 – компьютер



Рисунок 2. Внешний вид установки

Одномодовый He-Ne лазер (1) мощностью 15 мВт на длине волны 632,8 нм служит источником излучения, которое направляется в опто-электронный блок (22) с образцом (11) посредством зеркал (3) и (5). По ходу следования лазерного луча установлены электро-механический прерыватель (2) и ослабитель излучения (4).

Конфокальное устройство, образованное двумя линзами (6) и (8), и диафрагмой (7) в области перетяжки диаметром 200 мкм, формируют пучок лазерного излучения. Диафрагма ограничивает световой пучок, создавая преграду рассеянному лазерному и фоновому излучению при направлении к образцу. Дополнительная защита от нежелательной засветки обеспечивается диафрагмами (18) и (19) непосредственно на входе и выходе лазерного луча.

Для фокусировки излучения на исследуемый образец служит линза (9). Диаметр лазерного пучка в зоне воздействия на образец составляет 0,6 мм. Линза (9) закреплена на механическом устройстве, обеспечивающем ее плавную юстировку в плоскости, перпендикулярной оптической оси. Тем самым достигается выбор исследуемой области на поверхности образа с шагом 0,05 мм и диапазоном позиционирования 0,5 мм.

На пути следования лазерного пучка расположено зеркало (10) с центральным отверстием диаметром около 2 мм. Зеркало расположено под углом 45° таким образом, что отражает обратное рассеяние от исследуемого образца на входную диафрагму (16) фотоприемного устройства, состоящего из цифровой видеокамеры (13) и модуля фотоэлектронного умножителя (15) с общей светоделительной пластиной (14). Исследуемый образец (11) устанавливается под углом 45° к лучу лазерного излучения. Держатель образца сопряжен с механическим устройством (12), обеспечивающим его вращение во время измерений.

Поглотитель (20) представляет собой пластину из темного стекла, расположение которой по отношению к падающему лучу выбирается с учетом минимизации световых помех от отраженного ее поверхностью излучения. Используется пластина с высоким качеством полировки поверхности, поскольку при регистрации обратного рассеяния область воздействия лазерного пучка на поглотитель оказывается в зоне видимости приемного устройства (или близко к ней).

Качество юстировки оптической схемы является важным фактором устранения помех посторонних источников света для обеспечения достоверности и точности измерений. Решение этой задачи обеспечивается настройкой положения диафрагм (16) и (17), зеркала (10). Индикатором достигнутого результата при этом служит картина, регистрируемая цифровой видеокамерой (13).

Абсолютная величина обратного рассеяния лазерного излучения регистрируется модулем (15) фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) H10493-011 фирмы Hamamatsu. Управление его электронным блоком, прием и обработка сигналов производится микроконтроллером (23), сопряженным с компьютером (24), на котором установлена специальная программа по анализу и презентации экспериментальных данных.

Геометрические параметры оптической схемы установки обеспечивают регистрацию обратного рассеяния в телесном угле **W** = 0,6 ·10⁻³ стерадиан.

Установка оказывается нечувствительной к внешней засветке и допускает эксплуатацию в помещении при уровнях освещенности до 250 лк. В то же время предъявляются требования по классу чистоты помещения – не хуже 8 ИСО согласно ГОСТ ИСО 14644-1-2002.

МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ И ПРОЦЕДУРА ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ.

Проведение измерений на установке предусмотрено в автоматическом режиме по специальной программе, от которой оператору поступают запросы по выбору формата анализа или типа презентации данных.

Первоначальной процедурой является калибровка метрологической установки, которая предусматривает регистрацию отклика измерительной системы при воздействии дозированного уровня лазерного излучения. Это реализуется с использованием дополнительного зеркала (21). Оно устанавливается по ходу лазерного луча таким образом, чтобы направить ослабленное фильтрами (4) излучение напрямую в приемный модуль (15).

При калибровке под воздействием лазерного излучения с интенсивностью *I* при общем коэффициенте пропускания ослабителя регистрируется сигнал

$$U_{k} = \alpha_{k} \cdot I \cdot \tau$$

Здесь коэффициент τ удобно выражать в **ррт** (1 *ppm* = 10⁻⁶).

Аналогично сигнал, регистрируемый при измерениях обратного рассеяния величиной *k* (доли от падающего излучения), может быть представлен как

$$U_u = \alpha_u \cdot I \cdot k$$

В обоих случаях $\alpha_k U \alpha_u$ - коэффициенты пропорциональности, величины которых определяются напряжениями, приложенными к модулю ФЭУ, и учитываются в компьютерной программе обработки результатов.

Соответственно, значение обратного рассеяния излучения (в единицах *ppm*) для исследуемого образца может быть найдено по формуле:

$$k = \frac{U_u}{U_\kappa} \cdot \frac{\alpha_\kappa}{\alpha_u} \cdot \tau$$

Широкий диапазон калибровок по уровню интенсивности лазерного излучения (9 порядков) обеспечивается разными установками ослабителя (4), состоящего из 8 аттестованных светофильтров. Для уменьшения погрешности и повышения достоверности измерений в установке используется изложенная ранее методика [4] сопоставления массивов данных последовательностей сигналов, получаемых при разных коэффициентах усиления модуля фотоумножителя (15) при плавном увеличении управляющего напряжения с микроконтроллера (23).

Измерениям должны предшествовать стандартные процедуры метрологической аттестации поглощающих фильтров (4) и зеркала (21) с отражением их параметров в соответствующих окнах интерфейса компьютерной программы.

Установка предназначена для анализа характеристик лазерных зеркал на подложках из плавленого кварца, оптического ситалла марки СО-115М или стеклокерамик Clearceram и Zerodur диаметром 30 мм и толщиной 4 мм. Для работы с образцами других типоразмеров предусмотрено использование переходных оправ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе исследовались интерференционные зеркала TiO₂/SiO₂ и Ta₂O₅/SiO₂. Поверхности подложек, служивших основой для нанесения покрытий, имели шероховатость 1-3 Å (исследовались на интерферометре белого света NewView 6200 фирмы Zygo). Образцы были получены посредством ионно-лучевого распыления. Особенности конструкций покрытий и некоторые из основных характеристик представлены в таб. 1. L и H – слои соответственно с низким и высоким значениями показателей преломления четвертьволновой толщины на длине волны λ =690 нм, которая обеспечивает расчетные значения параметров для формирования зеркал с центром полосы отражения при λ=632,8 нм и угле падения излучения 45°. Величина интегрального рассеяния образцов, измеренная по методике [4], находилась в диапазоне от 7 до 30 ppm

гаолица 1

Образец	Конструкция	Показатель преломления слоев H/L					
TiO ₂ /SiO ₂	(HL) ⁹ L	2,41 / 1,48					
Ta ₂ O ₅ /SiO ₂	$(HL)^{13}L$	2,12 / 1,48					

При повороте исследуемых образцов заметной особенностью регистрируемых распределений обратного рассеяния являются резкие колебания, обусловленные спекл-структурным характером картин рассеяния лазерного излучения. Диапазон изменений столь велик, что максимальные значения часто превосходят минимальные в 10 и более раз. Скачок значений контролируемого параметра может достигать пятикратного перепада при относительно небольшом повороте зеркала (около 3°).

На рис. З представлены типичные результаты анализа одного из образцов - интерференционного зеркала TiO₂/SiO₂. Аналогичный итог наблюдается и для покрытий Ta₂O₅/SiO₂.

Программное обеспечение метрологической установки позволяет для каждой области образца производить указание такой его ориентации относительно падающего лазерного излучения, при которой наблюдается минимальный уровень обратного рассеяния k_{min} . В качестве дополнительной функции программы обработки экспериментальных данных предусмотрен численный анализ с процедурой нахождения минимума средних значений k_{min2} по двум на-

правлениям, отличающимся на 180°, поскольку в резонаторе датчика лазерного гироскопа в равной степени актуальны параметры рассеяния встречных волн. При этом указывается φ_{min} - один из направляющих углов найденных положений образца.

Презентация результатов может сопровождаться указанием диапазона роста указанной величины и ее среднего значения k_{min2}^{cp} при отклонении ориентации образца от оптимальной на угол ± Δ .

Значение разориентации Δ, учитываемой при математической обработке экспериментальных данных, должно определяться опытным путем в конкретной технологии сборки приборов с анализом возможной погрешности установки зеркала относительно рекомендуемого положения. Соответственно, для образца, представленного на рис. 3, при

 φ_{\min} = -(48±2)° имеет место $k_{\min2}^{cp}$ = 0,021 , в то время как $k_{\min2}$ = 0,013 ppm и k_{\min} = 0,009 ppm.

В то же время для $\varphi_{max} = (50\pm10)^\circ$ имеет место $k_{max}^{cp} \approx 0.05$, что в несколько раз превышает минимальные значения.



Рисунок 3. Диаграмма модулей коэффициентов обратного рассеяния излучения в интерференционных зеркалах TiO₁/SiO₂, регистрируемая при вращении образца

Таким образом, можно в несколько раз улучшить используемый параметр зеркала за счет позиционирования его оптимальным образом.

выводы

- Использование разработанной и изготовленной метрологической установки с контролем величины обратного рассеяния и выработкой рекомендаций по оптимальной ориентации зеркала способствует повышению качества сборки кольцевых лазеров, достижению более высоких параметров приборов при сравнимых характеристиках используемых оптических элементов.

- Высокая степень автоматизации, компьютерное управления процессами измерений обеспечивают высокую производительность установки, делают удобным ее использование в условиях массового производства датчиков лазерных гироскопов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы выражают благодарность Расеву М.М., Оглоблину М.С., Косачковой И.Н. и Варюхиной И.А. за изготовление образцов для измерений, а также Ищенко П.И., Фокину В.В. и Кулагину А.В. за подготовку образцов к изме-

рениям, проведение измерений и обсуждение полученных результатов.

Список литературы:

1. Optics and optical instruments – Test methods for radiation scattered by optical components. // International standard. ISO 13696.

A von Finck, T. Herffurth, S. Schroder, and A. Duparre. Characterization of optical coatings using a multisource table-top scatterometer. // Appl. Opt. 2014, 53, p. A259–A269.

3. S. Schroder, T. Herffurth and A. Duparre . Angle-resolved scattering: an effective method for characterizing thin-film coftings. //Appl. Opt. 2011, 50,N 9.p.164-171.

4. Азарова В.В., Лобанов П.Ю., Мануйлович И.С., Сидорюк О.Е., Фокин В.В. Фотометрический контроль интегрального рассеяния при оценке качества интерференционных зеркал. //Датчики и системы, 2017, №1, стр.42-49.

5. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Кузнецов Е.В., Макеев А.П. О частотной характеристике зеемановских лазерных гироскопов. // Контенант, 2017, 4(16), стр.74-80.

6. *Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Савельев И.И.* Зеемановские лазерные гироскопы. // Квантовая электроника, 2015, т 45, стр.171-181.

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.4: 681.7.02-04:681.787



ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

АБДУЛКАДЫРОВ М.А., *ДРУЖИН В.В., *ЛАЗАРЕВА Н.Л., ПАТРИКЕЕВ В.Е., *ПУРЯЕВ Д.Т., СЕМЕНОВ А.П.

АО «Лыткаринский завод оптического стекла» (АО ЛЗОС) *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

E-mail: : lastro@lzos.ru, vlad.druzhin@gmail.com

Аннотация: Интерферометр содержит лазерный осветитель, вогнутое сферическое зеркало с центральным соосно осветителю отверстием, светоделительный элемент в виде куб-призмы с полупрозрачной гипотенузной гранью. На первой плоской грани куб-призмы выполнено микросферическое - вогнутое либо выпуклое - зеркало, центр которого располагается на оптической оси интерферометра. Особенность интерферометра состоит в уменьшении его габаритных размеров, увеличении апертуры и повышении качества выходящего волнового фронта, расширении диапазона использования.

Ключевые слова: интерферометр, оптический контроль, изготовление оптики, асферические зеркала.

INTERFEROMETER FOR MULTI-FUNCTIONAL OPTICAL TESTING

MAGOMED A. ABDULKADYROV, VLADISLAV V. DRUZHIN*, NATALIYA L. LAZAREVA*, VLADIMIR E. PATRIKEEV, DANIIL T. PURYAEV*, ALEKSANDR P. SEMENOV

JSC "Lytkarino Optical Glass Factory" *N. E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow

E-mail: lastro@lzos.ru, vlad.druzhin@gmail.com

Abstract: Interferometer comprises a laser illuminator, a concave spherical mirror with a central hole coaxial to the illuminator, a beam splitter like a cube-prism with a semitransparent hypotenuse face. A microspheric - concave or convex - mirror is formed on the first flat face of the cube-prism, the center of which is located on the optical axis of the interferometer.

The peculiarity of the interferometer is to reduce its overall dimensions, increase the aperture and improve the quality of the output wavefront, expanding the range of use.

Keywords: interferometer, optical testing, optical fabrication, aspherical mirrors.

ВВЕДЕНИЕ

Контроль формы поверхности оптической детали интерференционным способом стал неотъемлемой частью процесса формообразования таких деталей. Сегодня наиболее полную количественную информацию о волновом фронте можно получить именно интерферометрическим методом. Интерферометрия позволяет при точно сфокусированном интерферометре получить интерференционную картину, подобную топографической карте профиля ошибок исследуемой волновой поверхности, где горизонтали (изолинии уровня) представлены в виде полос с интервалом, кратным длине световой волны. При поперечной расфокусировке интерферометра, предложенного Твайманом, возникает система полос, форма каждой из которых соответствует профилю ошибок волнового фронта в данном сечении зрачка.

Огромное многообразие различных интерферометров для оптического контроля не поддается полному описанию. И, тем не менее, появляются новые варианты оптических схем интерферометров, один из которых представлен здесь

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Для оптических измерений применяется несколько типов интерферометров, в частности интерферометры Физо, Майкельсона, Тваймана-Грина и другие [2]. В общем случае все они содержат осветительную ветвь, разделительный элемент, например, плоскопараллельную пластину с одной полупрозрачной поверхностью, эталонную и регистрирующую ветвь. Исходный пучок света разделяется в них на два пучка, которые, отражаясь от эталонной и исследуемой поверхностей, интерферируют между собой и интерференционная картина наблюдается или регистрируется и исследуется. Указанные схемы довольно громоздки, часто дают не очень четкую интерференционную картину. Для устранения этих и прочих недостатков используют разделительный кубик (куб-призму), склеенную из двух прямоугольных призм с полупрозрачным отражающим слоем на гипотенузной грани одной из них. Так, известен интерферометр для контроля формы астрономических зеркал [3], выполненный по аналогичной схеме, в которой в качестве светоделителя использована куб-призма, а в качестве осветителя-монохроматический источник света в виде лазера. Однако схема отягощена необходимостью использования вспомогательных оптических деталей, в частности сферо-гиперболической линзы, что усложняет интерферометр и увеличивает его габариты.

Ближайшим к конструктивному исполнению и назначению может служить неравноплечий лазерный интерферометр типа ИТ-172 [4,5]. Он включает в себя осветительную ветвь с лазерным осветителем и микрообъективом, эталонную, иначе опорную ветвь, светоделительной элемент в виде куб-призмы с полупрозрачной гипотенузной гранью и регистрирующую интерференционную картину ветвь. Работает интерферометр обычным образом как это указано выше. Однако осветительная ветвь его довольно велика, числовая апертура выходящего пучка невелика, что не решает поставленную задачу. Применение интерферометра ограничено измерениями параметров и формы оптических поверхностей оптически анизотропных сред, где имеет место автоколлимационный ход лучей.

В интерферометре для многоцелевых оптических измерений, условно названном «Колибри», в осветительной ветви установлено вогнутое сферическое зеркало с центральным соосно осветителю отверстием, зеркало обращено вогнутой отражающей поверхностью к плоской грани куб-призмы, на которой выполнено микросферическое зеркало, при этом центр его располагается на оси интерферометра.

Применение микросферического зеркала позволяет существенно уменьшить габаритные размеры прибора, т.к. исключает необходимость применения афокальной системы для расширения пучка и многолинзового фокусирующего объектива сложной конструкции, аберрации которого должны быть исключены или учтены совместно с аберрациями куб-призмы. Такое решение позволяет существенно увеличить числовую апертуру выходных пучков и полностью исключить сферическую аберрацию и аберрацию кома пучка.

Интерферометр (рис. 1) содержит последовательно установленные лазерный источник излучения 1, микросферическое зеркало 2, вогнутое сферическое зеркало 3 с центральным отверстием, светоделительную куб-призму 4 с полупрозрачной гипотенузной гранью. Зеркало 3 обращено вогнутой отражающей поверхностью к плоской грани куб-призмы 4, на которой выполнено сферическое микросферическое зеркало 2, причем центр его располагается на оптической оси интерферометра. Интерферометр содержит по другую грань куб-призмы 4 в эталонной ветви эталонный объект 5, а со стороны третьей грани в регистрирующей ветви объектив сопряжения 6 и приемник излучения 7. Четвертой гранью интерферометр направлен в сторону объекта исследования 8 (измерительная ветвь).

Для работы в видимой области спектра в качестве источника 1 может быть применен He-Ne лазер с длиной волны λ =0,6328 мкм и диаметром пучка 1 мм, а для ИК-области спек-

тра – CO₂-лазер с длиной волны λ=10,6 мкм. Микросферическое зеркало 2 может быть как выпуклым (наклеенным на входную грань), так и вогнутым – в виде углубления в центральной части входной грани светоделительного кубика. Были рассчитаны конструктивные параметры базовой оптической схемы интерферометра для работы в видимой (таб. 1) и ИКобласти спектра (таб. 2).

Интерферометр работает следующим образом. Монохроматический световой пучок, выходящий из лазера 1, пройдя отверстие в зеркале 3, падает на микросферическое зеркало 2, и после отражения от него образуется расходящийся высокоапертурный пучок, который направляется на вогнутое сферическое зеркало 3 большего диаметра. После отражения от зеркала 3 световой пучок проходит через куб-призму 4, образуя выходящий пучок лучей с относительным отверстием 1:1,6 (для видимой области спектра, $\lambda = 0,6328$ мкм) и 1: 1,2 (для ИК-области, $\lambda = 10,6$ мкм), который практически не имеет сферической аберрации (остаточная волновая аберрация не превышает значения W= $\lambda/10$).



Рисунок 1. Принципиальная схема интерферометра



Рисунок 2. Вариант исполнения выпуклого микросферического зеркала



Рисунок 3. Вариант исполнения вогнутого микросферического зеркала

Таблица 1. Конструктивные параметры базовой оптической системы для работы в видимой области спектра (длина волны λ= 0,6328 мкм)

Радиусы,	Толщины,	Показатели	Световые диаметры,
MM	MM	преломления, п	ММ
2,291		1	
100,0	-88,90	-1	1,0
x	88,84	1	75,66
	20	1,514658 (K8)	18,82
∞		1	9,89

Таблица 2. Конструктивные параметры базовой оптической системы для работы в инфракрасной области спектра (длина волны 10,6 мкм)

Радиусы,	Толщины,	Показатели	Световые диаметры,
MM	MM	преломления, п	MM
1,419		1	1,0
80,91	-66,90	-1	92,85
^o	67,90	1	34,37
∞	35	2,4028 (ZnSe)	20,06





Рисунок 4. Контроль выпуклых гиперболоидов

Рисунок 5. Контроль эллипсоидов



Рисунок 6. Контроль плоских поверхностей

Рисунок 7. Контроль параболических поверхностей



Рисунок 8. Контроль вогнутых асферических поверхностей с корректором волнового фронта

Микросферическое зеркало 2 может быть выполнено, например, в виде выпуклого сферического зеркала малого диаметра 0,5-1 мм (рис. 2), либо в виде сферического углубления в куб-призме такого же диаметра (рис. 3) – вогнутое зеркало.

Измерительная ветвь интерферометра может представлять множество различных типовых схем для измерения разнообразных оптических элементов, например, выпуклых гиперболических (рис. 4), эллиптических (рис. 5), плоских (рис. 6), параболических (рис. 7), вогнутых асферических (рис. 8) зеркал, организованных по единому принципу: лучи выходящего сферического волнового фронта испытывают автоколлимационное отражение и возвращаются вновь на светоделительный кубик, где интерферируют с эталонным сферическим волновым фронтом. Объектив сопряжения 6 является сменным элементом в зависимости от конструкции измерительной ветви и должен обеспечить изображение контролируемой поверхности или автоколлимационного элемента на приемнике излучения 7, например, в виде матрицы ПЗС или фотопластинки.

Интерферометр промышленно применим, т.к. составляющие его узлы и оптические детали промышленностью освоены и выпускаются.

Расчетным путем и графически показано, что применение микросферического и отражающего сферического зеркал увеличивает апертуру и качество волнового фронта, укорачивает всю осветительную ветвь и уменьшает габариты интерферометра, расширяет диапазон его применения для различных типов измерений.

Данная схема может быть использовано при конструировании интерферометров типа Тваймана-Грина, неравноплечих микроинтерферометров для контроля формы и шероховатости поверхностей оптических деталей, в том числе зеркал телескопов, а также других измерений. Предложенное техническое решение осветительной ветви интерферометра может быть полезным и использоваться в качестве базового решения для других типов интерферометров.

Список литературы:

1. Кирилловский В.К., Трухин М.М., Фролов Д.Н. Интерферометрический контроль качества деталей объективов// Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, № 43, 2007, стр. 27-37.

2. Коломийцов Ю.В. «Интерферометры», Л-д «Машиностроение», 1976 г., стр.52-57, 210-212

3. А.с. SU 662795. Интерферометр для контроля формы астрономических зеркал / Д.Т. Пуряев, С.К. Мамонов (СССР); Опубл. 15.05.1979, Бюл. № 18.

4. Патент на изобретение № 1404810. Неравноплечий лазерный интерферометр/ В.В. Гербрандт, А.А. Жолудев, А.В. Лукин (Россия); Опубл. 23.06.1988, Бюл. № 23.

5. Коломийцов Ю.В. «Интерферометры», Л-д «Машиностроение», 1976 г., стр. 211.



ФИЛИАЛ АО «РКЦ «ПРОГРЕСС» - НПП «ОПТЭКС»

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ

Замена интерфейсов поразрядной параллельной передачи информационных потоков через шины проводных линий связи на высокоскоростные волоконно-оптические последовательные интерфейсы позволяет улучшить эксплуатационные характеристики бортовой аппаратуры. Благодаря внедрению волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) в аппаратуре космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) улучшился ряд эксплуатационных характеристик систем:

- повысилась помехоустойчивость линий передачи цифровых данных к воздействию электромагнитных помех;

возросла скорость передачи информации через единичную линию;
 замена проводных жгутов на оптические линии передачи информации дала выигрыш, как в качестве передаваемой информации так и в уменьшении массы бортовой аппаратуры.

КОМПОНОВКА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

КОМПОНОВКА БА КА ДЗЗ «РЕСУРС-ДК»

КОМПОНОВКА КА ДЗЗ «РЕСУРС-П»



Решение об использовании межсистемных волоконно-оптических линий передачи цифровой информации в системах приема и преобразования информации (СППИ) КА ДЗЗ было принято впервые в отечественной практике. С учетом отсутствия необходимых отечественных бортовых компонентов ВОЛП встал вопрос об их разработке в бортовом космическом исполнении. Специалистами НПП «ОПТЭКС» была разработана конструкторская документация, и освоено производство целого ряда компонентов ВОЛП в бортовом исполнении, технические характеристики которых находятся на уровне мировых достижений, что подтверждается наличием ряда патентов РФ на изобретения. Особенностью конструкции и технологии прецизионной сборки компонентов ВОЛП является высокий КПД (до 80%) ввода энергии излучения полупроводникового лазера в оптическое волокно.

ОСНОВНЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ ПРОИЗВОДСТВА НПП «ОПТЭКС»

1. ПЕРЕДАЮЩИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ (ОПРД) преобразует электрический информационный сигнал в оптический

Конструктивное исполнение ОПРД









Основные технические характеристики ОПРД

		ОПРД-8G		
Параметр	ОПРЛ 2 5G	с разъемной	с выходом	
Параметр	0111 д-2,50	лазерной	типа	
		головкой	«pigtail»	
Напряжение питания, В	3,3	3,3	3,3	
Ток потребления, мА	не более 100	не более 200	не более 150	
Скорость передачи информации, Гбит/сек	до 2,5	до 8,0		
Выходная оптическая мощность, мВт	от 1,0 до 10,0	от 2,0 до 8,0		
Уровень вероятности ошибок	не более 10-11	не более 10-11		
Габаритные размеры, мм	47x19x13	67x20x19	50x20x11	
Масса, г	23±2	30±5	20±5	
Диапазон рабочих температур, °С		от -40 до +50	1111 111 <i>111 1</i>	
Предельная температура, °С		от -60 до +60		
Рабочий диапазон излучения, нм		1310±10		
Назначенный ресурс, ч	55 000			
Материал корпуса	не	жавеющая сталь		

2. ПРИЕМНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ (ОПРМ) преобразует оптический в информационный электрический сигнал

Конструктивное исполнение ОПРМ





ОПРМ-8G



		ОПРМ-8G			
Параметр	ОПРМ 2.5G	с разъемной	со входом		
Параметр	0111 101-2,50	фотодиодной	типа		
		головкой	«pigtail»		
Напряжение питания, В	3,3	3,3	3,3		
Ток потребления, мА	не более 90	не более	120		
Скорость приема информации, Гбит/сек	до 2,5	до 8,0			
Пороговая чувствительность, дБм	минус 25	минус 16			
Уровень вероятности ошибок	не более 10-11	не более 10 ⁻¹¹			
Габаритные размеры, мм	47x19x13	67x20x19	50x20x11		
Масса, г	23±2	30±5	20±5		
Диапазон рабочих температур, °С		от -40 до +50			
Предельная температура, °С	от -60 до +60				
Рабочий спектральный диапазон, нм 1260÷1620					
Назначенный ресурс, ч	55 000				
Материал корпуса	нержавеющая сталь				

Основные технические характеристики ОПРМ

3. ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ЯЧЕЙКИ ВВОДА ЦИФРОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В ПК – ячейка ПИВОЛС-МВ предназначена для приема цифровых информационных

потоков со скоростью до 6,6 Гбит/с одновременно по четырем

высокоскоростным линиям с вводом информации в ПК;

- ячейка ПИВОЛС-М предназначена для приема цифровых информационных

потоков со скоростью до 2,5 Гбит/с одновременно по шести

высокоскоростным линиям с вводом информации в ПК.



ЯЧЕЙКА ПИВОЛС-МВ

ЯЧЕЙКА ПИВОЛС-М

Основные технические характеристики высокоскоростных ячеек

Параметр	ПИВОЛС-МВ	ПИВОЛС-М	
Скорость приема информации, Гбит/с	до 32	до 16	
Тип интерфейса связи ПК	PCI Express 2.0 x8	PCI Express 2.0 x4	
Мощность потребления, Вт	не более 15		
Диапазон рабочих температур, °С	от +5 до +40		
Назначенный ресурс, ч	20 000		
Комплект ПО	драйвер для 64-х разрядной ОС Windows 7		

4. ГЕРМЕТИЧНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ СОЕДИНИТЕЛЬ (ВОС-ВГ) предназначен для передачи информации по волоконно-оптической линии связи. ВОС-ВГ устанавливается в отверстие отсека (блока), разделяющее герметичный и негерметичный объёмы. Возможно исполнение с одномодовым или многомодовым волокном. На герметичный волоконно-оптический соединитель типа ВОС-ВГ получен Патент РФ № 2572661.



Основные технические характеристики высокоскоростных ячеек

Параметр	Значение
Герметичность, (л×мкм рт. ст.)/с	10-6
Тип соединения	FC, Ø 2,5мм
Прямые оптические потери, дБ	не более 1,0
Обратные оптические потери, дБ	не менее 40
Габаритные размеры, мм	42x22x19
Масса, г	15
Материал	Титан (ВТ-16)
Диапазон рабочих температур, °С	от -50 до +80
Предельная температура, °С	от -60 до +85
Назначенный ресурс, ч	55 000

В настоящее время специалистами НПП «ОПТЭКС» активно ведутся работы по расширению номенклатуры бортовых компонентов ВОЛП в комплексе с отработкой технологических процессов изготовления прецизионных деталей и сборки узлов. Проведена разработка и изготовление бортовых импульсных приемных и передающих модулей, предназначенных для измерения временных интервалов. Разрабатывается прецизионная оснастка для сборки компонентов ВОЛП и автоматизированные рабочие места (АРМ), для проверки основных параметров изготавливаемых изделий непосредственно в процессе их производства. Возможна поставка представленных компонентов ВОЛП, а также разработка новых изделий в соответствии с требованиями заказчика.

> 124460, г. Москва, Зеленоград, ул. Конструктора Гуськова, д. 8, стр. 2 тел. 8 (917) 510 - 47- 00, 8 (499) 734 - 94 - 93, 8 (499) 735 - 54 - 33, факс: 8 (499) 734 - 22 - 22, e-mail: optecs@samspace.ru

ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЫПУКЛЫХ ГИПЕРБОЛОИДОВ

СЕМЕНОВ А.П., ПАТРИКЕЕВ В.Е., *ПУРЯЕВ Д.Т., *ДРУЖИН В.В.

АО «Лыткаринский завод оптического стекла» (АО ЛЗОС) *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

E-mail: lastro@lzos.ru, vlad.druzhin@gmail.com

Аннотация: Интерферометр содержит лазерный осветитель и объектив в осветительной ветви, светоделительный кубик, оптические узлы эталонной и рабочей ветви, анализатор формы волнового фронта в регистрирующей ветви. Над контролируемой поверхностью выпуклого гиперболического зеркала установлена менисковая концентрическая линза меньшего, чем зеркало, габарита, при этом центры кривизны сферических поверхностей линзы совмещены с мнимым геометрическим фокусом гиперболического фокуса.

Таким образом, появляется возможность контроля формы экстремально больших выпуклых гиперболических зеркал телескопов диаметром более двух метров.

Ключевые слова: интерферометр, оптический контроль, изготовление оптики, асферические зеркала.

INTERFEROMETER FOR TESTING OF CONVEX HYPERBOLOID

ALEKSANDR P. SEMENOV, VLADIMIR E. PATRIKEEV, DANIIL T. PURYAEV*, VLADISLAV V. DRUZHIN*

JSC "Lytkarino Optical Glass Factory" *N. E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow

E-mail: lastro@lzos.ru, vlad.druzhin@gmail.com

Abstract: Interferometer contains laser illuminator and objective in the lighting branch, beam splitting cube, optical nodes of the reference and working branches, waveform analyzer in the recording branch. Meniscus concentric lens is mounted above the controlled surface of the convex hyperbolic mirror. Centers of curvature of the spherical surfaces of the lens are combined with the imaginary geometric focus of the hyperbolic mirror surface. Lens has the ability to rotate around the imaginary focus of the monitored mirror. Thus, it is possible to testing the shape of extremely large convex hyperbolic mirrors with a diameter of more than 2 m.

Keywords: iinterferometer, optical testing, optical fabrication, aspherical mirrors.

ВВЕДЕНИЕ

Все возрастающие требования к контролю крупногабаритной оптики и рост габаритов астрономических зеркал приводят к необходимости создания новых интерферометрических средств, которые бы позволяли выполнять оптический интерферометрический контроль таких поверхностей. Особую категорию составляют средства контроля выпуклых поверхностей, и, в частности, выпуклых гиперболоидов. Для контроля выпуклых гиперболических зеркал применяются различные оптические схемы [1], которые в основном рассчитаны на создание такой схемы контроля, в которой с помощью вспомогательной оптики, как правило, большей по диаметру, чем контролируемое зеркало, создается волновой фронт, отражающийся от выпуклого гиперболоида и возвращающийся в интерферометр. Все это обусловлено тем, что от выпуклого гиперболоида идет расходящийся пучок, и его необходимо отразить от вспомогательной оптики и вернуть назад.

Одной из распространенных схем контроля выпуклых гиперболоидов является схема со сферой Хиндла, в которой расходящийся волновой фронт от гиперболоида отражается от вспомогательной сферы и возвращается назад, повторно отразившись от гиперболоида [2]. Другой распространенный способ - контроль с помощью вспомогательной линзы Физо с асферической эталонной поверхностью, соответствующей контролируемой, так, например, изготавливались вторичные зеркала для 8-метровых телескопов VLT (Very Large Telescope) и GEMINI [3,4]. Но возрастающие габариты вторичных зеркал, например выпуклых вторичных зеркал сверхбольших телескопов ELT (Extremely Large Telescope) и TMT (Thirty Meter Telescope) диаметром 4250 мм и 3110 мм соответственно, не позволяют изготовить сферы Хиндла или линзы Физо огромных размеров, поэтому необходимы другие способы контроля таких зеркал, позволяющие решить данную задачу.

Один из способов решения контроля вторичных зеркал был реализован в АО ЛЗОС – это контроль выпуклых гиперболоидов с использованием двух сфер Хиндла. Контролируются внешняя и внутренняя часть выпуклого гиперболоида и затем, использую общую зону контроля, выполняется построение суммарного волнового фронта методом переналожения [5,6].

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Ближайшим аналогом разработанного интерферометра является интерферометр для контроля качества выпуклых крупногабаритных гиперболических зеркал телескопов Кассегрена, разработанный Пуряевым Д.Т. [7] (рис. 1). Интерферометр состоит из лазерного осветителя, объектива, светоделительного кубика и наблюдательного регистрирующего устройства, оптических узлов эталонной и рабочей ветвей, причем рабочая ветвь содержит сплошную менисковую линзу с равными радиусами сферических поверхностей, при этом центр кривизны вогнутой поверхности линзы совмещен с мнимым геометрическим фокусом





контролируемого зеркала, а изображение источника света расположено в переднем фокусе выпуклой поверхности линзы. Вогнутая поверхность линзы имеет полупрозрачное зеркальное покрытие, поэтому линза выполняет функцию эталонного зеркала в интерферометре-аналоге, но не имеет центрального отверстия, что исключает основные недостатки, а именно невозможность проверить центральную зону гиперболоида. Менисковая линза имеет равные радиусы и поэтому не позволяет контролировать разные зоны поверхности контролируемого зеркала за счет ее вращения или перемещения вокруг контролируемого зеркала. Поэтому менисковая линза должна иметь такой же диаметр, что и проверяемое изделие, и это приемлемо для сравнительно малых диаметров зеркал. При контроле зеркал телескопов экстремально больших диаметров (свыше 2-х метров) это создаёт практически непреодолимые трудности.

Задача заключается в создании интерферометра для контроля формы экстремально больших выпуклых гиперболических зеркал.

Поэтому основная особенность нового интерферометра, менисковая линза выполне-



Рисунок 2. Общая схема интерферометра

на концентрической, меньшего, чем зеркало, габарита, при этом центр кривизны ее сферических поверхностей совмещен с мнимым геометрическим фокусом гиперболической поверхности зеркала, кроме того линза имеет возможность вращения вокруг мнимого геометрического фокуса.

Выполнение менисковой линзы сравнительно малого диаметра и её вращение вокруг мнимого фокуса позволяет по дискретно полученным интерферограммам сделать заключение о качестве всей формы зеркала.

Общая схема интерферометра представлена на рис. 2.

Интерферометр состоит из следующих основных узлов: осветительной ветви, включающей лазерный осветитель 1 и объектив 2, светоделительного кубика 3 с полупрозрачной гипотенузной гранью, оптических узлов эталонной ветви со сферическим зеркалом 4 и рабочей ветви, в которой помещены измеряемое зеркало 5 с выпуклой гиперболической поверхностью и над ней – менисковая линза 6, значительно меньшего, чем зеркало, диаметра с концентрическими сферическими поверхностями, обращенными вогнутостью к зеркалу. Указанные ветви расположены по трем граням кубика 3, как это изображено на чертеже. Со стороны четвертой грани в наблюдательно-регистрирующей ветви расположено наблюдательно - регистрирующее устройство (анализатор формы волнового фронта) 7, включающее объектив сопряжения 8 и приемник излучения 9, в качестве которого могут выступать фотокамера, ПЗС – приемник, видеокамера и т.п. В варианте исполнения интерферометр располагается относительно контролируемого зеркала 5 таким образом, чтобы действительный фокус F, гиперболической поверхности зеркала находился перед светоделительпым кубиком 3. Концентрическая линза 6 должна располагаться над зеркалом 5 таким образом, чтобы центры кривизны С1 и С2 ее сферических поверхностей с радиусами R₁ и R₂ были совмещены с мнимым фокусом F₂ гиперболической поверхности зеркала, при этом линза 6 имеет возможность вращения вокруг этого мнимого фокуса F₂ с тем, чтобы располагаться

над любым участком контролируемой поверхности. Средство вращения линзы, как и самого зеркала, может быть любым, например, электродвигатель. При диаметре зеркала от 2 до 4 м диаметр линзы может быть в пределах от 0.6 до 1 м.

Интерферометр действует следующим образом. Монохроматический световой пучок, выходящий из лазера 1, фокусируются объективом 2 в точку действительного фокуса F, контролируемой поверхности, сферический волновой фронт проходит через светоделительный кубик 3 и делится на два волновых фронта, один из них идет в эталонную ветвь к зеркалу 4, а другой в рабочую ветвь на контролируемую поверхность зеркала 5, проходя через концентрическую линзу 6, падает по нормали и отражается от контролируемой поверхности, далее отражается от внутренней поверхности концентрической линзы 6 и возвращается по тому же пути в светоделительный кубик 3, отражаясь от грани которого направляется в объектив регистрирующей ветви интерферометра, где интерферирует с волновым фронтом эталонной ветви, проходящим через тот же объектив, интерференционная картина регистрируется анализатором волнового фронта. Регистрируется полученная интерферограмма, содержащая погрешности формы контролируемого зеркала. Далее поворачивают контролируемую поверхность вокруг оптической оси, снова фиксируют интерферограмму. Таким образом, получают серию интерферограмм, которые покрывают всю поверхность и имеют общие области, с помощью которых можно построить общую карту волнового фронта всей поверхности, используя метод переналожения.

В частном случае, для сравнительно малых диаметров контролируемой поверхности, концентрическая линза позволяет проверить всю поверхность за один приём. При этом целесообразно выполнить концентрическую линзу практически афокальной, имеющей радиусы первой и второй поверхностей R_1 и R_2 , которые связаны соотношением: d = n (R_1 - R_2)/(n-1), где n – показатель преломления линзы, a d – толщина линзы вдоль оптической оси. В варианте исполнения оптическая сила линзы равна нулю.

В качестве примера в таблице 1 приведены конструктивные параметры схемы для контроля формы выпуклого гиперболоида вторичного зеркала M2 телескопа ELT (Extremly Large Telescope – Экстремально Большой Телескоп). Световой диаметр D_{cs} = 4155 мм, радиус кривизны при вершине R_0 = 8810 мм, коническая константа k = - 2.208857 с учетом коэффициента деформации a_2 =-5.198196E-16, в двойном ходе лучей. Диаметр линзы в расчетах 2060 мм и толщина линзы 40 мм. Фактический размер линзы может быть 600-1000 мм. На рис. 3 и 4 также приведены:

- остаточные волновые аберрации W относительно P_{x} и $\mathsf{P}_{\mathsf{y}};$

- трехмерное представление формы волнового фронта в двойном ходе в плоскости анализа.

Таким образом, интерферометр промышленно применим.

Таблица 1.

Конструктивные параметры оптической схемы в двойном ходе лучей интерферометра для контроля формы деформированного выпуклого гиперболоида M2-ELT

	Surf:Type	Radius	Thickness		Materia	I	Semi-Diameter	Conic	Par 1(unused)	Par 2(unused)
0	OBJECT Standard 🔻	Infinity	-536.8811943				0.0000000	0.0000000		
1	Standard 🔻	1475.4000000	15708.5385484	V	MIRROR		250.0044424	0.0000000		
2	Standard 🔻	4090.0000000	40.0000000		LZ_K8		2060.2050810	0.0000000		
3	Standard 🔻	4050.0000000	516.6854855	V			2054.8502671	0.0000000		
4	STOP (a Even Asphere 🔻	8810.0000000	-516.6854855	Ρ	MIRROR		2077.5000000 U	-2.2088570	0.0000000	-5.1981960E-16
5	Standard 🔻	4050.0000000 P	516.6854855	Ρ	MIRROR		2161.2699761	0.0000000		
6	Even Asphere 🔻	8810.0000000 P	-516.6854855	Ρ	MIRROR		2077.4997371	-2.2088570 P	0.0000000	-5.1981960E-16 F
7	Standard 🔻	4050.0000000 P	-40.0000000	Ρ	LZ_K8	Ρ	2054.8496335	0.0000000		
8	Standard 🔻	4090.0000000 P	-15708.5385484	Ρ			2060.2044046	0.0000000		
9	Standard 🔻	1475.4000000 P	536.8811943	Ρ	MIRROR		249.9759805	0.0000000		
10	IMAGE Standard 🔻	Infinity	-				6.9627973E-03	0.0000000		



Рисунок 3. Остаточная волновая аберрация в двойном ходе



Рисунок 4. Трехмерное представление формы волнового фронта в двойном ходе в плоскости анализа

Список литературы:

1. Зверев В.А., Соболев К.Ю., Цуканова Г.И. Контроль формы выпуклых несферических поверхностей вращения// Оптический журнал. – 1996, № 12. - С. 12-19.

2. Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P., Belousov S.P., Pridnya V.V., Patrikeev V.E., Ignatov A.N., Polyanchikov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A., «M2 secondary mirror manufacturing for VISTA project,»Proc SPIE **7018**, 70180B (2008).

3. *Geyl, R., Cayrel, M.,* "The VLT secondary mirror: a report", Proc. SPIE 10289, Advanced Materials for Optics and Precision Structures: A Critical Review, 102890L (1997).

4. Otto, W., "Testing of the Gemini secondary mirror," Proc. SPIE **3739**, 325-329 (1999).

5. *Semenov, A.P.*, "Accomplished the task of production of the primary and secondary mirrors of Devasthal Optical Telescope under the project ARIES (India, Belgium, Russia): fabrication features," Proc SPIE, **8450**, 84504R-1 – 84504R-14 (2012).

6. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Sharov Y.A., "Manufacturing of secondary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST, "Proc SPIE **4451**, 138-144 (2001).

7. А.с. 523274. Интерферометр для контроля качества выпуклых гиперболических зеркал телескопов Кассегрена/ Д.Т. Пуряев (СССР); Опубл. 30.07.1976, Бюл. № 28.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА И МЕТОД КОНТРОЛЯ АСТРОНОМИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА С ГИПЕРБОЛИЧЕСКИМ ПРОФИЛЕМ ПОВЕРХНОСТИ – «М1»

ВИНОГРАДОВ М.А., ДЕНИСОВ Д.Г., *ПАТРИКЕЕВ В.Е., *СЕМЕНОВ А.П.

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва *АО «Лыткаринский завод оптического стекла», Московская обл., г. Лыткарино

E-mail: lastro@lzos.ru

Аннотация: В работе рассмотрен технологический процесс изготовления и метод контроля крупногабаритной поверхности проектируемого главного зеркала M1, предназначенного для телескопа DAG (Турция). Особенностями данного зеркала являются существенные габариты и асферический профиль поверхности. В работе представлены наиболее важные операции технологического процесса, такие как установка опор для пневмомеханической разгрузки зеркала, шлифование ближайшей сферы сравнения и процесс асферизации поверхности зеркала. Рассмотрена функциональная схема аттестационного контроля на основе оптической системы интерферометра с дифракционным оптическим элементом (ДОЭ).

Ключевые слова: оптический материал, технологический процесс, интерференционный контроль, астрономический телескоп, астрономическое зеркало.

введение

Научно-технические достижения в области астрономии, космической и лазерной техники в значительной степени стали возможными благодаря появлению перспективных оптических наземных и космических систем. Важнейшей частью современного высокоточного телескопа является асферическое зеркало, выполняющее его основную функцию. К качеству оптической поверхности зеркала предъявляются высокие требования. Площадь зеркала исчисляется квадратными метрами, а форма его поверхности должна быть выражена с точностью до сотых долей микрометра. Поэтому возникает необходимость контроля деформаций зеркала в процессе изготовления, а также использование усовершенствованных технологий формообразования, в том числе автоматизированные способы доводки поверхностей.

Целью данной работы является разработка технологического процесса изготовления зеркала с гиперболическим профилем.

К материалам астрономических зеркал предъявляются жесткие требования, обусловленные допусками на поверхности зеркала, условиями эксплуатации и габаритами таких зеркал:

- близкий к нулю коэффициент термического линейного расширения (КТЛР);

- малая плотность.

Важно отметить, что материала, который полностью бы отвечал этим требованиям, не существует. Однако, существует материал, наиболее подходящий для таких задач – стеклокристаллические материалы. Их преимущества: высокая изотропность, стабильность, близкий к нулю КТЛР, относительно малая плотность, высокая механическая прочность, доступная цена. В настоящее время наиболее востребованными материалами для производства астрозеркал являются Астроситалл и Zerodur [1].

1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Стеклокристаллический материал Zerodur с низким КТЛР выпускается в Германии компанией Schott (российским аналогом является Ситалл, выпускаемый в АО «ЛЗОС»). Материал широко используется для изготовления астрономических и космических зеркал телескопов. Низкий КТЛР позволяет применить его в областях, где недопустимо влияние температурных колебаний на линейные размеры конструкционных элементов.

Характеристики материала Zerodur приведены в табл. 1.

Рассмотрим наиболее ответственные технологические операции создания главного зеркала астрономического телескопа DAG с требуемыми показателями качества. Чертеж зеркала показан на рис. 1.

2. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

2.1. Установка зеркала на станок КУ-1540Ф4 для приклейки интерфейсных элементов.

На первоначальном этапе к тыльной поверхности зеркала и к боковой приклеиваются интерфейсные элементы системы разгрузки зеркала. Для этого оно базируется и центрируется на специальном технологическом приспособлении на станке КУ-1540Ф4.

Таблица 1. Основные свойства материала Zerodur

0.00967
91
2.53
0.24
0.82
1.46
600
0.05±0.10 x10 ⁻⁶



Рисунок 1. Чертеж зеркала М1



Рисунок 2. Эскиз операции установки зеркала на приспособление для приклейки элементов разгрузки

Эскиз операции показан на рис. 2.

Этот станок не используется по своему прямому назначению (фрезеровка), а используется способность шпинделя данного станка перемещаться по заданным координатам.

К тыльной и боковой поверхности зеркала приклеивается специальная вспомогательная оснастка на наклеечную смолу, оснастка центрируется на координатном станке (рис. 3). Затем выполняется операция приклейки инваровых элементов и вспомогательная оснастка устраняется.

После операции приклеивания интерфейсных элементов зеркало кантуется для установки на мембранно-пневматическую оправу с использованием кантователя (рис. 4).

Данное зеркало имеет сравнительно малую толщину по оси (140 мм), в связи с чем оно обрабатывается и эксплуатируется в специальной системе разгрузки (рис. 5), представляющую собой конструкцию из 6 боковых зажимов, 6 вертикальных опор и 66 мембранно-пневматических опор.

Последние компенсируют деформации зер-





Рисунок 3. Установка вспомогательной оснастки для приклейки интерфейсных элементов разгрузки на заднюю поверхность (наверху) и на боковую поверхность (внизу)



Рисунок 4. Кантователь для манипуляций с зеркалом

кала. 6 вертикальных опор используются при формообразующих операциях, пневматические же опоры используются только на этапах контроля. Зеркало устанавливается на мембраны приклеенными инваровыми интерфейсными элементами.

Далее заготовка на технологической разгрузке поступает на станок КУ274.



Рисунок 5. Эскиз заготовки в технологической разгрузке (наверху), пневмомеханические опоры разгрузки (внизу)



Рисунок 6. Эскиз изготовления ближайшей сферы сравнения

2.2. Шлифование ближайшей сферы сравнения на станке КУ-274.

Эскиз процесса представлен на рис. 6.

На стол станка КУ-274 поступает заготовка, закрепленная в разгрузке. Соответствующая эквивалентная схема базирования представлена на рис. 7.





Рисунок 7. Эквивалентная схема базирования заготовки в технологической разгрузке



Рисунок 8. Инструмент для формирования ближайшей сферы сравнения

Для шлифовки сферического профиля используются шлифовальные круги различных диаметров (от 2 м до 0.5 м) с латунными вставками (рис. 8), а также микропорошки М40, М28, М14, М10. Инструмент имеет радиус кривизны, соответствующий радиусу ближайшей сферы.

Далее выполняется асферизация поверхности методом шлифования с контролем линейными трехточечными сферометрами. Асферизация производится малоразмерными инструментами (100-400 мм)С латунными вставками, а затем органикой. Далее выполняется процесс полирования.



Рисунок 9. Эскиз операции доводки асферической поверхности

2.3. Доводка асферической поверхности на станке АД-4000.

Эскиз процесса представлен на рис. 9.

После предварительной асферизации на станке КУ-274 зеркало устанавливается на стол станка АД-4000 в технологической разгрузке. Выполняется интерферометрический контроль и строится топографическая карта поверхности. Полученную топографическую карту в виде массива данных высотных параметров профиля в заданной системе координат вносят программно в качестве исходных данных для расчета съема материала и траектории движения инструмента в соответствии с формулой Престона:

$$h_{y} = k P_{y} V_{y} S_{y} T_{y}$$
(1)

где P_y – давление инструмента; V_y – относительная скорость (скорость изделия относительно инструмента); S_y – коэффициент покрытия; T_y – время обработки; k – коэффициент, учитывающий марку стекла, состав абразивного или полирующего порошка, материал инструмента, температуру.

Таким образом, в зависимости от положения инструмента на заготовке он будет производить съем материала в течение определенного времени, формируя асферический профиль поверхности. Требуемая асферичность составляет 168.7 мкм.

3. КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ.

Контроль производится интерферометрическим методом с помощью интерферометра с использованием дифракционного оптического элемента (ДОЭ), корректора на длине волны λ = 632.8 нм (рис. 10) [3,4,5]. Для аттестации корректоров волнового фронта использует-



Рисунок 10. ДОЭ-корректор для контроля волнового фронта зеркала

ся ДОЭ-имитатор зеркала. Фото корректора и имитатора приведены на рис. 11.

Интерференционная картина регистрируется ПЗС-камерой с 1024'1024 элементов. Зафиксированная интерферограмма подвергается математической обработке с последующим расчетом всех параметров настройки и ошибок поверхности и построением карты волнового фронта.

Аттестация ДОЭ-корректора и ДОЭ-имитатора выполняется путем контроля записи на приборе (Independent certification of the writing process). Интерферометр с корректором аттестуется с ДОЭ-имитатором и тем самым может быть учтена и вычтена собственная ошибка интерферометра из контролируемого волнового фронта.



Рисунок 11. ДОЭ-корректор и ДОЭ-имитатор волнового фронта для зеркала DAG M1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены наиболее ответственные технологические операции разработки крупногабаритного асферического зеркала с величиной асферичности 168.7 мкм. Рассмотрена специфика обработки асферического профиля на элементах конструкции разгрузки. Представлен метод контроля формы поверхности зеркала.

Список литературы

1. ZERODUR[®] Extremely Low Expansion Glass Ceramic [Электронный ресурс]: http://www.schott. com/advanced_optics/english/products/opticalmaterials/zerodur-extremely-low-expansion-glassceramic/zerodur/index.htm

2. Заказнов, Н.П., Горелик В.В., Изготовление асферической оптики. – М.: Машиностроение, 1978 г.

3. *Semenov, A.P.,* «Accomplished the task of production of the primary and secondary mirrors of Devasthal Optical Telescope under the project ARIES (India, Belgium, Russia): fabrication features,» Proc SPIE, 8450, 84504R-1 – 84504R-14 (2012).

4. *Poleshchuk, A.G.*, «Fabrication and application of diffractive optical elements,» Proc. SPIE 7544, 75443L-1 - 75443L-12 (2010).

5. [7] *Poleshchuk, A.G.*, «Computer generated holograms for aspheric optics testing,» Proc. SPIE 7133, 713333-1 - 713333-9 (2009).

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА И МЕТОД КОНТРОЛЯ АСФЕРИЧЕСКОГО АСТРОНОМИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА С ОБЛЕГЧЁННОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ

ПОЛЯНСКИЙ В.В., ДЕНИСОВ Д.Г., *ПАТРИКЕЕВ В.Е., *СЕМЕНОВ А.П.

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва *АО «Лыткаринский завод оптического стекла», Московская обл., г. Лыткарино

E-mail: lastro@lzos.ru

Аннотация: В работе рассмотрен технологический процесс изготовления и метод контроля астрономического облегченного зеркала с параболической рабочей поверхностью. Особенностью зеркала является изготовление ячеек структуры облегчения, что позволяет значительно снизить массу изделия и высокая асферичность зеркала. Были выделены наиболее важные операции технологического процесса такие, как изготовление центрального отверстия, ячеек облегчения, сферической поверхности зеркала, а также асферизация и доводка асферической поверхности. Для аттестационного контроля параметров формы асферической поверхности использовался интерферометр ИКАП-2 со вспомогательным плоским зеркалом.

Ключевые слова: оптический материал, технологический процесс, ближайшая сфера сравнения, интерференционный контроль.

введение

В настоящее время одним из важных направлений в оптических технологиях является создание крупногабаритных астрономических изделий с облегчённой конструкцией для получения изображения высокого качества в процессе активного динамического быстрого ведения телескопа.

С этой целью в данной работе разработан технологический процесс изготовления крупногабаритного зеркала с параболическим профилем.

К материалам для астрономических зеркал предъявляются серьезные требования, которые обусловлены жёсткими допусками на соответствие поверхности зеркала расчётной форме: близкий к нулю коэффициент термического линейного расширения (ТКЛР); высокий класс шероховатости; малая плотность.

Благодаря высокой изотропности, стабильности, близкому к нулю ТКЛР и доступной цене, стеклокерамика является наилучшим материалом для изготовления заготовок для астрономических крупногабаритных зеркал. В настоящее время одним из наиболее популярных материалов для изготовления крупногабаритной оптики является ситалл CO-115M (астроситалл) [1].

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Стеклокристаллический материал астроситалл с низким коэффициентом термического линейного расширения (КТЛР) выпускается на Лыткаринском заводе оптического стекла (ОА ЛЗОС). Материал широко используется для изготовления астрономических и космических зеркал телескопов, а также для оптических установок с зеркалами, имеющими низкий коэффициент теплового расширения.

Ситалл (аббревиатура характеризует химический состав данного материала) СО-115М - стеклокристаллический материал с низким коэффициентом термического линейного расширения. Отличительные особенности данного материала: технологичность выработки и последующей обработки заготовок; коэффициент теплового расширения (ТКЛР) близкий к нулю в широком диапазоне температур; малая плотность; стабильность свойств и размеров во времени. Все это позволяет применять его в областях, где недопустимо влияние температурных колебаний на линейные размеры конструкционных элементов. Термическая устойчивость астроситалла позволяет изготавливать зеркала высочайшей степени точности за гораздо более короткое время обработки, поскольку измерения можно производить, не дожидаясь достижения термического равновесия. Основные свойства материала CO-115M приведены в таблице 1 [1].

Основным оборудованием для производства материала CO-115М являются трубчатая вращающаяся печь, шаровая мельница, ванная регенеративная стекловаренная печь [2].

Производство ситалла CO-115М в ОА ЛЗОС в настоящее время осуществляется по традиционной для стекловарения технологии, включающей в себя следующие стадии: расчет шихты, на основании которой составляется сырьевая смесь; подготовка сырьевых компонентов, входящих в состав СО-115М и возвратного стеклобоя; варка стекла из шихты; формование стекломассы; термообработка – совместный отжиг и ситаллизация изделий; контроль качества полученных заготовок. После контроля качества заготовки направляются на обработку в соответствии с требованием заказчика [2].

Рассмотрим наиболее ответственные технологические операции, лежащие в основе изготовления крупногабаритного астрономического зеркала из CO-115M, представленного на рис. 1.

Таблица 1.	
Основные свойства ситалла СО-	115M

Температура варки	1580 °C	
Способ формования	Питье	
Средний ТКЛР в диапазоне температур от -60 °С до + 60 °С, (К ⁻¹)	$\pm 0.2 \div \pm 1.5 \text{ x10}^{-7}$	
Плотность, (г/см ³)	2,46	
Жаропрочность под нагрузкой, °С	930	
Температура текучести, °С	1100	
Однородность заготовок по ТКЛР, α ·10 ⁻⁷ град ⁻¹	0,05 ÷ 0,2	
Химическая устойчивость: к влажной атмосфере кислотоустойчивость	A1	



Рисунок 1. Чертёж асферического зеркала

ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ ТЕХНОЛОГИ-ЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА АСТРОНОМИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА

Исходная заготовка после обработки плоских сторон поступает на операцию изготовления центрального отверстия.

1. Изготовление центрального отверстия на станке 2Д-450 (рис. 2).



Рисунок 2. Эскиз операции изготовление центрального



Рисунок 3. Установка «лыж» (вид сверху)



Рисунок 4. Высверливание центрального отверстия

Центрирование заготовки. На стол станка 2Д-450 устанавливаются направляющие (в количестве 4 штук) (рис. 3). К внешнему краю зеркала устанавливается индикатор длч определения биения зеркала, далее зеркало вращают на столе, периодически останавливая и проверяя показания индикатора. Операция повторяется несколько раз для точной установки заготовки по центру стола.

Для изготовления отверстия используют алмазное сверло меньше указанного диаметра отверстия на чертеже (205 мм). Центрируют инструмент, привязывая координаты станка к координатам стола. Далее, установив сверло на нужный диаметр равный – удвоенному припуску 1-2 мм, производится «осверловка» отверстия по его контуру как это показано на рис. 4 по траектории «ромашка».

После высверливания отверстия при помощи фасонной фрезы (имеет форму глубокой тарелки) делают фаски внутри отверстия, указанные на исходном чертеже (см. рис. 1. – чертёж зеркала).

2. Изготовление ячеек облегчения на станке 2Д-450 (рис. 5.)

Для телескопов космического базирования главное сферическое зеркало должно быть как можно более легким и в то же время обеспечивать требования по жесткости конструкции, чтобы сохранить достигнутое оптическое качество на рабочей поверхности зеркала. Для эффективного облегчения сферического зеркала используют ячейки облегчения, изготавливая их с нерабочей поверхности детали. Ввиду этого существуют критерии расчёта ячеек облегчения [3].



Рисунок 5. Эскиз операций изготовление структуры ячеек облегчения

Критерии расчёта облегчения: максимально облегчить оптическую деталь; сохранить дифракционные характеристики оптического изображения.

Различают три вида ячеек облегчения: круглые – предназначены для размещения зеркала на стенде контроля; треугольные – являются одной из самых устойчивых структур; шестиугольники – структура, обеспечивающая больший съём материала.[3]

Толщина стенок между ячейками берётся не менее 4-5 мм. Данный диапазон является оптимальным с точки зрения прочности изготавливаемых стенок отверстий. На рис. 6 показана фотография внешнего вида сверла для изготовления ячейки облегчения.

Для создания отверстий, облегчающих массу, сверло проходит по периметру по специальной программе. После прохождения сверлом на поверхности остаются засечки по граням и на дне формы. Их удаляют фрезой. После то, что осталось на дне вымывают с помощью плавиковой кислоты (HF).

В соответствии с предварительным расчётом ближайшего радиуса сферы сравнения производится её изготовление на станке 2Д-450 (рис. 7).

Цилиндрической фрезой ступеньками снимают слой материала. Таким образом, чтобы ступеньки имели минимальный шаг, менее 0.5 мм и далее ступеньки устраняются в процессе шлифования на станке ПД-1000.

Всё происходит по заданной в станке программе в автоматизированном режиме.

Далее изделие поступает на этап асферизации, производимый на станке СПА-1500 (рис. 8).

Асферичность зеркала 230 мкм, поэтому асферизация его выполнялась методом шлифования. При этом контроль выполнялся набором линейных сферометров по зонам зеркала. Затем поверхность зеркала полировалась. Финишная доводка осуществлялась на станке АД с программным управлением.

В настоящее время при формообразовании поверхностей крупногабаритных деталей все чаще применяются автоматизированные системы, что обусловлено повышением требований к точности их поверхностей и все более



Рисунок 6. Фотография внешнего вида сверла



Рисунок 7. Эскиз операции изготовления сферической поверхности



Эскиз операции асферизации поверхности

широким использованием в оптических приборах внеосевых сегментов и деталей с нетрадиционной конфигурацией наружного периметра (шестиугольники и т.д.), изготовление которых классическим способом крайне затруднительно. Составной частью программного обеспечения при автоматизированной обработке является подпрограмма расчета траектории движения малого инструмента по обрабатываемой поверхности. От того, каким образом определяется траектория движения инструмента, зависит диапазон функциональных возможностей автоматизированной системы.

Алгоритм программы станка АД предусматривает объективное представление оптической поверхности в виде квадратной сетки с элементарными площадками размером d×d показанной на рис. 9. Узлы квадратной сетки расположены в серединах площадок. Границы детали и отверстий описываются эллиптическими экранами. Каждый эллипс определяется координатами центра, величинами полуосей, углом поворота большой оси эллипса относительно оси Х и типом экрана – внутренним или внешним. Введение таких экранов позволяет описать практически любую конфигурацию края оптической детали и отверстий, во всяком случае, все применяемые в настоящее время типы деталей.



Рисунок 9. Пример схемы квадратной сетки

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ КОНТРОЛЬ-НО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Прибор контроля

Интерферометры – одни из самых точных измерительных приборов, использующих принцип интерференции световых волн, с учётом фазовых соотношений между ними. При изготовлении современных оптических систем требуется контролировать форму поверхностей (пластин, зеркал и линз) с точностью до единиц и даже долей нанометра. При этом площадь контролируемой поверхности может составлять несколько десятков квадратных метров. Интерферометр должен формировать карту трехмерной оптической поверхности без дисторсии, независимо от того, является ли поверхность плоской, сферической или асферической [4]. В данном случае используется интерферометр ИКАП-2, разработанный по схеме интерферометра Тваймана – Грина, совместно с эталонным плоским зеркалом. Функциональная схема интферометра ИКАП-2 представлена на рис. 10.

Лучи света, идущие из гелий-неонового лазера (1) с длиной волны 632.8 нм, фокусируются линзой (2) в отверстие диафрагмы (3), установленной в заднем фокусе объектива (4). Элементы (2) и (4) образуют афокальную систему Кеплера, которая служит для расширения пучка и уменьшения его расходимости. Диафрагма (3) с малым отверстием в центре и служит для формирования сферического волнового фронта и устранения вредного фона. Параллельный пучок лучей, выходящий из объектива, поступает на плоскопараллельную пластинку (5), установленную под углом 45 градусов к оси, и разделяется на 2 пучка. Один из них идет в эталонную ветвь, в которой установлено плоское зеркало (9), другой - в рабочую ветвь, в которой расположен объектив (6), эталонное плоское зеркало (7) и контролируемое асферическое зеркало (8). Для прохождения пучка лучей, идущих из объектива (6), плоское зеркало имеет отверстие в центре.

Волновой фронт, выходящий из рабочей ветви, интерферирует с плоским волновым фронтом, идущим из эталонной ветви. По возникающей интерференционной картине определяют погрешности контролируемой поверхности. Поскольку лучи света дважды отражаются от контролируемой асферической поверхности, то погрешности поверхности учетверяются.

Оптическая система камеры (11) переносит интерференционную картину в плоскость ПЗСматрицы. Если исследуемое зеркало имеет дефекты геометрии, то это проявится в искривлении интерференционных полос.

В процессе обработки полированием при помощи интерференции проводится диагностика качества поверхности.

На основе представленной функциональной схемы (см. рис. 10) в работе разработаны узлы конструкции стенда контроля (рис. 11-14).



Рисунок 10. Функциональная схема интерферометра ИКАП-2



Рисунок 11. Крепление плоского зеркала в ленте подвеса





Рисунок 13. Контроль параболоида с плоским зеркалом



Рисунок 14. Контроль параболоида с плоским зеркалом

Описание элементов конструкции

С целью минимального пережатия корпуса зеркала и, как следствие, во избежание искажений оптического изображения эталонное плоское зеркало устанавливается на ленте подвеса, которая показана на рис. 11.

Контролируемое зеркало устанавливается в специальную оправу с разгрузками (рис. 12). Ее назначение – создание условий максимально приближенных к штатной разгрузке зеркала и имитации невесомости для космического зеркала. Для этого определяют реальную высоту каждой опоры путем их последовательного нагружения расчетной внешней нагрузкой.

На основании всего вышеперечисленного проектируется конструктивный облик стенда контроля (рис. 13, 14).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были получены и проанализированы следующие результаты: рассмотрены наиболее важные технологические этапы формообразования, обработки и облегчения конструкции зеркала на производственной площадке АО ЛЗОС; рассмотрены и проанализированы функциональная схема и конструктивный облик стенда контроля, основные параметры волнового фронта, изготавливаемого зеркала.

Список литературы:

1. Самуйлов А.В., Румянцев В.В., Молев В.И., Аннушкин С.И. Физико-химические свойства оптического ситалла CO-115М // Контенант. 2002 г. №4 – 24-31 с.

2. Крехова Е.Ю., Кошков С.В., Храмогин Д.А. Производство стеклокристаллических материалов на АО ЛЗОС: вчера, сегодня, завтра // Контенант. 2017 г. №3 – 53-57 с.

3. Абдулкадыров М.А. Технология изготовления высокоточных крупногабаритных облегчённых асферических зеркал с высокой стабильностью формы поверхности – ЛЗОС, 2014 г.

4. *Малакара Д.* Оптический производственный контроль – М.: Машиностроение, 1985 г. – 400 с.



СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ

ВВЕДЕНСКАЯ А.В., ВВЕДЕНСКИЙ В.В.*, ГИНС М.С.*, ХОРОХОРОВ А.М., ШИРАНКОВ А.Ф.

НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана *Аграрно-технологический институт РУДН

E-mail: vved.av@gmail.com

Аннотация: Статья посвящена обзору числовых характеристик спектральных методов контроля состояния сельскохозяйственных растений, широко используемых в современных исследованиях. В работе собраны наиболее часто встречающиеся числовые характеристики, называемые вегетативными индексами, с их выражениями и классифицированы по размеру применяемых для их расчета спектральных зон и определяемому параметру растительности. Приведены примеры использования индексов для определения концентрации пигментов в листе. Проанализированы выражения числовых характеристик и выявлены наиболее информативные зоны для расчета вегетативных индексов. Определены рекомендации к аппаратному обеспечению контроля состояния растительности. Материалы статьи могут быть полезны при разработке спектральных методов мониторинга стрессов растительности и создания соответствующего приборного комплекса.

Ключевые слова: *дистанционное зондирование, спектроскопия, коэффициент отражения, стрессовые состояния, вегетативные индексы.*

SPECTRAL METHODS FOR AGRICULTURAL PLANTS STATE MONITORING

VVEDENSKAYA A.V., VVEDENSKIY V.V.*, GINS M.S.*, KHOROKHOROV A.M., SHIRANKOV A.F.

Radioelectronics and Laser Technology Research Institute of Moscow State Technical University N.A. Bauman *Agro-Technological Institute of the PFUR

E-mail: vved.av@gmail.com

Abstract: The focus of the article is to the review of numerical characteristics of spectral methods of plant control widely used recently. The most frequently used numerical characteristics called vegetative indices are collected with their expressions and are classified by size for their calculation of spectral zones and determined by the vegetation parameter. The resulted examples of use of indices for definition of concentration of pigments in the sheet. Expressions of numerical characteristics are analyzed and the most informative zones for calculation of vegetative indices are revealed. Recommendations for hardware monitoring of vegetation status have been determined. The materials of the article can be useful in developing spectral methods for monitoring stresses of vegetation and creating an appropriate instrumental complex.

Keywords: *remote sensing, spectroscopy, reflection coefficient, stress states, vegetation indices.*

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение высоких технологий в агропромышленный комплекс является приоритетным направлением развития науки и техники. Контроль состояния сельскохозяйственных растений представляет собой актуальную задачу, решение которой дает возможность своевременно диагностировать стрессы растений и принимать соответствующие меры [1, 2].

Для мониторинга состояния растений наиболее часто используются химические методы, однако они достаточно трудоемки и требуют значительного времени на отбор растительных проб и их химический анализ [3]. С другой стороны, недеструктивные методы имеют высокую скорость и продуктивность [4]. Среди недеструктивных методов хорошо себя показывают спектральные методы контроля состояния растений [5]. Они основываются на регистрации и последующем спектральном анализе излучения, отраженного от растения. Анализ состоит в получении на основе известного спектра числовой характеристики, некоторым образом коррелирующей с определяемым параметром. В качестве определяемого параметра может выступать концентрация пигментов, минеральных веществ, влаги в листе, структура листа, активность фотосинтезирующего аппарата и т.д. [6]. Изменение контролируемого параметра определенным образом влияет на спектральные характеристики объекта. Например, уменьшение азота в почве вызывает уменьшение отражения в зеленой области спектра и повышение отражения в инфракрасной области,



Кривые спектральной отражательной способности растений фасоли на фоне разных уровней азотного питания: 1 – 125% от нормы, 2 - 100% от нормы, 3 - 75% от нормы, 4 - 50% от нормы, 5 - 25% от

нормы, 6 - 0% от нормы

что показано на рис. 1, данные для которого получены в ходе совместного эксперимента специалистов МГТУ им. Н.Э. Баумана и Аграрно-технологического института РУДН.

Дальнейший анализ состоит в получении на основе известного спектра числовой характеристики, некоторым образом коррелирующей с определяемым параметром. Числовые характеристики применительно к анализу состояний растений называют вегетативными индексами. В разные годы в России и за рубежом проводилась разработка индексов для различных применений [7, 8]. Правильный выбор индекса под конкретную задачу представляется важным элементом проведения научной работы. В статье проводится обзор существующих наиболее часто используемых вегетативных индексов. Приводится наиболее рациональные сферы их применения, определяются требования к аппаратному обеспечению исследований. Выделяются наиболее информативные области спектра для мониторинга состояния растительности.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Расчет вегетативных индексов производят с помощью измеренных величин коэффициентов отражения ρ от вегетативной массы растений в разных областях спектра [9]. Различные комбинации информативных длин волн дают индексы, применяемые для определения широкого круга параметров, таких как концентрация пигментов в листе, эффективность фотосинтезирующего аппарата, содержание влаги или минеральных веществ в растительном покрове, его сомкнутость, структуру и т.д. Для удобства часто используемые индексы разделены на группы согласно работе [10] и приведены в табл. 1.

В таблице представлены значения коэффициентов отражения растений на длинах волн, указанных в индексах коэффициентов. Длины волн, соответствующие индексам NIR, RED, BLUE, уточняются при калибровке измерительного прибора и находятся в инфракрасной, красной и синей областях спектра, соответственно.

В группу Broadband Greenness (индексы
Таблица 1. Часто используемые вегетативные индексы и их выражения

Индекс	Формула	Расшифровка названия	
	1 v	индекса	
Broadband Greenness			
NDVI	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho}{\rho_{NIR}}$	Normalized Difference	
	$\rho_{NIR} + \rho$	Vegetation Index	
SRI	$SRI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho}$	Simple Ratio Index	
EVI	$EVI = 2.5 \times \times \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho}{\rho_{NIR} + 6 \cdot \rho - 7.5 \cdot \rho} + 1\right)$	Enhanced Vegetation Index	
ARVI	$ARVI = \frac{\rho_{NIR} - (2 \cdot \rho_{-} - \rho_{-})}{\rho_{NIR} - (2 \cdot \rho_{-} - \rho_{-})}$	Atmospherically Resistant	
	$\rho_{NIR} + (2 \cdot \rho - \rho)$	Vegetation Index	
Narrowband Greenness			
IV D V 1 ₇₀₅	$NDVI_{705} = \frac{\rho_{750}}{\rho_{750} + \rho_{705}}$	Difference Vegetation Index	
mSRI ₇₀₅	$mSRI_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{445}}{\rho_{750} - \rho_{445}}$	Modified Red Edge Simple Ratio Index	
mNDVI ₇₀₅	$\rho_{750} - \rho_{445}$	Modified Red Edge	
703	$mnDVI_{705} = \frac{1}{\rho_{750} + \rho_{705} - \rho_{445}}$	Normalized Difference	
		Vegetation Index	
NDSI	$NDSI = \rho_{740}$	Normalized Difference	
	$PDST = \frac{1}{\rho_{761}}$	Spectral Index	
CI _R	$CI_{\Re} = \frac{\rho_{840870}}{2} - 1$	Chlorophyll Index red edge	
CI _{GR}	$\frac{P_{720730}}{CI_{GR}} = \frac{\rho_{840870}}{2} - 1$	Chlorophyll Index green	
МТСІ	$\frac{\rho_{550}}{\rho_{754} - \rho_{709}}$	MERIS Terrestrial chlorophyll	
	$MICI = \frac{1}{\rho_{709} + \rho_{681}}$	index	
RSI	$RSI1 = \frac{\rho_{815}}{2}$	Ratio Spectral Index	
VOG1	$SRI = \frac{\rho_{740}}{\rho_{740}}$	Vogelmann Red Edge Index 1	
VOG2	$SRI = \frac{\rho_{734} - \rho_{747}}{\rho_{734} + \rho_{747}}$	Vogelmann Red Edge Index 2	
VOG3	$SRI = \frac{\rho_{734} - \rho_{747}}{\rho_{734} - \rho_{747}}$	Vogelmann Red Edge Index 3	
Light Use Efficiency			
PRI	$PRI = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{521} + \rho_{570}}$	Photochemical Reflectance	
CIDI	$\rho_{900} = \rho_{AAE}$	Structure Inconsition Disco out	
5171	$SIPI = \frac{\rho_{800} + \rho_{440}}{\rho_{800} + \rho_{680}}$	Index	
Canopy Nitrogen			
NDNI	$NDNI = \frac{\log\left(\frac{1}{\rho_{1510}}\right) - \log\left(\frac{1}{\rho_{1680}}\right)}{(1-\rho_{1680})}$	Normalized Difference Nitrogen Index	
	$\log\left(\frac{1}{\rho_{1510}}\right) + \log\left(\frac{1}{\rho_{1680}}\right)$		
Dry or Senescent Carbon			
NDLI	$NDLI = \frac{\log\left(\frac{1}{\rho_{1754}}\right) - \log\left(\frac{1}{\rho_{1680}}\right)}{\log\left(\frac{1}{\rho_{1754}}\right) + \log\left(\frac{1}{\rho_{1680}}\right)}$	Normalized Difference Lignin Index	
CAI	$CAI = 0.5 \cdot (\rho_{2000} + \rho_{2200}) - \rho_{2100}$	Cellulose Absorption Index	
PSRI	$SIPI = \frac{\rho_{680} - \rho_{500}}{\rho_{750}}$	Plant Senescence Reflectance	
Leaf Pigments			
CRI1	(1) (1)	Carotenoid Reflectance Index 1	
GALL	$CRI1 = \left(\frac{1}{\rho_{510}}\right) - \left(\frac{1}{\rho_{550}}\right)$		
CRI2	$CRI2 = \left(\frac{1}{\rho_{550}}\right) - \left(\frac{1}{\rho_{700}}\right)$	Carotenoid Reflectance Index 2	

ARI1	$ARI1 = \left(\frac{1}{\rho_{550}}\right) - \left(\frac{1}{\rho_{700}}\right)$	Anthocyanin Reflectance Index 1
ARI2	$ARI2 = \rho_{800} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{550}}\right) - \left(\frac{1}{\rho_{700}}\right)$	Anthocyanin Reflectance Index 2
Canopy Water Content		
WBI	$WBI = \frac{\rho_{900}}{\rho_{970}}$	Water Band Index
NDWI	$NDWI = \frac{\rho_{857} - \rho_{1241}}{\rho_{857} - \rho_{1241}}$	Normalized Difference Water
	$\rho_{857} + \rho_{1241}$	Index
MSI	$MSI = \frac{\rho_{1599}}{\rho_{1599}}$	Moisture Stress Index
	ρ_{819}	
NDII	$NDII = \frac{\rho_{819} - \rho_{1649}}{\rho_{1649}}$	Normalized Difference Infrared
	$\rho_{819} + \rho_{1649}$	Index

«зелености», рассчитываемые в широких спектральных зонах) входят индексы, отражающее общее количество растительности и используемые для решения широкого круга задач (отражают содержание хлорофилла, площадь листовой поверхности, сомкнутость и структуру растительного покрова и т.д.). Длина волны, на которой измеряются коэффициенты отражения для этой группы индексов, изменяется в довольно широком спектральном диапазоне и зависит от вида растения и времени измерения. Использование этих индексов позволяет работать с любыми мультиспектральными данными высокого, среднего или низкого разрешения. Основное требование заключается в наличии спектральных каналов в красной (нм) и ближней инфракрасной (нм) зонах

Группа Narrowband Greenness включает индексы «зелености», рассчитываемые по данным в узких спектральных зонах. Аналогично группе Broadband Greenness в данную группу входят характеристики отражающие общее количество и состояние растительности. Однако для расчета индексов из группы Narrowband Greenness используются значения коэффициентов отражения в области спектра от 690 до 750 нм, т. е. рассматривается область ближнего инфракрасного склона спектральной кривой растительности (red edge). Также работа в узких спектральных зонах позволяет фиксировать даже небольшие изменения в состоянии растительности. С другой стороны, уменьшение спектрального интервала требует использования данных с высоким спектральным разрешением.

Индексы группы Light Use Efficiency отражают эффективность, с которой фотосинтезирующий аппарат растительности способен использовать поступающий свет. Они хорошо коррелируют с эффективностью усвоения углерода и с активностью роста, а также тесно связаны с поглощением фотосинтетически активной радиации. Доля поглощенной фотосинтетически активной радиации. Доля поглощенной фотосинтетически активной радиации. Доля поглощенной фотосинтетически активной радиации (fraction of absorbed photosynthetically active radiation fAPAR) характеризует долю излучения, которое теоретически доступно для фотосинтеза. Этот параметр в последнее время часто используют как составляющий элемент определения продуктивности и прогнозирования урожайности посевов [11].

К индексам «зелености» относятся числовые характеристики для определения количества хлорофилла в листе. Существуют исследования, связывающие величину индекса и концентрацию хлорофилла в мг/см², например [12]:

$$Chl = 34,578 \cdot CI_{\Re} + 0,81$$

В работе [13] содержание хлорофилла в растительном покрове (canopy chlorophyll content (CCC)) определяется с помощью индекса :

$$CCC = 0,325 \cdot RSI - 0,358$$

Определение содержания хлорофилла имеет важно значение для развития растения и урожайности посевов [14], поэтому разработке методов мониторинга этого показателя уделяется большое внимание в современных исследованиях [15].

Индекс **Canopy Nitrogen** отражает концентрацию азота в растительном покрове.

Для расчета относительного содержания азота в растительном покрове используется средний инфракрасный диапазон (SWIR). Оптимальные уровни концентрации минерального азота в почве очень важны для правильного роста и развития растения. Мониторинг этого параметра позволяет принимать своевременные меры по нормализации состояния растения. Вегетативные индексы позволяют автоматизировать процесс определения азотообеспеченности. При этом индексы, чувствительные к хлорофиллу, часто одновременно отражают содержание азота, поэтому для его определения часто используют числовые характеристики, не входящие в группу Canopy Nitrogen. Например, индекс NDVI используют в таких автоматизированных системах для определения обеспеченности азотом как Yara N-sensor (Норвегия), Green Seeker (США), Сгор Spec (Япония), Holland Scientific Crop Circle (США) Этот же числовой индекс использован в первой отечественной системе контроля азотообеспеченности растений, разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана [15]. Контроль азотообеспеченности и внесение при необходимости азотных удобрений может осуществляться одновременно с помощью специально оборудованных сельскохозяйственных машин (рис. 2а, 2б, 2в, 2г).

Группа индексов **Dry or Senescent Carbon** служит для учета общего количества «сухого» углерода в виде лигнина и целлюлозы. Его увеличение может свидетельствовать о наличии процессов «старения» и отмирания клеток [10]. Применяются такого рода индексы для оценки пожароопасности территории.

Индексы группы Leaf Pigments служат для оценки содержания пигментов в листовой пластине. Такие индексы применяются в сельском хозяйстве для мониторинга состояния полей и оценки урожайности. Как правило пигменты каратиноиды и антоцианины в значительных количествах наблюдаются у растений в стрессовых состояниях. Часто с помощью индексов угнетенность растений можно определить еще до того, как она будет заметна невооруженным глазом. Для расчета таких индексов чаще всего используются узкие спектральные зоны видимого диапазона.



в)



б)



Рисунок 2. Иллюстрация автоматизированных систем определения азотообеспеченности



400 500 600 700 800 900 10001100120013001400150016001700180019002000210022002300

нм

Рисунок 3.

Информативные для спектральных методов точки на шкале длин волн

В работе [12] приведены аналитические зависимости, использующие вегетативные индексы, для определения концентрации антоцианинов *AnC* в мг/см²:

 $AnC = 0,9701 \cdot ARI + 1,0931$

Сапору Water Content является группой индексов, разработанной для оценки содержания влаги в растительном покрове. Оптимальное содержание влаги характерно для здоровой растительности, обладающей большей продуктивностью и устойчивостью к пожарам. Индексы данной группы широко используются для оценки пожароопасности вместе с индексами группы Dry or Senescent Carbon. Ближний и средний инфракрасный диапазон – основные области для расчета таких индексов.

Для иллюстрации распределения узких спектральных зон, применяемых для расчета вегетативных индексов, на шкале длин волн был составлен рис. 3.

Все использованные в табл. 1 значения длин волн были учтены и нанесены на рисунок 3 в соответствии со своей величиной в нм. Получившееся распределение выявляет наиболее информативные области спектра. Видно, что наибольший интерес представляет ближняя инфракрасная зона спектра нм. Многие вегетативные индексы представляют собой комбинацию коэффициентов отражения на длинах волн, располагающихся в инфракрасном и красном или зеленом диапазонах. Однако конечный выбор индекса и соответствующих длин волн зависит от цели исследования и уровня аппаратного обеспечения. Так в работе [13] отмечается, что некоторые вегетативные индексы имеют большую чувствительность к ширине спектрального канала. Например, в вегетативном индексе ширина полосы для длины волны нм должна не превышать 5 нм, чтобы коэффициент корреляции сохранялся на значении r²=0,946. В то время как для длины волны нм возможно увеличение ширины полосы до 10 нм. Расширение спектрального интервала позволяет повысить фотометрическую точность, за счет снижения инструментальной погрешности, что положительно сказывается на общем качестве измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный обзор вегетативных индексов показал их разнообразность и возможность подобрать оптимальный индекс под конкретную задачу.

В работе индексы разделены на 7 групп в соответствии с их сферой применения, каждая группа описана и даны рекомендации по ее применению. Авторы приводят формулы для расчета пигментов хлорофилла и антоцианинов с помощью индексов. В статье определено, что чаще всего для расчета индексов используется область 700-750 нм. Несмотря на это, выбор индекса должен основываться на возможностях доступной аппаратуры и чувствительности числовой характеристики к определяемому параметру. В дальнейшем по установленной величине интересующего параметра можно судить о состоянии растений, о наличии стресса и угнетенности и применять соответствующие меры.

Использование числовых характеристик в мониторинге состояния растительности позволяет решать широкий круг задач, как в области точного земледелия, так и в сфере пожаробезопасности и картирования местности. Таким образом дальнейшие работы по разработке спектральных методов с применением вегетативных индексов представляются перспективным направлением.

Список литературы:

1. Афанасьев Р.А. Фотометрическая диагностика азотного питания растений как фактор роботизации точного земледелия / А.И. Беленков, Е.В. Березовский, О.А. Щуклина // Нивы России – 2016 – №6 – С. 139-142.

2. Вееденская А.В. Недеструктивный метод диагностики азотообеспеченности растений оптикоэлектронной системой мониторинга растений / А.М. Хорохоров, В.В. Введенский, М.С. Гинс // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. Агрономия и животноводство – 2017. Т.12 – №1 – С. 7 – 16.

3. Белоусова К.В. Фотометрическая диагностика азотного питания растений // Автореф. на дисс. канд-та. тех. наук., ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова РАСН, Москва. – 2009, С. 9-11.

4. *Будаговский А.В.* Новый подход к проблеме функциональной диагностики растений /А.В. Будаговский, О.Н. Будаговская, Ф. Ленц //Аграрная наука. – 2009. - № 9. - С. 19-21.

5. *Gitelson, A.A., Schepers, J.S., Walthall, C.L.* Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. Agron. J. 100, 2011, S-117–S-131,

6. Ustin, S.L., A.A., Gitelson, S., Jacquemoud, M., Schaepman, G. P., Asner, J. A., Gamon, P. Zarco-Tejada Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy. Remote Sens. of Environ., 2009, 113, S67-S77.

7. *Main R., Cho M. A., Mathieu R., O>Kennedy M.M., Ramoelo A., Koch S.* An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, Volume 66, Issue 6, p. 751-761

8. Kira O., Guérif M., Baret F., Skidmore A., Gitelson A., Schlerf M., Darvishzadeh R. & Olioso A. Agricultural

and Forest Meteorology Plant, Cell and Environment, 2016, p. 243–249

9. Yang X, Yu Y, Fan W. Chlorophyll content retrieval from hyperspectral remote sensing imagery. Environ Monit Assess., 2015, Jul; 187(7):456. Epub 2015 Jun 23

10. *Черепанов А.С.* Спектральные свойства растительности и вегетативные индексы / Е.Г. Дружинина // Геоматика – 2009 – №3, С. 28-32.

11. *Gitelson A.A., Peng Y., Huemmrich K.F.* Relationship between fraction of radiation absorbed by photosynthesizing maize and soybean canopies and NDVI from remotely sensed data taken at close range and from MODIS 250 m resolution data. Remote Sensing of Environment, 2014, 147 108–120

12. *Gitelson, A., & Solovchenko, A.* Generic algorithms for estimating foliar pigment content. Geophysical Research Letters, 2017, 44. 9293–9298.

13. Inoue Y, Guérif M, Baret F, Skidmore A, Gitelson A, Schlerf M, Darvishzadeh R, Olioso A. Simple and robust methods for remote sensing of canopy chlorophyll content: a comparative analysis of hyperspectral data for different types of vegetation. Plant Cell Environ. 2016 Dec;39(12):2609-2623.

14. Сопов И.В. Влияние азотных удобрений на показатели растительной диагностики и продуктивность зерновых культур и горчицы белой в условиях центрального района нечернозёмной зоны // Автореф. на дисс. канд-та. тех. наук., ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова РАСН, Москва. – 2009. – С. 17.

16. Вееденская А.В. Оптико-электронная система мониторинга состояния сельскохозяйственных растений / А.М. Хорохоров, В.В. Введенский, М.С. Гинс // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение – 2017. – №4 – С.54 – 58.