

КОНТЕНАНТ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ISSN: 2307-5767

Том 17, № 4, 2018

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

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

Издается с 2002 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Итоги работы Общественной научно-технической академии «Контенант» за 2018 год	3
Международная конференция «Оптико-электронные комплексы наземного и космического базирования»	6
НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПТИКЕ	
Азарова В.В., Бессонов А.С., Петрухин Е.А. Методика компьютерного моделирования обратного рас- сеяния света в кольцевых лазерах	7
Овсянников В.А., Овсянников Я.В. Развитие методологии натурных испытаний тепловизионных приборов на дальность действия	16
Овсянников В.А. О новой модели прогнозирования дальности действия современных тепловизионных приборов	32
Григорьев И.С., Гусева А.А. Имитационное математическое моделирование излучения струй самолетного двигателя	43
Мурзин П.Е., Поздняков А.А., Шульга И.Н. Пути совершенствования методов радиолокационного сопровождения целей	48
Городничев В.А., Белов М. Л., Белов А. М., Михайловская М.Б. Обработка данных измерений в задаче лазерного дистан- ционного мониторинга природных образований	56
РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	
Архипов С.А., Генжаев Ш.А., Сальникова М.А., Абдулкадыров М.А., Добриков Н.С. Особенности проектирования крупногабаритных оптико- механических систем из карбида кремния оптико-элек- тронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли	64
Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Моисеев Е.А, Сеник Б.Н. Псевдобинокулярные очки ночного видения с углом поля зрения 100°	71
Волков В.Г., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Моисеев Е.А, Сеник Б.Н. Пипотажные двухканальные очки ночного видения	77
Сулейманов Г.М., Поздняков А.А., Федоров Д.А. Возможные пути синтезирования фильтров радиолокаци- онного сопровождения	86
Зарипов Д.К., Насибуллин Р.А. Устройство оптической индикации загрязнения высоко- вольтной изолирующей конструкции	95



КОНТЕНАНТ

ISSN: 2307-5767

Том 17, № 4, 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) ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ Перевозчиков Д.Н. Уникальные круглошлифовальные станки ВЗС «Техника» 102 Денисов Д.Г., Шкитин Г.А., Патрикеев В.Е., Семенов А.П. Технология производства и метод контроля крупногабаритного астрономического асферического зеркала - «М2» 107 Валейский Д.В., Дорошкевич А.Г., Демидович Т.И., Касинский Н.К., Красовский С.Н., Миткевич И.Н, Шушканова Т.Г. Станок с ЧПУ для алмазного шлифования плоских и сферических оптических деталей диаметром от 80 мм до 350 мм 115 Валейский Д.В., Дорошкевич А.Г., Касинский Н.К., Красовский С.Н., Мельников А.А., Наконечный В.П., Шушканова Т.Г. Автоматизированный комплекс промывки оптических деталей перед нанесением покрытий в вакууме 117 Валейский Д.В., Дорошкевич А.Г., Демидович Т.И., Касинский Н.К., Красовский С.Н., Миткевич И.Н, Шушканова Т.Г. Контурно-шлифовальный станок модели «Призма 150» для изготовления призм с размером грани до 150 мм из оптических заготовок с описанным диаметром сечения до 215 мм и высотой обрабатываемых заготовок до 250 мм 120 ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ Бобе А.С. Исследование технологического процесса изготовления и контроля параметров световода для устройств дополнен-

ной реальности		123
----------------	--	-----



Итоги работы Общественной научно-технической академии «Контенант» за 2018 год

Работа Общественной научно-технической академии «Контенант» в 2018 году организовывалась и проводилась в соответствие с требованиями Устава и с учетом опыта работы предыдущих лет.

Осуществлялось ежемесячное планирование работы администрации и членов академии на очередной месяц.

Заседания Президиума и членов Бюро президиума проведены в сроки, установленные годовыми и месячными планами с составлением протоколов.

Проведена на высоком научном и организационном уровне XV Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям 11-13 сентября 2018 года с участием МГТУ им. Н.Э.Баумана и многими предприятиями и организациями других стран. Научнотехнические конференции предприятий входящих в состав академии «Контенант» в этом году не проводились.

Для конференции академия «Контенант», помимо участия членов академии, выпускала тезисы докладов и программу.

Всего за отчетный период с 2013 года проведено 11 научно-технических конференций.

Научно-техническая работа членов академии осуществлялась по планам научной работы под руководством Главного ученого секретаря академии.

В 2018 годку проведена работа по улучшению качества научно-технического журнала «Контенант». Использованы новые шрифты, часть журнала стала цветной, использованы улучшенные способы печати в типографии. Это повлекло повышение стоимости, но улучшило качество журнала.

В этом году вышла в улучшенном варианте 4 номера научно-технического журнала «Контенант» (всего с 2012 года вышло 25 номеров). Журнал рассылается в научно-технические библиотеки России, профильные ВУЗы, военные ВУЗы, научно-технические библиотеки предприятий холдинга «Швабе», предприятия оптической отрасли промышленности, авторам статей и членам академии.

Академия продолжает иметь договор с РИНЦ НЭБ и в журнале публикуются статьи, оформленные авторами в соответствие с требованиями с одновременной их сдачей в типографию самого журнала.

Продолжает функционировать интернет-представительство академии – сайт Общественной научно-технической академии «Контенант» www.contenant.ru, где представлена информация о работе академии, печатные журналы с полным объемом статей, материалы научно-технических конференций. Поставленные задачи на 2018 год выполнены.

Общественная научно-техническая организация «Общественная академия «Контенант» является продолжателем деятельности Международной академии «Контенант», созданной 18 марта 1994 года в г. Сморгонь Республики Беларусь, с Российским Отделением Международной академии «Контенант» (РОМАК), созданным 14 сентября 1994 года на учредительном собрании и зарегистрированным в Министерстве юстиции Российской Федерации.

В 2012 году регистрация закончилась и была организована Общественная научно-техническая академия «Контенант» в соответствие с новыми требованиями Минюста и с наличием прежнего товарного знака обслуживания №170353 от 15 декабря 1998 года.

14 сентября 2019 года Общественная научно-техническая академия «Контенант» отметит свое 25-летие.





ПОЗДРАВЛЕНИЕ ПРЕЗИДЕНТА научно-технической академии «КОНТЕНАНТ»

Поздравляю членов научно-технической академии «Контенант», членов-корреспондентов, действительных членов с наступающим Новым 2019 годом и Рождеством Христовым! Дай Вам Бог сил и здоровья! Мир и покой Вашему дому! Пусть сопутствует Вам удача и благополучие, внимание и благодарность тех, кто Вам дорог!

Президент академии «Контенант»

-7-7-1

Б.Н.Сеник



Уважаемые коллеги! Оргкомитет и Организаторы

МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ НАЗЕМНОГО И КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ»

приглашают Вас принять участие в Международной научно-технической конференции «Оптико-электронные комплексы наземного и космического базирования», которая состоится 17-18 октября 2019 г., в г. Лыткарино, в АО «Лыткаринский завод оптического стекла» (АО ЛЗОС) ул. Парковая, дом 1

Целью конференции является обсуждение новейших научно-технических достижений и технологий в области проектирования, изготовления и эксплуатации оптико-электронных комплексов наземного и космического назначения, современное состояние данных комплексов, перспективы дальнейшего развития, обмен опытом, развитие взаимных связей с партнерами из стран СНГ и с зарубежными фирмами. Конференция также посвящена 80- летнему юбилею «Лыткаринского завода оптического стекла» - ведущему предприятию России в изготовлении оптических материалов

и оптических систем различного назначения.

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ:

Лыткаринский завод оптического стекла (г. Лыткарино, Московской области, ул. Парковая, дом 1) www.lzos.ru E-mail: info@lzos.ru; lastro@lzos.ru

Научно-техническая академия «Контенант» (г. Красногорск) www.contenant.ru; book@contenant.ru

НА НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ БУДУТ РАБОТАТЬ СЛЕДУЮЩИЕ СЕКЦИИ:

Секция №1

Разработка конструкций оптико-электронных приборов и комплексов

Секция №2

Материалы для изготовления прецизионных оптических элементов

Секция №3

Технологии изготовления, контроля оптических элементов, сборки, юстировки и испытаний оптико-электронных приборов

Статьи авторов,

подготовленные в соответствии с требованиями, изложенными на сайте www.contenant.ru в разделе «Научно-технический журнал» - «Правила для авторов», будут опубликованы в журнале «Контенант» с размещением в РИНЦ или без него.

Председатель Организационного комитета Международной конференции -

Президент академии «Контенант»

Попов С.В. Сеник Б.Н.

УДК 004.94:531.383



МЕТОДИКА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В КОЛЬЦЕВЫХ ЛАЗЕРАХ

АЗАРОВА В.В., БЕССОНОВ А.С.*, ПЕТРУХИН Е.А.

АО «Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», г.Москва *Московский технологический университет, г. Москва

E-mail: azarova_v_v@mail.ru, didugan4@mail.ru, petruhin53@mail.ru

Аннотация: Рассматривается методика компьютерного моделирование обратного рассеяния света в кольцевых лазерах. Указывается, что обратное рассеяние является одним из основных источников погрешностей лазерного гироскопа. Приводится математическое описание процесса обратного рассеяния, по которому затем строятся алгоритмические модели и векторные диаграммы. На конечном этапе создаются виртуальные модели обратного рассеяния. Утверждается, что они наиболее удобны и эффективны при контроле характеристик кольцевых лазеров. В виртуальных моделях при помощи компьютерной анимации отображается изменение фаз комплексных коэффициентов связи встречных волн во время работы кольцевого лазера. Рассчитываются пороги захвата. Результаты моделирования представляются в различных текстовых и графических формах. Описаны результаты моделирования обратного рассеяния при перестройке лазера на генерацию различных мод, при температурном воздействии и при противофазном ходе пьезоэлектрических корректоров.

Ключевые слова: лазерный гироскоп, обратное рассеяние, порог захвата, методика компьютерного моделирования, виртуальная модель.

A METHOD FOR COMPUTER SIMULATION OF BACKSCATTERING IN RING LASERS

AZAROVA V.V., BESSONOV A.S., PETRUKHIN E.A.

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

E-mail: azarova_v_v@mail.ru, didugan4@mail.ru, petruhin53@mail.ru

Abstract: The method for computer simulation of light backscattering in ring lasers is considered. It is indicated that backscattering is one of the main sources of laser gyro errors. A mathematical description of the backscattering process is given, along which algorithmic models and vector diagrams are then constructed. At the final stage virtual models of backscattering are created. It is claimed that they are most convenient and effective in controlling the characteristics of ring lasers. In virtual models, computer animation shows the phase change of the complex coupling coefficients of counter propagating waves

during the operation of laser gyros. The lock-in thresholds are calculated. The simulation results are presented in various text and graphic forms. The results of backscattering simulation during laser tuning to the generation of various modes, under the influence of temperature and in the antiphase motion of piezoelectric correctors are described.

Keywords: *laser gyro, light backscattering, lock-in threshold, method of computer simulation, virtual model.*

введение

Обратное рассеяние (OP) света на зеркалах в лазерных гироскопах (ЛГ), изготавливаемых на основе He-Ne кольцевых лазеров, приводит к искажению выходных характеристик ЛГ и к возникновению погрешностей измерений. В области малых угловых скоростей вращения частотная характеристика гироскопа становится нелинейной, и появляется так называемая зона захвата, в которой ЛГ без принятия специальных мер теряет работоспособность [1, 2]. Поэтому измерение OP и контроль порога захвата ЛГ на производстве становятся необходимыми.

Как известно, применение сред графического программирования и технологии виртуальных приборов для моделирования исследуемых объектов и процессов и построения компьютерных средств измерений обладает рядом преимуществ [3, 4]. Разработанные в этих случаях компьютерные модели называются *виртуальными моделями*, которые способны на современном уровне имитировать поведение объекта исследования, проводить расчеты и обработку моделируемых данных и представлять результаты в различной форме.

Авторами предлагаемой статьи были разработаны виртуальные модели ОР света в кольцевых лазерах. Они были предназначены для изучения этих процессов, для модельноориентированного проектирования [5] соответствующих измерительных систем, предназначенных для измерения порога захвата и комплексных коэффициентов связи встречных волн в кольцевом лазере [6], а также для обучения персонала и студентов. Этапы создания ВМ ОР описаны в статье и представляют собой основу для *методики компьютерного моделирования*, которую можно распространить и использовать для решения иных научных и технических задач.

1. ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В КОЛЬЦЕВОМ ЛАЗЕРЕ

Методика компьютерного моделирования ОР в кольцевых лазерах предполагает разработку и дальнейшее исследование ВМ. Проводимые работы можно разделить на несколько этапов, пронумерованных и рассмотренных ниже.

1) В первую очередь выполняется выбор или разработка *графической модели объекта исследования* в том виде, который соответствует цели и задачам моделирования. В рассматриваемом случае в качестве графической модели была выбрана упрощенная оптическая схема кольцевого резонатора, содержащая только те элементы и связи между ними, которые участвуют в процессе OP.

2) Затем в соответствии с графической моделью первого этапа осуществляется создание ее математического описания. Математическая модель должна описывать исходное состояние ОР и изменение этого состояния при управлении периметром кольцевого лазера во время его функционирования или проведения измерительных процедур. Состояние ОР определяется значениями коэффициентов связи встречных волн.

3) На третьем этапе происходит определение актуальных алгоритмов перестройки кольцевого лазера или резонатора. Перестройка осуществляется за счет изменения напряжения на его пьезоэлектрических корректорах резонатора в модельном времени. Здесь требуется выделить необходимые процессы перестройки периметра резонатора, определить порядок перемещения зеркал и описать алгоритмы управления. Применительно к модели ОР были выделены алгоритм перестройки на другую моду, алгоритм регулирования периметра при температурных воздействиях, а также алгоритм противофазного хода пьезоэлектрических корректоров, используемого при измерениях ОР [6].

4) На основе математической и алгоритмической моделей стоятся векторные диаграммы. В качестве векторов выступают комплексные значения, характеризующие коэффициенты связи встречных волн [6]. Во время измерительных процессов векторы, представляющие отдельные рассеиватели, меняют свое положение, а суммарные векторы, определяющие порог захвата, – свое положение и модуль. Все эти изменения отражаются на векторной диаграмме. При наличии компьютерной анимации при проведении моделирования пользователь может наблюдать за изменением положения векторов ОР и, как следствие, за изменением порога захвата ЛГ.

5) Создание виртуальной модели. Как уже отмечалось, ВМ объединяет полезные свойства других моделей и полученную с их помощью информацию, то есть фактически интегрирует результаты предыдущих этапов моделирования (рис. 1) [5, 6]. ВМ, создаваемым в таких развитых средах графического программирования, как LabVIEW [3, 4], доступны многие компьютерные технологии генерации данных, их обработки с помощью разнообразного математического аппарата и представления в различных формах.

Интегрирующая роль виртуальной модели представлена на рис. 1.

6) После создания ВМ проводится моделирование, получение и анализ результатов. При экспериментальных измерениях проверяется



Рисунок 1. Интегрирующая роль виртуальной модели

адекватность BM, и при необходимости происходит возврат на более ранние этапы для доработки компьютерных моделей.

2. ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

В настоящее время кольцевые лазеры стоятся на основе четырехзеркальных резонаторов. Генерируемое излучение, последовательно отражаясь от зеркал, распространяется по (*cw*) и против часовой стрелки (ccw). На неоднородностях зеркал M₁, M₂, M₃, M₄ (рис. 2) происходит обратное рассеяния света, и каждому из зеркал поставлен в соответствие свой эквивалентный источник OP [6, 7].

На двух зеркалах для управления периметром резонатора установлены пьезоэлектрические корректоры, и с точки зрения описания процессов ОР важно, расположены ли такие зеркала в резонаторе напротив или рядом друг с другом.



Рисунок 2. Упрощенные оптические схемы кольцевого резонатора: M₁, M₂, M₃, M₄ - зеркала, ПЭК - пьезоэлектрический корректор

Следует отметить, что в процессах ОР могут участвовать и другие внутренние и внешние элементы кольцевого резонатора. При необходимости они должны быть введены в состав оптических схем.

3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ В КОЛЬЦЕВОМ ЛАЗЕРЕ

При описании эффектов, связанных с влиянием ОР при работе КЛ в режиме слабой связи встречных волн, используется система дифференциальных уравнений [1, 2]. В них влияние ОР описывается при помощи комплексных коэффициентов связи, определяющих, какая часть светового излучения рассеивается во встречном направлении.

При разработке математических моделей OP можно предположить, что угловые и линейные перемещения оптической оси кольцевого лазера в виду их малости не изменяют величины комплексных коэффициентов связи отдельных зеркал, которые можно назвать парциальными коэффициентами связи [6]. В этом случае суммарные коэффициенты связи \tilde{T}_{cw} и \tilde{T}_{ccw} можно представить следующим соотношением:

$$\widetilde{r}_{cw} = \sum_{n} r_{n}^{cw} \exp[i(\varphi_{n}^{cw} + 2kl_{n})]$$

$$\widetilde{r}_{ccw} = \sum_{n} r_{n}^{ccw} \exp[i(\varphi_{n}^{ccw} - 2kl_{n})]$$
, (1)

где $k=2\pi/\lambda$ — волновое число, r_n и ϕ_n - модуль и фазовый сдвиг *n*-ого источника ОР, l_n - его продольная координата относительно оптической оси резонатора. Для четырех зеркального кольцевого резонатора индекс *n* соответственно изменяется от 1 до 4.

При таком подходе процессы, происходящие кольцевом лазере при его контроле, испытаниях или при штатном функционировании, могут быть описаны с помощью достаточно простого математического аппарата, основанного на задании закона изменения координат $l_n(t)$ источников ОР в модельном времени t (см. (1)).

Значения ККС (1) определяют пороги захвата Ω_L [6]:

$$\Omega_{L} = \frac{c}{2\pi L} \sqrt{r_{cw}^{2} + r_{ccw}^{2} + 2r_{cw}r_{ccw}\cos(\varphi_{cw} + \varphi_{ccw})} ,$$
(2)

где Ω_L - порог захвата в герцах, *с* – скорость света, *L* – периметр кольцевого резонатора. В соответствии с данной формулой изменения ККС приводит к изменению порога захвата.

Рассмотрим один из вариантов математической модели (1), в которой уточняется, что каждый из парциальных рассеивателей имеет консервативную \widetilde{R}_n и диссипативную \widetilde{r}_n составляющие [6, 7]. Пусть КР соответствует четырехзеркальной оптической схеме, изображенной на рис. 2а. Настройка на резонанс здесь осуществляется с помощью пьезоэлектрических корректоров, установленных на противоположных зеркалах M_1 и M_3 и называемых пьезозеркалами. Зеркала M_2 и M_4 в резонаторе неподвижны.

В данном варианте модели суммарные КС в процессе моделирования ОР определятся следующим образом:

$$\widetilde{r}_{cw,ccw}(t) = \sum_{n=1}^{4} \left[\left(R_n \exp\left(\frac{i\pi}{2} \pm i\gamma_n\right) + r_n \exp(i\pi \pm i\zeta_n \pm i\gamma_n) \right) \exp(\pm i\Delta\phi_n(t)) \right], \quad (3)$$

где R_n и r_n - модули консервативной и диссипативной частей *n*-ого рассеивателя, ς_n - сдвиг фаз между ними, γ_n - сдвиги фаз, определяющие положение консервативной части рассеивателя с номером *n* по отношению к оптической оси резонатора, $\Delta \phi_n(t) = 2 \cdot k \cdot \Delta l_n(t)$ – изменения сдвигов фаз в плечах резонатора в модельном времени, $\Delta l_n(t)$ - изменения продольных координат источников OP.

Изменения сдвигов фаз удобно представить в виде вектора

$$\Delta \vec{\varphi}(t) = \{\Delta \varphi_1(t), \Delta \varphi_2(t), \Delta \varphi_3(t), \Delta \varphi_4(t)\}, (4)$$

С помощью модели (3) можно описать процессы ОР света в КЛ, протекающие при измерениях. Для разработки ИС, предназначенной контроля КЛ и для измерения порога захвата Ω_L , актуально моделирование переходов ОИ от генерации одной моды к другой, процессов теплового расширения резонатора и так называемый противофазный ход, когда пьезозеркала M_1 и M_3 движутся в разных направлениях по отношению к центру резонатора так, что его периметр L остается постоянным. Противофазный ход применяется в измерениях для определения максимального и минимального порогов захвата [7].

Рассмотрим модель, отражающую перестройку зеемановского КЛ [8] с межмодовым расстоянием $\frac{c}{2L}$ на различные моды. Задачей моделирования является оценка порогов захвата $\Omega_L^{(q)}$, где q - индекс моды, который изменяется от 1 до 4 [8].

Будем считать, что в начале моделирования кольцевой лазер генерирует моду 1, и из этого состояния происходит переход к моде с индексами 2, 3 или 4. В алгоритмической модели установим, что при перестройке периметра зеркала M_1 и M_3 двигаются *одновременно и в одном направлении*, то есть друг к другу или друг от друга. Поскольку при переходе к соседней моде периметр *L* зеемановского КЛ изменяется на $\lambda/2$, то длина каждой из плеч резонатора в наиболее простом случае меняется на $\lambda/8$. Если проводить отсчет фазовых сдвигов от источника OP, расположенного на зеркале M1, то переход к модам с индексами 2, 3 или 4 можно описать следующим вектором сдвига фаз:

$$\Delta \vec{\varphi}^{(q)} = \{0, (q-1)\frac{\pi}{2}, (q-1)\pi, -(q-1)\frac{\pi}{2}\}, (5)$$

где q – индекс моды. Полученные фазовые сдвиги подставляются для расчета КС в выражение (3), а затем по формуле (2) рассчитываются искомые пороги захвата $\Omega_I^{(q)}$.

Для упрощения рассмотренных моделей может быть введено понятие парциального вклада $\widetilde{\Omega}_n^m$ в порог захвата от каждого из каждого из зеркал [7]. Тогда формула (1) перепишется в следующем виде:

$$\Omega_L^{(q)} = \left| \sum_{n=1}^4 \widetilde{\Omega}_n^{(q)} \right| = \left| \sum_{n=1}^4 \widetilde{\Omega}_n^{(1)} \cdot \exp(i\Delta \varphi_n^{(q)}) \right| .$$
(6)

Вектор изменения фазовых сдвигов $\Delta \vec{\phi}(t)$ может быть представлен в виде суммы двух составляющих:

вектора изменения фазовых сдвигов Δφ_T, происходящих за счет изменения температуры по сравнению с некоторым начальным ее значением;

- вектора изменения фазовых сдвигов Δφ_{ΠΦX} происходящих за счет изменения управляющего напряжения на ПЭК по сравнению с некоторым начальным его значением.

Изменение температуры приводит к расширению или сжатию корпуса резонатора, что приводит к изменению периметра *ΔL*. При использовании линейного приближения можно записать:

$$\Delta L_T = k_T \cdot L \cdot \Delta T , \qquad (7)$$

где k_T - коэффициент температурного расширения материала корпуса резонатора.

Равномерное изменение периметра в одинаковой мере распределяется по плечам резонатора, изменение длин которых составит величину $\frac{\Delta L_T}{4}$. Тогда благодаря автоматической регулировке периметра КЛ изменения сдвига фаз не произойдет, и порог захвата остается неизменным на всех модах световой генерации. Однако на практике такое равномерное распределение наблюдается редко, поскольку реальные пьезоэлектрические корректоры имеют разброс характеристик и перемещают зеркала неодинаково. Этот факт можно смоделировать с помощью использования коэффициента неравномерности перемещения пьезозеркал:

$$\Delta l = p \Delta L_T \, / \, 4 \, .$$

Значение *р*≤1.

Последнее выражение следует ввести в вектор изменения фазовых сдвигов

$$\Delta \vec{\varphi}_T(t) = \left\{ 0, \frac{p\pi \Delta L_T(t)}{\lambda}, 0, -\frac{p\pi \Delta L_T(t)}{\lambda} \right\}.$$
 (8)

В соответствии с (6) и (8) порог захвата изменяется периодически. Кроме того, из приведенных выражений видно, что при реализации модели в виде компьютерной программы изменение периметра Δ*L* удобно выражать в единицах длины волны λ.

Выражение для изменения фазовых сдвигов при моделировании противофазного хода оказывается схожим с (8):

$$\Delta \vec{\varphi}_{\Pi \phi X}(t) = \left\{ 0, \frac{4\pi \Delta l(t)}{\lambda}, 0, -\frac{4\pi \Delta l(t)}{\lambda} \right\}, \quad (9)$$

где Δl - изменение длины плеча резонатора.

Таким образом, в данном разделе статьи были описаны достаточно простые математические модели ОИ, позволяющие оценивать изменения порогов захвата при переходе на другую моду (см. (3) и (4)), при изменении температуры (см. (6) и (8)) и при противофазном ходе на выбранной моде световой генерации (см. (6) и (9)). Задача измерительной системы, контролирующей порог захвата на производстве, будет заключаться в выделении максимального Ω_{Lmin} и минимального порогов захвата Ω_{Lmax} .

Следует также заметить, что при расположении ПЭК на соседних зеркалах (рис. 2б), математическое описание процессов ОР будет иметь отличия. Например, в этом случае вектор $\Delta \bar{\phi}_T(t)$ имеет вид:

$$\Delta \vec{\phi}_T(t) = \left\{ 0, -\frac{\pi \Delta L_T(t)}{\lambda}, -\frac{\pi \Delta L_T(t)}{\lambda}, 0 \right\} .$$

4. BEKTOPHЫЕ ДИАГРАММЫ

Векторные диаграммы строятся на четвертом этапе рассматриваемой методики компьютерного моделирования. Применение диаграмм позволяет более наглядно отобразить процессы ОР света в кольцевом лазере, что и способствует более глубокому их пониманию разработчиками и пользователями средств измерений [1, 2, 6, 7]. Каждый комплексный коэффициент связи удобно представляется в виде вектора на комплексной плоскости, длина которого соответствует модулю коэффициента, а угол поворота вектора по отношению к положительному направлению горизонтальной оси - фазовому сдвигу. Происходящие во время моделирования изменения углов векторов легко анимируются с помощью компьютерных технологий.

Рассмотрим примеры векторных диаграмм, соответствующих выше описанным математическим моделям, при этом вектор, соответствующий зеркалу М₁, будем считать неподвижным для того, чтобы от него отсчитывать положения других векторов.

Векторная диаграмма (рис. 3) иллюстрирует перестройку кольцевого лазера с генерации первой моды на генерацию второй моды. На рис. За показано исходное расположение векторов парциального порога захвата. При перестройке на вторую моду вектор \vec{r}_1 фиксируется неподвижным, вектор \vec{r}_2 поворачивается на угол $\pi/2$, вектор \vec{r}_3 - на угол π , вектор \vec{r}_4 - на угол - $\pi/2$ (см. (4) и (5)). В результате видно, что вторая мода характеризуется другим порогом захвата: $\Omega_L^{(2)} > \Omega_L^{(1)}$.



Рисунок 3. Векторные диаграммы при генерации первой (а) и второй (б) мод



Рисунок 4. Векторная диаграмма противофазного хода пьезоэлектрических корректоров

Векторная диаграмма (рис. 4) поясняет процессы ОР, происходящие при противофазном ходе пьезоэлектрических корректоров (см. рис.

2а и выражение (9)). Векторы ОР $\vec{r_1}$ и $\vec{r_3}$, соответствующие подвижным зеркалам, не изменяют свое направление, а векторы, $\vec{r_2}$ и $\vec{r_4}$ соответствующие неподвижным зеркалам - враща-

ются, описывая своими концами окружности.

Суммарный вектор ОР \vec{r}_{sum} определяет порог захвата (см. (2)), исходя и чего можно утверждать, что порог захвата будет периодически изменяться в диапазоне от Ω_{lmin} до Ω_{lmax} .

Аналогичная векторная диаграмма получается и при моделировании температурных воздействий (см. выражение (8)).

5. ВИРТУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ

Как было показано в первом разделе статьи, моделирование ОР связано с созданием ряда моделей, последней и результирующей в котором является ВМ. ВМ здесь может и должна играть интегрирующую роль, собирая информацию от других моделей и сохраняя их преимущества (рис. 1). Математическая часть ВМ реализуется с помощью обширных библиотек функций обработки и представления данных, имеющихся в составе среды графического программирования, алгоритмическая часть – соответствующими структурами блок-диаграммы, графическая часть – с помощью разнообразных средств отображения текстовой и графической информации на лицевой панели, в том числе с анимационными эффектами. При этом процесс создания ВМ технологичен и отличается сравнительно низкой трудоемкостью [3, 4].

При разработке ВМ ОР, отражающей изменения порогов захвата при генерации разных мод, использовались сменные экранные страницы. Первая экранная страница (рис. 5а) предназначена для ввода исходного состояния кольцевого лазера и расчета на основе выражений (3), (2) и (5) суммарных комплексных коэффициентов связи и порогов захвата при генерации различных мод. На второй экранной странице (рис. 5б) отображаются разноцветные векторные диаграммы, для чего используются графические экраны *Graph XY*. Рядом указывается соответствующий порог захвата $\Omega_L^{(q)}$, посчитанный по формуле (2). Следует также заметить, что на приведенном рисунке



Этот рисунок от температурной модели по формуле 8. Резонатор – на рис. 2a. Если зеркала перемещаются одинаково, коэффициент неравномерности p=0, то порог захвата не меняется



Если зеркала перемещаются неодинаково, коэффициент неравномерности p>0, то порог захвата меняется периодически. Период зависит от величины коэффициента p (см. формулу (8)).

Рисунок 5. Лицевая панель виртуальной модели обратного рассеяния кольцевого лазера при генерации различных мод: а) – экранная ввода исходных данных и расчета комплексных коэффициентов связи и порогов захвата; б) – экранная страница векторных диаграмм векторные диаграммы приведены в разном масштабе.

а) – экранная ввода исходных данных и расчета комплексных коэффициентов связи и порогов захвата;

б) – экранная страница векторных диаграмм Другие разработанные нами ВМ предназначены для изучения температурного воздействия на резонатор и противофазного хода пьезоэлектрических корректоров в соответствии с выражениями (8) и (9). Моделирование происходит с анимацией движения векторов ОР, вызванного изменением длин плеч резонатора.

Перемещения векторов можно наблюдать и изучать на графических экранах, аналогичных приведенным на рис. 5б. В результате такого моделирования формируются измерительные сигналы, отличающиеся друг от друга при работе кольцевого лазера в разных режимах световой генерации.

По измерительным сигналам рассчитываются пороги захвата $\Omega_L^{(q)}$ и находятся их искомые максимальное и минимальное значения. На рис. 6 видно, что при отличном от нуля коэффициенте неравномерности p (см. (8)) зависимости $\Omega_L^{(q)}(\Delta L_T)$ имеют периодический вид. При некоторых значениях исходных данных можно наблюдать дополнительные точки перегиба или локальные максимумы и минимумы.



Рисунок 6. Результаты моделирования зависимости порога захвата кольцевого лазера от изменения периметра вследствие влияния температуры

Эти факты в дальнейшем учитываются при разработке программных модулей обработки данных, входящих в состав программного обеспечения измерительной системы. Следует также заметить, что на рис. 6 изменение периметра вследствие воздействия температуры измеряется в единицах длины волны λ.

Сходные зависимости получаются и при моделировании противофазного хода, что позволяет оценить максимальный и минимальный порог захвата при генерации кольцевым лазером различных мод. Для оптических схем, рассмотренных в [6, 7], могут быть получены измерительные сигналы, пропорциональные суммарным коэффициентам связи. Сигналы для зеемановского лазера имеют период, равный 2λ (рис. 7). В измерительной системе они вводятся в компьютер и обрабатываются с получением результата измерений.

Виртуальная модель, формирующая измерительные сигналы, может быть использована при модельно-ориентированном проектировании системы, предназначенной для измерения ОР и порога захвата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерение ОР и оценка порога захвата может проводиться как на стадии контроля кольцевого лазера, так и на стадии сборки кольцевого резонатора, еще не заполненного рабочей смесью [6, 7]. Проведение столь ранней отбраковки по порогу захвата позволяет надеяться, что исследование и внедрение методов измерения и контроля ОР повысит процент выхода годных изделий и снизит себестоимость производства ЛГ, что повышает актуальность описанных в статье исследований.

Рассмотренные в статье модели ОР сравнительно просты, но достаточно хорошо согласуются с физическим экспериментом. Авторами разработаны и опробованы процедуры параметрической идентификации моделей. Созданные виртуальные модели также могут играть роль моделей объекта измерения при модельно-ориентированном проектировании измерительных систем измерения обратного рассеяния и порога захвата. Кроме того, при необходимости модели можно усложнить. Так, например, обратное рассеяние света вызывают не только зеркала, но и другие элементы резонатора, а также внешний фотоприемник. Если их вклад значителен, то они должны быть учтены в моделях.



Рисунок 7. Лицевая панель виртуальной модели противофазного хода пьезоэлектрических корректоров с формированием измерительного сигнала

Виртуальные модели также широко используются как средство обучения. Они могут оформляться в виде исполняемых приложений и раздаваться персоналу и студентам с тем, чтобы они изучали моделируемые объекты и процессы, а также методы измерений их характеристик.

Наконец, рассмотренная методика построения виртуальных моделей достаточно универсальна и может быть использована для модельного решения иных научных, технических и образовательных задач.

Список литературы:

1. Aronowitz F. Optical Gyros and their Applications. RTO AGARDograph 339. 1999. 3-1. 336 p.

2. Wilkinson J. R. Ring Lasers. Progress Quantum Electronics. 1987. №11. pp. 1-103.

3. Conway J., Watts St. A Software Engineering Approach to LabVIEW. Prentice Hall PTR. 2003. 222 p.

4. Трэвис Д., Кринг Д. LabVIEW для всех. М.: ДМК Пресс, 2011. 904 с.

5. Ефремов А.А. Модельно-ориентированное проектирование - международный стандарт инженерных разработок / А.А. Ефремов, С.С. Сорокин, С.М. Зенков [Электронный ресурс]. URL: https://matlab. ru/upload/resources/EDU%20Conf/pp%2040-43%20 Sorokin.pdf (дата обращения: 04.05.2018).

6. Бессонов А.С. Измерения комплексных коэффициентов связи в кольцевом резонаторе лазерного гироскопа /А.С. Бессонов, А.П. Макеев, Е.А. Петрухин // Квантовая электроника. 2017. 47 (7). С. 675–682.

7. Патент РФ № 138509. Установка для измере-

ния порога статического захвата в зеемановском кольцевом лазере / В.В.Азарова, А.С.Бессонов, А.П.Макеев, Е.А.. – 2014. – Бюлл. № 8. – 2 с.

 Азарова В.В. Зеемановские лазерные гироскопы / В.В. Азарова, Ю.Д. Голяев, И.И. Савельев // Квантовая электроника. 2015. 45 (2). С. 171–179.

References:

1. Aronowitz F. Fundamentals of the Ring Laser Gyro. Optical Gyros and their Application. RTO AGARDograph 339, 1999. P. 3-1 to 3-45.

2. Wilkinson J. R. Ring Lasers // Progress Quantum Electronics. 1987. № 11. P. 1–103.

3. Conway J., Watts St. A Software Engineering Approach to LabVIEW. Prentice Hall PTR, 2003. 222 p.

4. Travis J., Kring J. LabVIEW for everyone. Moscow, DMK Press, 2011. 904 p. (in Russ).

5. Efremov A.A., Sorokin S.S., Zenkov S.M. Modelbased design – the international standard of engineering developments [Electronic resource]: URL: https:// matlab.ru/upload/resources/

EDU%20Conf/pp%2040-43%20Sorokin.pdf. (in Russ).

6. Bessonov A.S., Makeev A.P., Petrukhin E.A. Measurements of complex coupling coefficients in a ring resonator of a laser gyroscope // Quantum Electronics. 2017. V. 47(7). P. 675–682.

7. Patent RU № 138509. The setup for measuring the lock-in threshold in a Zeeman ring laser / V.V. Azarova, A.S. Bessonov, A.P. Makeev, E.A. Petrukhin. 2014. (in Russ).

8. Azarova V.V., Golyaev Yu.D., Savelyev I.I. Zeeman laser gyroscopes // Quantum Electronics. 2015. V. 45(2). P. 171–179.



РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ НА ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ

ОВСЯННИКОВ В.А., ОВСЯННИКОВ Я.В.

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань

E-mail: gipo@telebit.ru

Аннотация: Предложена усовершенствованная, научно обоснованная методология получения статистически обеспеченной экспериментальной оценки и контроля дальности действия тепловизионных приборов при обнаружении и распознавании объектов, учитывающая отличие фактических условий натурных испытаний приборов от нормированных и включающая пересчет результатов этих испытаний на нормированные условия. Методология обеспечивает достижение максимального значения нижней границы доверительного интервала (оценки снизу) для искомой дальности действия ТВП при заданном уровне достоверности результатов испытаний и их фиксированном объеме.

Ключевые слова: тепловизионный прибор, методология натурных испытаний.

Дальность действия – дальность вскрытия (обнаружения и/или распознавания) зачетного объекта с заданной вероятностью – является основным показателем эффективности, или тактико-технической характеристикой, любого тепловизионного прибора (ТВП) наблюдения в статическом режиме работы, и, как правило, именно она подлежит измерению или контролю при аттестации этого ТВП. В настоящее время существует целый ряд методик проведения натурных испытаний ТВП, по существу являющихся некоторыми вариациями двух основных способов определения величины, отождествляемой авторами и пользователями этих методик с искомой дальностью действия ТВП, однако дающих значимо разные результаты:

- дальность действия определяется как дистанция до объекта, на которой оценка вероятности его вскрытия, установленная группой операторов в результате дешифрирования ряда изображений объекта, равна заданному значению, обычно 0,8;

- дальность действия определяется как среднее значение дистанций до объекта, на которых этот объект вскрывается группой операторов в результате дешифрирования ряда изображений объекта.

Нетрудно видеть, что дальности действия одного и того же ТВП, измеренные этими способами, не могут совпадать хотя бы потому, что оценка вероятности вскрытия объекта вторым из них составляет не 0,8, а 0,5, ибо на полученной таким образом средней дистанции до объекта он вскрывается лишь в половине случаев.

Выполненный ранее в литературе анализ подобных методик, появление которых, повидимому, обусловлено недостаточной осведомленностью большинства специалистовпрактиков в вопросах проведения корректной, статистически обеспеченной аттестации ТВП в натурных условиях, показал наличие целого ряда присущих этим методикам недостатков, оказывающих влияние на результаты испытаний ТВП и их интерпретацию:

 подмена вероятности вскрытия объекта ее экспертной оценкой без корректного анализа ее достоверности и возможности повышения этой достоверности; предоставление наблюдателю априорной информации об объекте наблюдения, облегчающей его вскрытие;

- возможность неоднозначной трактовки результатов испытаний, обусловленной, в частности, использованием операторами различных критериев вскрытия объекта по его изображению;

- неопределенность требуемого объема испытаний, достаточного для подтверждения требований по дальности действия приборов;

- ограничение в обеспеченности условий проведения испытаний (ситуационных, погодных), что затягивает сроки их завершения.

Основной причиной сложившегося положения является отсутствие до настоящего времени адекватной методологии натурных испытаний ТВП на дальность действия. Разработке комплексного, теоретически последовательного подхода к проведению этих испытаний, свободного от отмеченных выше недостатков и существенно развивающего имеющиеся в литературе соответствующие рекомендации разных авторов (например, [1-4]), и посвящена настоящая статья.

Для получения достаточно представительных и сопоставимых оценок дальности действия ТВП их испытания, в принципе, следует проводить в нормированных условиях, т.е. для определенных значений параметров фоноцелевой, метеосиноптической и помеховой обстановки. Однако в реальных ситуациях вероятность одновременного выполнения любых четко оговоренных таких условий крайне мала, что вынуждает прибегать к пересчету значений дальности действия, измеренных для фактических условий аттестации ТВП, в значения этих дальностей, которые были бы получены для нормированных условий. При этом одновременно должна решаться и задача обеспечения приемлемого уровня достоверности результатов испытаний ТВП, которая вследствие ограниченного состава задействованных в экспериментах операторов-дешифровщиков, как правило, недостаточно высока. Известные методики подобного пересчета (например, [4-5]) рассматривают лишь отдельные его аспекты и, главное, не решают удовлетворительно

задачи оценки и повышения достоверности результатов аттестации ТВП.

Подобно тому как при создании и оценке любой функциональной аппаратуры основными критериями ее качества являются эффективность и стоимость, при сравнении и выборе средств и методов аттестации важнейшую роль играют достоверность и стоимость [1]. Недостаточно высокая достоверность результатов аттестации приводит к ошибочной отбраковке годной аппаратуры (риск поставщика по ГОСТ Р 50779.11-2000) и ошибочной приемке дефектной (риск потребителя). Поэтому один из возможных подходов к оптимизации процедуры аттестации аппаратуры сводится к снижению суммы стоимости аттестации и потерь от возможного принятия неверного заключения относительно пригодности данной аппаратуры или, более конкретно, к минимизации объема и, значит, затрат времени и средств на проведение испытаний при заданном уровне достоверности их результатов.

Как известно [1], тепловизионные изображения имеют следующие особенности, влияющие на процесс их восприятия:

- многообразие, слабый контраст и малые размеры объектов, изображения которых подлежат дешифрированию;

- изменчивость свойств изображений одного и того же объекта в зависимости от его местоположения, сезона, времени суток, условий наблюдения, наличия маскировки и т.д.;

- многовариантность сочетаний взаимного расположения изображений объектов и высокая степень их сходства друг с другом;

- наличие помех – фоновых неоднородностей, окружающих объекты, а также шумов, накладывающихся на изображения;

- возникновение искажений, связанных с дискретизацией изображений, взаимным перемещением поля зрения ТВП и объекта в процессе наблюдения, вызванным, в частности, вибрацией платформы или эволюциями носителя, тенями, в том числе тепловыми, вариациями освещенности местности и т.д.;

- появление в ряде случаев на изображениях свойств, отсутствующих у объектов (артефактов изображений), и, наоборот, невоспроизведение на изображениях отдельных демаскирующих признаков объектов;

- нетрадиционность форм представления изображений и дефицит времени их дешифрирования.

Типовой алгоритм принятия оператором того или иного решения при дешифрировании изображений соответствует иерархии задач вскрытия объекта и принципу «послойной» обработки изображений, выполняемой оператором в ходе выдвигаемых им гипотез об особенностях изображения фоно-целевого сюжета, в результате чего объект последовательно относится к одной из категорий, например к классу, подклассу и типу. Так как процесс дешифрирования изображений является существенно вероятностным, необходимым его этапом является экспертная, статистическая оценка вероятности вскрытия объектов по их тепловизионным изображениям с привлечением группы операторов-дешифровщиков. При этом любые манипуляции с данной оценкой должны производиться с учетом следующих рассматриваемых ниже факторов, которые традиционными методиками испытаний ТВП по существу игнорируются.

Поскольку оценка вероятности вскрытия объектов, как правило, отличается от ее истинного значения, для повышения точности и достоверности полученных оценок данной вероятности идут по пути увеличения как числа операторов, так и числа изображений объектов. Увеличение числа операторов является основным способом достижения этой цели, ибо суждения операторов по каждому предъявляемому им изображению, определяемые их квалификацией, психофизическим состоянием, вниманием, мотивацией, усталостью и эмоциональным настроем на момент дешифрирования [2], индивидуальны и случайны и являются независимыми (при исключении возможности взаимных консультаций операторов). Однако решения каждого оператора по различным изображениям одного и того же объекта, принятые, например, в разное время и при различных состояниях объекта и условиях его наблюдения, в той или иной степени коррелированны, поэтому вариации данных решений обычно меньше, и отмеченное обстоятельство создает ложное впечатление о высокой достоверности получаемой при этом оценки вероятности вскрытия объекта. Так, путем статистического моделирования визуального дешифрирования изображений найдено, что, например, погрешность оценки вероятности вскрытия объекта, полученная по результатам дешифрирования тридцатью операторами десяти его различных изображений в ~2 раза больше, чем погрешность, соответствующая дешифрированию десятью операторами тридцати изображений этого объекта, поэтому количество изображений объекта и число операторов отнюдь не взаимозаменяемы и состав последних в любом случае должен быть не менее 6-8 [6]. С другой стороны, экспериментально установлено, что перемещение одного и того же объекта на другие участки неоднородного фона делает соответствующие попытки его обнаружения (выделения из фона) одним и тем же оператором практически независимыми [7]. При распознавании объекта такая независимость, по-видимому, отсутствует, хотя и в этом случае имеет место некоторое влияние сильно структурированного фона на соответствующую вероятность вскрытия объекта.

Число операторов (а при независимости суждений одного и того же оператора по разным изображениям – произведение этого числа на количество изображений), которым следует предъявлять для дешифрирования изображения объектов, зависит от вероятности вскрытия (априори неизвестной) объектов, доверительного интервала для этой вероятности и самой доверительной вероятности.

В задаче экспертной оценки дальности действия ТВП имеет значение доверительная вероятность $R(P \ge P_1)$ того, что объективно существующая, но принципиально неизвестная – даже после большого (но конечного) числа испытаний – вероятность вскрытия P зачетного объекта по его прямым демаскирующим признакам не меньше требуемого значения P_1 . Именно доверительная вероятность $R(P \ge P_1)$ и является мерой достоверности получаемых экспертных оценок дальности действия. При

этом требуемая вероятность вскрытия объектов P_1 , находящихся на некоторой дистанции D_1 (эта дистанция и подлежит установлению в процессе пересчета), в нормированных условиях обычно составляет $P_1 = 0.8$ [1].

Рассмотрим особенности экспертной оценки вероятности распознавания объектов, которая, в отличие от оценки вероятности их обнаружения, практически не зависит от степени неоднородности фона и, следовательно, является гораздо более определенной. Под распознаванием объекта, как правило, понимается отнесение его к определенной категории - классу или типу (при решении задачи классификации или идентификации соответственно) на основе анализа прямых демаскирующих признаков этого объекта (контраста, формы, размеров и др.), выявляемых на изображении, дешифровочных признаков изображения. При этом важно исключить возможность получения операторами априорной информации об объекте, что достигается за счет поочередного предъявления операторам изображений объектов из определенного, известного им набора (алфавита) объектов различных категорий, в числе которых находится и зачетный объект. Порядок предъявления объектов и их ракурсы наблюдения операторам заранее неизвестны. Следует отметить, что нередкие рекомендации по предъявлению операторам изображений сразу всей группы объектов, одновременно попадающих в поле зрения ТВП, приводят к завышению оценки вероятности вскрытия, поскольку решения операторов по зачетному объекту будут зависеть от их решений по остальным объектам, если они легче распознаются. Поэтому классическая процедура оценки вероятности многоальтернативного распознавания предусматривает, что каждому из задействованных при испытаниях операторов-дешифровщиков последовательно в случайном порядке предъявляются изображения тест-объектов n различных категорий, имеющих близкие друг к другу размеры и тепловой контраст. Условия дешифрирования изображений (их контраст, зашумленность, увеличение) выбираются операторами по своему усмотрению, а время дешифрирования в статическом режиме работы ТВП, для которого оценивается дальность действия, не ограничивается. Операторы могут использовать любой, наиболее продуктивный в каждом данном случае критерий распознавания, основывающийся на анализе прямых демаскирующих признаков объекта (например, выявление общей формы, контура объекта или наличия его отдельных характерных элементов). При этом операторы всегда должны давать тот или иной ответ, даже если они в нем не уверены. Для облегчения технической реализации данной процедуры изображения объектов, соответствующие различным дистанциям до них, могут быть получены и зафиксированы заранее, и в этом случае их дешифрирование может происходить в камеральных условиях. Тогда если число правильных результатов дешифрирования изображений зачетного объекта составляет *п* при общем числе их предъявлений n_{Σ} , то экспертная оценка P_{Σ}^{*} вероятности его распознавания (частость распознавания) определится формулой: $P_{\Sigma}^{\ *} = n/n_{\Sigma}$.

Однако полученная оценка P_{Σ}^{*} не отражает следующих важных обстоятельств. Во-первых, при использовании обычного в практике военного дешифрирования изображений критерия вскрытия объектов «правильное решение оператора» (вероятность которого нередко ошибочно отождествляется с самой вероятностью вскрытия объекта) молчаливо подразумевается, что при распознавании объектов суждения операторов, как правило, основываются не только на анализе изображения объектов, но и, возможно неосознанно, на простом угадывании. Если принять, что испытательный тест не смещен, т.е. изображения объектов всех *n* категорий предъявляются операторам в среднем одинаково часто, то вероятность такого угадывания равна $P_{v} = 1/n_{o}$. Во-вторых, не все задействованные на испытаниях операторы являются достаточно квалифицированными, особенно с привлечением большой их группы. Кроме того, даже хорошо тренированные, добросовестные операторы могут допустить при дешифрировании грубые ошибки (промахи), никак не связанные ни с качеством изображений, ни с опытом или степенью мотивации этих операторов. Все это означает, что результирующая вероятность распознавания объекта при испытаниях ТВП, согласно формуле для вероятности суммы совместных событий [8], составляет:

$$P_{\Sigma} = P_{y} + (1 - P_{y})P_{\kappa}P, \qquad (1)$$

где $P_{\rm k}$ – вероятность того, что любой данный оператор достаточно квалифицирован и не совершает промахов; P – вероятность того, что квалифицированный и не совершающий промахов оператор распознает объект по его изображению; именно эта вероятность и является предметом оценки при испытаниях ТВП.

Для определения вероятности P_{κ} необходимо выполнить специальный отбор операторов, учитывающий остроту зрения, контрастную чувствительность и другие профессионально значимые качества операторов с точки зрения их способности извлекать информацию из предъявляемых им изображений, для чего следует провести серию дополнительных экспериментов, а именно представить данной группе операторов изображения тех же самых тест-объектов, но находящихся на достаточно близком расстоянии, таком, что заведомо выполняется условие P = 1, и получить экспертную оценку $P_{_{\Sigma 0}}^{~*}$ соответствующей результирующей вероятности распознавания *P*₅₀, равной, согласно (1),

$$P_{\Sigma 0} = P_{\rm y} + (1 - P_{\rm y}) P_{\rm \kappa}$$
 (2)

Выделяя из формулы (2) значение P_{κ} , и подставляя его в (1), находим:

$$P_{\Sigma} = P_{y} + (P_{\Sigma 0} - P_{y})P, \qquad (3)$$

откуда получаем выражения для искомой вероятности *P* и ее оценки *P*^{*} [2]:

$$P = \frac{P_{\Sigma} - P_{y}}{P_{\Sigma 0} - P_{y}}; P^{*} = \frac{P_{\Sigma}^{*} - P_{y}}{P_{\Sigma 0}^{*} - P_{y}}.$$

Именно последняя формула и рекомендуется для «очищения» полученной при испытаниях ТВП экспертной оценки P_{Σ}^{*} результирующей вероятности распознавания объектов P_{Σ} от рассмотренных побочных эффектов. При этом значение $P_{\Sigma0}^{*}$ должно быть не менее 0,95, в противном случае операторы либо не допускаются к работе, либо проходят дополнительное

обучение, например, с использованием специальных тренажеров.

Описанная процедура обеспечивает минимальную субъективность получаемых результатов аттестации, обусловленную сугубо индивидуальными особенностями восприятия операторами формы и других демаскирующих признаков объекта при его распознавании, и, следовательно, снижает или вообще исключает возможность расхождения выводов представителей разработчика и заказчика ТВП по этим результатам, нередко являющимся предметом острых разногласий.

Для получения сопоставимых оценок дальности действия ТВП отечественного и зарубежного производства алфавиты тестобъектов при их распознавании должны быть идентичными. Поэтому следует учитывать, что за рубежом, в частности в Центре ночного видения и электронных датчиков (NVESD, США), для экспериментов по классификации объектов принят алфавит из трех тест-объектов: танк, бронетранспортер и грузовая автомашина, имеющие близкие размеры и тепловые контрасты и приблизительно в равной степени отличающиеся друг от друга по форме. Применительно к задаче идентификации там же разработан «золотой стандарт» из 12 тестобъектов – образцов российской и зарубежной бронетанковой техники, ориентированных к наблюдателю под двенадцатью различными ракурсами, и, для упрощения и ускорения аттестации, «серебряный стандарт», состоящий из 8 тест-объектов, наблюдаемых под тремя ракурсами (БМП-1, Т-62, Т-72, 2S3, М2А2, M109A5, M60A3, M113) [9].

В связи с ростом в последние годы в мире актов терроризма и насилия повысилась значимость соответствующих исследований по оценке эффективности ТВП, в частности тепловизионных прицелов, по отношению к объекту-человеку для установления степени потенциально исходящей от него угрозы. Поэтому в том же Центре для испытаний ТВП в качестве одного из вариантов используется алфавит из 10 распознаваемых типов предметов в руках человека, имеющих близкие размеры и форму: винтовка М16, автомат АК-47, винтовка СВД, гранатомет РПГ, ручной пулемет РПК, топор, метла, труба, лопата и палка [10]. При этом классификация подразумевает установление одного из двух классов данных предметов – оружие или не оружие (орудие труда), – а идентификация – их типа.

Из изложенного вытекает, что доверительная вероятность $R(P \ge P_1)$ совпадает с доверительной вероятностью $R(P_{\Sigma} \ge P_{\Sigma 1})$, где, по (3),

$$P_{\Sigma 1} = P_{y} + (P_{\Sigma 0} - P_{y})P_{1}.$$
 (4)

Аналогично рассчитывается доверительная вероятность $R(P \ge P_1)$ при оценке дальности обнаружения объектов с априори неизвестным местоположением с тем лишь очевидным отличием, что, поскольку слишком большое число ложных обнаружений недопустимо, в данном случае вероятность угадывания $P_v = 0$.

Согласно работе [11], доверительная вероятность $R = R(P_{\Sigma} \ge P_{\Sigma 1})$ того, что $P_{\Sigma} \ge P_{\Sigma 1}$, если в n_{Σ} независимых испытаниях получено n положительных результатов, равна вероятности того, что в $n_{\Sigma} + 1$ испытаниях при вероятности положительного исхода единичного испытания $P_{\Sigma 1}$ будет получено не более n положительных результатов. Это позволяет для расчета R воспользоваться формулой для биномиального распределения:

$$R = \sum_{i=0}^{n} C_{n_{\Sigma}+1}^{i} P_{\Sigma_{1}}^{i} \left(1 - P_{\Sigma_{1}}\right)^{n_{\Sigma}+1-i} .$$
 (5)

В частности, когда все попытки дешифрирования изображений оказались успешными (*n* = *n*_x), выражение (5) принимает вид [11]:

$$R = 1 - P_{\Sigma 1}^{n_{\Sigma} + 1} \quad . \tag{6}$$

Соответственно в случае безуспешного дешифрирования (*n* = 0) имеем:

$$R = P_{\Sigma 1}^{n_{\Sigma}+1} \qquad (7)$$

Для $P_{\Sigma 1} \ge 0.8$ вместо (5) применима пуассоновская аппроксимация [8]:

$$R = \Psi(n_{\Sigma} - n + 1, (n_{\Sigma} + 1)(1 - P_{\Sigma 1}));$$

$$\Psi(x, \mu) = \sum_{i=x}^{\infty} \frac{e^{-\mu}\mu^{i}}{i!},$$
(8)

где $\Psi(x, \mu)$ – функция, табулированная, например, в [8]. При значении $P_{\Sigma 1}$, находящемся в пределах $0,2 \leq P_{\Sigma 1} \leq 0,8$, и $n_{\Sigma} \geq 5$ для оценки доверительной вероятности $R = R(P_{\Sigma} \geq P_{\Sigma 1})$ допу-

стимо использовать гауссовское приближение, которое тем точнее, чем больше n_{Σ} [8]:

$$R = \frac{1}{2} \left[1 + \Phi(y) \right]; \quad y = \frac{n + 0.5 - P_{\Sigma 1} \left(1 + n_{\Sigma} \right)}{\sqrt{P_{\Sigma 1} \left(1 + n_{\Sigma} \right) \left(1 - P_{\Sigma 1} \right)}}; \tag{9}$$
$$\Phi(y) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{y} \exp(-t^{2}/2) dt \approx \sqrt{1 - \exp(-0.63y^{2})} ,$$

где $\Phi(y)$ – интеграл вероятности и его аппроксимация (для $y \ge 0$).

Отсюда следует, что если, например, при распознавании зачетного объекта в группе объектов трех возможных категорий он был правильно распознан в 9 случаях из 10 (что отвечает оценке вероятности распознавания $P_{s}^{*} = 0,9$), то с доверительной вероятностью, равной лишь $R(P_{\Sigma} \ge P_{\Sigma 1}) = 0,57$, можно утверждать, что результирующая вероятность распознавания $P_{\rm y}$ данного объекта в данных условиях не меньше определяемой по (4) нижней границы доверительного интервала $P_{\Sigma 1}$ = 0,33+(0,95-0,33)0,8 = 0,83 или что искомая вероятность его распознавания Р не ниже требуемого значения $P_1 = 0, 8.$ Для обеспечения минимально приемлемого уровня доверительной вероятности R = 0.8 (выбор этого уровня строго обоснован быть не может, он определяется исключительно из эвристических соображений - имеющегося опыта, здравого смысла и интуиции [8]) требуется, чтобы данный объект был распознан во всех десяти попытках, т.е. при оценке $P_{\Sigma}^{*} = 1$, что, по (6), дает доверительную вероятность $R(P_{\Sigma} \ge 0.83) = R(P \ge 0.8) = 0.87.$

Из формул (5), (6) вытекает, что минимальное число испытаний $n_{\Sigma \min}$, необходимое для обеспечения заданной доверительной вероятности $R(P_{\Sigma} \geq P_{\Sigma 1})$, достигается при реализации критерия вскрытия $P_{\Sigma}^{*} = n_{\Sigma}/n_{\Sigma}$, и оно составляет:

$$n_{\Sigma\min} = \operatorname{int}(\ln(1-R)/\ln P_{\Sigma 1}), \quad (10)$$

где int(x) – целая часть x.

Поскольку доля успешных попыток вскрытия объектов $P_{\Sigma}^{\ *} = n/n_{\Sigma}$ до начала испытаний (процедуры дешифрирования изображений) неизвестна, определить априори требуемое число n_{Σ} этих попыток принципиально невозможно;

по формуле (10) можно рассчитать лишь минимально необходимое их количество, т.е. оценку снизу. Поэтому рекомендуется производить расчет значения *R* по формуле (5) или (6) после каждого испытания или малой серии испытаний до тех пор, пока значение доверительной вероятности *R* не достигнет минимально приемлемого уровня.

Анализ формулы (5) показывает, что для снижения числа испытаний n_{Σ} при фиксированной доверительной вероятности R или же повышения доверительной вероятности R при фиксированном числе испытаний n_{Σ} целесообразно увеличить дистанцию до объекта до такой величины D_2 , чтобы ей отвечала нижняя граница доверительного интервала P_2 , близкая к 0,5 [2]. Тогда, получив для этой новой дистанции D_2 достаточно высокое значение $R(P_{\Sigma} \ge P_{\Sigma 2}) = R(P \ge P_2)$, где, аналогично (4),

$$P_{\Sigma 2} = P_{y} + (P_{\Sigma 0} - P_{y})P_{2}, \qquad (11)$$

можно утверждать, что доверительная вероятность $R(P_{\Sigma} \ge P_{\Sigma 1}) = R(P \ge P_1)$ для первоначальной дистанции D_1 до объекта также высока. При этом фактические условия испытаний (тепловой контраст объектов, метеоусловия), соответствующие дистанции D_2 , в общем случае отличаются от нормированных, для которых, как правило, и определяется дальность действия ТВП.

Очевидно, при неограниченном увеличении числа испытаний $(n_{\Sigma} \rightarrow \infty)$ доверительная вероятность $R(P_{\Sigma} \ge P_{\Sigma 2})$ принимает значения:

$$R(P_{\Sigma} \ge P_{\Sigma 2}) = \begin{cases} 1 & \text{при } P_{\Sigma}^* \ge P_{\Sigma 2}; \\ 0 & \text{при } P_{\Sigma}^* < P_{\Sigma 2}. \end{cases}$$

Следовательно, если оценка вероятности вскрытия объекта превосходит требуемый уровень, то лишь при теоретически бесконечном числе испытаний можно с абсолютной уверенностью утверждать, что сама вероятность вскрытия также выше этого уровня. стью $R = R(P_{\Sigma} \ge P_{\Sigma 2})$, для любых значений n и n_{Σ} можно рассчитать по формуле, вытекающей из квадратного уравнения (9) при формальной замене в нем $P_{\Sigma 1}$ на $P_{\Sigma 2}$, соответствующую нижнюю границу $P_{\Sigma 2}$ доверительного интервала для результирующей вероятности вскрытия объекта:

Тогда, задавшись доверительной вероятно-

$$P_{\Sigma 2} = \left(b - \sqrt{b^2 - 4ac}\right)/2a; \quad a = (1 + n_{\Sigma})^2 + y^2(1 + n_{\Sigma}); \quad b = (1 + n_{\Sigma})(2n + 1 + y^2); \quad (12)$$
$$c = (n + 0.5)^2; \quad y = 1.25\sqrt{-\ln(1 - (2R - 1)^2)}.$$

Из (12), в частности, следует, что при неограниченном числе испытаний значение $P_{\Sigma 2}$ равно оценке вероятности вскрытия объекта $P_{\Sigma}^{*} = n/n_{\Sigma}$ для любой доверительной вероятности R, а поскольку при этом доверительный интервал для вероятности вскрытия сужается до нуля, оно совпадает с самой результирующей вероятностью вскрытия.

Необходимые для пересчета значения $P_{\Sigma 2}$, соответствующие типовым доверительным вероятностям R = 0.8, 0.9 и 0.95 при $n_{\Sigma} \le 20$, можно также найти по табл. 1, полученной путем

решения точного уравнения (5) – при формальной замене в нем $P_{_{\Sigma1}}$ на $P_{_{\Sigma2}}$ – для ряда значений оценки $P_{_{\Sigma}}^{\ *}.$

Соответствующая нижняя граница P_2 доверительного интервала для самой вероятности вскрытия объекта, по (11), составляет:

$$P_2 = (P_{\Sigma 2} - P_y) / (P_{\Sigma 0} - P_y).$$
(13)

Согласно [1,12], для вероятности вскрытия объекта P_i по его изображению, отвечающей дистанции D_i , км, имеет место эмпирическая формула:

$$P_{i} = 1 - \exp\left[-0.7(N_{i}\gamma/2C)^{2}\right]; \ N_{i} = h/A_{i}; \ A_{i} = D_{i}\delta/2z_{i}; \ z_{i} = v_{i}\delta; \ i = \overline{1,2},$$
(14)

где C – критерий Джонсона, отвечающий решаемой задаче вскрытия; h – критический размер объекта (корень квадратный из его видимой площади), м; A_i – разрешение на местности (полупериод эквивалентной тепловой миры, разрешаемой с вероятностью 0,5), м; v_i – угловая частота миры, мрад⁻¹; z_i – относительная частота миры; δ – эффективное значение элементарного поля зрения ТВП, мрад; $\gamma = 0,65$ -1,5 – показатель квалификации оператора (от низкой до высокой соответственно).

При практическом использовании ТВП оператор подбирает, путем регулирования коэффициента усиления видеосигналов, такой контраст изображения, чтобы, для обеспечения возможности наблюдения объекта и его окружения, приведенные к ТВП разность радиационных температур объекта и фона и вариации радиационной температуры близлежащего фона вписывались в диапазон регистрируемой разности температур, причем данный контраст должен быть по возможности большим, чтобы на изображении был заметен шум - тогда достигается максимальная температурная чувствительность прибора и он работает в шумо-ограниченном режиме, характерном для ТВП с низкой или средней пороговой чувствительностью. Если же видимый шум отсутствует, что обычно имеет место для современных высокочувствительных ТВП (имеющих достаточно малую разность температур, эквивалентную шуму), то дальность действия этих ТВП по существу ограничивается контрастной чувствительностью зрительного анализатора оператора и они функционируют в контрастно-ограниченном режиме.

Обычно нормированные условия испытаний ТВП регламентируют расположение объекта на квазиоднородном фоне (например, зеленый луг) и его наблюдение в темное время суток. При этом ТВП может работать, в зависимости от конкретного сочетания его пороговой чувствительности, теплового контраста объекта, вариаций радиационной температуры фоновых неоднородностей, наличия и использования автоматической регулировки усиления видеосигналов и условий дешифрирования изображения, как в шумо-ограниченном, так и в контрастно-ограниченном режиме.

Для шумо-ограниченных ТВП относительная частота миры z_i в (14) находится из относительной температурно-частотной характеристики ТВП $E_1(z_i)$, наиболее простая аппроксимация которой, соответствующая допущению о пренебрежимо малом влиянии на нее ограниченной контрастной чувствительности зрительного анализатора оператора, имеет вид [1,12]:

$$|\Delta T_{Ri}|\tau_{ai}r\alpha/\Delta T_{i} = \psi \max(0,3; 3z_{i}/K(z_{i})) = E_{1}(z_{i}); K(z_{i}) = \exp(-2\pi^{2}\rho^{2}z_{i}^{2});$$
(15)
$$r = \sqrt{[1 + \exp(-1/FT_{r\pi})]/[1 - \exp(-1/FT_{r\pi})]}; T_{r\pi} = 0,019 + 0,051/L^{0,17},$$

где ΔT_{R_i} – разность радиационных температур объекта и фона, К, соответствующая условиям испытаний ТВП с дистанции D_i; ΔT_i – разность температур, эквивалентная шуму, К, для температуры фона Т,, К, соответствующая тем же условиям испытаний; τ_{ai} – коэффициент пропускания атмосферы в спектральном рабочем диапазоне на трассе длиной D_i ; r – коэффициент, учитывающий временное накопление визуальных сигналов в смежных кадрах ТВП; F – частота кадров, Γ ц; T_{rr} – постоянная времени глаза, с; L' – яркость изображения фона, кд/м², зависящая от условий наблюдения изображения (при дешифрировании изображения в темноте L' = 0,3-1 кд/м², в полутьме L' = 3-30 кд/ M^{2} , на свету $L' = 100 \text{ кд/м}^{2}$); α – число выборок на пиксел (элемент разложения): для ТВП без микросканирования α = 1, с четырехпозиционным микросканированием $\alpha = 2$; $K(z_i) - функ$ ция передачи модуляции ТВП и ее гауссовская аппроксимация с параметром ρ = 0,55; ψ – поправочный коэффициент, учитывающий различие длины полос стандартной и эквивалентной миры. При $z_i = 0,75$ функция $E_1(z_i)$ практически параллельна оси ординат.

Принимая, что для современных высокочувствительных ТВП рабочей является высокочастотная ветвь температурно-частотной характеристики, которой отвечает сравнительно небольшая длина изображения полос этих мир, не превышающая пределов области пространственного интегрирования визуальных сигналов глазом оператора, и учитывая, что длина полос стандартной миры с соотношением длины и ширины полосы 7:1 составляет $7A_i$, а эквивалентной миры – h, коэффициент ψ , согласно [1], равен $\psi = (7A_i/h)^{1/2} = (7D_i/2v_ih)^{1/2} = (7D_i\delta/2z_ih)^{1/2}$. Тогда, используя достаточно хорошее приближение $\max(0,3; 3z_i^{0.5}/K(z_i)) \approx 0.3\exp(7z_i)$, из (15) получаем выражение для z_i :

$$z_{i} = 0,14 \ln\left(1,78 \left| \Delta T_{Ri} \right| \tau_{ai} r \alpha \sqrt{h} \left/ \Delta T_{i} \sqrt{D_{i} \delta} \right). (16)$$

Значения разности температур, эквивалентной шуму ΔT_i , могут быть рассчитаны, например, по методикам [1] на основе паспортной величины этой разности ΔT_0 , определенной для некоторой температуры фона T_0 , обычно 295 К. В частности, при работе квантового матричного фотоприемника ТВП в режиме ограниченыя фоном в случае, когда значения ΔT_i ограничены емкостью потенциальной ямы устройства считывания, – для современных высокочувствительных несканирующих ТВП данные условия обычно выполняются, – согласно результатам [13], справедлива простая формула:

$$\Delta T_i = \Delta T_0 (T_i / T_0)^2 . \tag{17}$$

Из выражений (14), (16) следует, что соотношение значений D_1 и D_2 , имеющих смысл нижних границ доверительного интервала для дальности действия ТВП в нормированных и фактических условиях испытаний соответственно, имеет вид:

$$D_1 z_2 / D_2 z_1 = Q; \quad Q = \sqrt{\ln(1 - P_2) / \ln(1 - P_1)}.$$
 (18)

Тогда, с учетом (16), задача пересчета сводится к нахождению нижней границы D_1 доверительного интервала для дальности действия ТВП из уравнения:

$$D_{1} = \frac{QD_{2}\ln\left(1,78|\Delta T_{R1}|\tau_{a1}r\alpha\sqrt{h}/\Delta T_{1}\sqrt{D_{1}\delta}\right)}{\ln\left(1,78|\Delta T_{R2}|\tau_{a2}r\alpha\sqrt{h}/\Delta T_{2}\sqrt{D_{2}\delta}\right)}$$
(19)

Поскольку методические (систематические) погрешности оценки коэффициентов пропускания атмосферы τ_{a1} и τ_{a2} в нормированных и фактических условиях испытаний однополярны и, как видно из (19), сравнительно слабо влияют на результат пересчета, значение τ_{ai} в спектральных рабочих диапазонах ТВП 3-5 и 8-12 мкм для наклонных трасс, когда объект находится на земле, а ТВП – на высоте H, км (или наоборот), допустимо оценивать по следующей приближенной формуле [1]:

$$\begin{aligned} \tau_{ai} &= \exp[-(L_{pi} + L_{ni})]; \ L_{pi} = \sigma_{pi}K_{pi}D_{i}; \ L_{ni} = \begin{cases} \sigma_{ni}\sqrt{K_{ni}D_{i}} & (3 - 5 \text{ MKM}); \\ \sigma_{ni}K_{ni}D_{i} & (8 - 12 \text{ MKM}); \end{cases} \end{aligned}$$
(20)
$$\sigma_{pi} &= \begin{cases} (2,26 - 0,49 \ln S_{Mi})/S_{Mi} & (3 - 5 \text{ MKM}); \\ (1,66 - 0,35 \ln S_{Mi})/S_{Mi} & (8 - 12 \text{ MKM}); \end{cases} \\\sigma_{ni} &= \begin{cases} 0,15 \ln(W_{i}/217) + 1,2 & (3 - 5 \text{ MKM}); \\ 0,05 + 0,015W_{i} & (8 - 12 \text{ MKM}); \end{cases} \\K_{pi} &= h_{poi}[1 - \exp(-H/h_{poi})]/H; \ K_{ni} &= h_{noi}[1 - \exp(-H/h_{noi})]/H; \end{cases} \\h_{poi} &= 0,78 + 0,038S_{Mi}; \ h_{noi} &= 2,2 \text{ KM}; \end{cases} \end{cases} \end{aligned}$$

где $L_{{}_{\mathrm{p}i}}, L_{{}_{\mathrm{n}i}}$ – оптическая толщина атмосферы, обусловленная аэрозольным рассеянием и поглощением излучения парами воды соответственно; σ_{ni} , σ_{ni} – показатели аэрозольного рассеяния и поглощения излучения парами воды соответственно; $S_{\scriptscriptstyle Mi}$ – метеорологическая дальность видимости, км; W_i – абсолютная влажность воздуха в приземном слое атмосферы, г/м³; $K_{{}_{\mathrm{n}i}}$, - коэффициенты приведения наклонной трассы к эквивалентной приземной горизонтальной по соответствующим факторам ослабления излучения (для горизонтальных приземных трасс, когда H = 0, коэффициенты $K_{{}_{\mathrm{p}i}}\!=\!K_{{}_{\mathrm{n}i}}\!=\!1$); $h_{{}_{\mathrm{p}oi}},h_{{}_{\mathrm{n}oi}}$ – параметры экспоненциальной аппроксимации вертикальных профилей показателей аэрозольного рассеяния и поглощения излучения парами воды соответственно, км; $f_{_{\rm OTHi}}$ – относительная влажность воздуха, %; t_{ві} – температура приземного воздуха, °С.

В частности, при больших отношениях сигнал/шум, характерных для современных высокочувствительных ТВП, когда $z_i = 0,75$, конкретные значения разности радиационных температур объекта и фона, разности температур, эквивалентной шуму, и коэффициента пропускания атмосферы уже роли не играют, и тогда, по (18), получаем: $D_1 = QD_2$.

В качестве нормированного значения метеорологической дальности видимости может служить наиболее вероятное для летнего сезона европейской части России значение $S_{_{\rm M1}} = 17$ км, а температуры воздуха и его относительной влажности – $t_{_{\rm B1}} = 17^{\rm o}{\rm C}$ и $f_{_{\rm OTH1}} = 75\%$ соответственно, которым отвечает абсолютная влажность воздуха, весьма близкая к наиболее вероятному для лета значению $W_1 = 10$ г/м³ [1]. В качестве нормированной температуры фона можно принять, например, значение $T_1 = 288$ К, характерное для теплого времени года, а

нормированного теплового контраста объекта

– также типовую величину [1] $\Delta T_{R1} = 2$ К.

Выбранным нормированным значениям метеорологических параметров $S_{_{\rm M1}}$, $t_{_{\rm B1}}$ и $f_{_{\rm OTH}}$ отвечает, согласно [1], показатель ослабления излучения в атмосфере на приземных горизонтальных трассах в спектральном диапазоне 8-12 мкм, равный 0,2 км⁻¹, который, как и принятые выше значения $\Delta T_{_{R1}}$ и $T_{_1}$, соответствует условиям натурных испытаний ТВП, регламентированным стандартом НАТО STANAG 4347 Definition of nominal static range performance for thermal imaging systems, 1995 [14], что обеспечивает возможность получения сопоставимых оценок дальности действия ТВП.

Относительная температурно-частотная характеристика $E_2(z_i)$ для контрастно-ограниченных ТВП существенно определяется функцией порогового контраста M(v') – зависимостью минимального обнаруживаемого оператором контраста изображения разрешаемой синусоидальной миры от ее угловой

частоты. Связь угловой частоты v', град-1, в пространстве изображений с соответствующей угловой частотой v, мрад-1, в пространстве предметов определяется соотношением $v' = 17,45v/\Gamma$, где Γ – видимое увеличение ТВП – отношение угловых размеров изображения объекта и самого объекта. Для рабочего интервала угловых частот v' = 3-15 град⁻¹, отвечающего оптимальному видимому увеличению ТВП, зависимость *М*(v') достаточно хорошо аппроксимируется выражением M(v') $= \mu_i \exp(\xi_i v^2)$ с параметрами μ_i и ξ_i , зависящими от углового размера изображения миры $w_{i}^{\,\prime}$, град, равного $w_{i}^{\,\prime} = h\Gamma/17,\!45D_{i}$, и яркости изображения фона L', кд/м² [12]. Зависимости $\mu_i = f(w_i')$ и $\xi_i = f(w_i')$ для типовых значений L', отвечающих дешифрированию изображения в темноте, полутьме и на свету, приведены в табл. 2. Тогда соответствующая температурно-частотная характеристика $E_2(z_i)$ может быть записана в виде [12]:

$$\Delta T_{Ri} \tau_{ai} K_{mi} / \Delta T_{mi} = (\pi/4) \mu_i \exp[(305\xi_i / (\Gamma\delta)^2 + 5,97) z_i^2] = E_2(z_i);$$

$$K_{mi} = (L'_{2i} - L'_{1i}) / (L'_{2i} + L'_{1i}) ,$$

где ΔT_{mi} – диапазон регистрируемой разности температур, К, определяемый рабочим диапазоном яркости монитора $\Delta L'_{mi} = L'_{2i} - L'_{1i'}$ кд/м²; K_{mi} – коэффициент сохранения контраста для протяженного объекта, при $L'_{2i} >> L'_{1i}$ близкий к 1.

При измерении и контроле дальности действия ТВП местоположение объекта, как правило, известно, поэтому оператор имеет возможность реализовать, путем изменения коэффициента усиления видеосигналов, оптимальный контраст изображения объекта, равный 0,5 (что отвечает условию $\Delta T_{mi} = 2 |\Delta T_{Ri}| \tau_{ai}$, при этом разность яркостей изображения объекта и фона занимает половину рабочего диапазона яркости монитора). Тогда, учитывая приближенное соотношение $\Gamma \delta = \alpha \delta_0 Z$, где $\delta_0 - y$ гловой размер элемента изображения, соответствующий элементарному полю зрения (обычно $\delta_0 = 0,8-1$ мрад), а Z – электронное увеличение изображения, относительная частота миры z_i составляет

$$z_i = \sqrt{\ln(0.64K_{mi}/\mu_i)/(305\xi_i/(\alpha\delta'_0 Z)^2 + 5.97)}$$

и от конкретных значений теплового контраста объекта ΔT_{Ri} и коэффициента пропускания атмосферы τ_{ai} уже не зависит. Следовательно, в данном случае отличие фактических погодных условий, определяющих величины ΔT_{Ri} и τ_{ai} от нормированных, вообще говоря, значения не

имеет и пересчет результатов испытаний ТВП сводится лишь к повышению достоверности этих результатов. Однако требование о пренебрежимо малом влиянии турбулентности атмосферы на результаты испытаний ТВП в фактических условиях их проведения при этом сохраняется.

Нижняя граница D_1 доверительного интервала для дальности действия ТВП здесь находится, с учетом (18), из уравнения

$$D_{1} = \frac{QD_{2}\sqrt{\ln(0,64K_{m1}/\mu_{1})/(305\xi_{1}/(\alpha\delta_{0}'Z)^{2} + 5,97)}}{\sqrt{\ln(0,64K_{m2}/\mu_{2})/(305\xi_{2}/(\alpha\delta_{0}'Z)^{2} + 5,97)}};$$
(21)

$$\mu_i = f(w_i'); \ \xi_i = f(w_i'); \ w_i' = h\Gamma/17,45D_i.$$
⁽²²⁾

Уравнения (19) и (21) приходится решать методом последовательных приближений (достаточно 1-2 итераций). При этом, учитывая вышеизложенное, первоначальное значение D_1 может быть принято равным $D_1^* = QD_2$.

Так как состав экспертной группы операторов, задействованных в испытаниях, и их общий объем, как правило, ограниченны, и, следовательно, точная оценка дальности действия ТВП принципиально невозможна, основной целью совершенствования методологии испытаний ТВП является максимально возможное повышение нижней границы D₁ доверительного интервала для искомой дальности действия прибора, т.е. оценки снизу этой дальности, при условии обеспечения достаточно высокой достоверности результатов испытаний. Поэтому получение экспериментальных оценок дальности ТВП и пересчет результатов испытаний на нормированные условия испытаний рекомендуется вести в следующем порядке:

 определить по наличию или отсутствию на тепловизионном изображении видимого шума режим работы ТВП при наблюдении объектов
 шумо-ограниченный или контрастно-ограниченный;

 установить, согласно изложенной процедуре, для фактических условий испытаний и ряда дистанций до объекта зависимость *P*_Σ^{*} = *n*/*n*_Σ = *f*(*D*₂) экспериментальной оценки результирующей вероятности вскрытия объекта от этой дистанции;

- для выбранной или заданной доверительной вероятности $R = R(P_{\Sigma} \ge P_{\Sigma^2})$ установить, используя формулу (12) или табл. 1, для полученных оценок P_{Σ}^* нижние границы P_{Σ^2} доверительного интервала для результирующей вероятности вскрытия объекта;

- рассчитать по формуле (13) для получен-

ных значений $P_{\Sigma 2}$ соответствующие нижние границы доверительного интервала для самой вероятности вскрытия объекта, выбрать из них значение P_2 , отвечающее некоторой дистанции D_2 , максимально близкое к 0,5 и рассчитать по формуле (19) для нормированного значения P_1 = 0,8 параметр Q;

- для шумо-ограниченного режима:

а) рассчитать по методике, описанной, например, в [1], или, если это оправданно, по формуле (17) значения разности температур, эквивалентной шуму ΔT_1 и ΔT_2 , для нормированных и фактических условий испытаний соответственно;

б) для дистанций $D_1 = D_1^* = QD_2$ и D_2 рассчитать по формуле (20) значения коэффициентов пропускания атмосферы τ_{a1} и τ_{a2} для нормированных и фактических условий испытаний соответственно;

в) для тех же дистанций рассчитать по формуле (19) нижнюю границу D_1 доверительного интервала для дальности действия ТВП в нормированных условиях;

- для контрастно-ограниченного режима:

а) для дистанций $D_1 = D_1^* = QD_2$ и D_2 рассчитать по формуле (22), с использованием табл. 2, параметры μ_1 , ξ_1 и μ_2 , ξ_2 для нормированных и фактических условий испытаний соответственно;

б) для тех же дистанций рассчитать по формуле (21) нижнюю границу D_1 доверительного интервала для дальности действия ТВП в нормированных условиях.

При существенном отличии D_1 от D_1^* может быть выполнена вторая итерация, для чего найденное значение D_1 отождествляется с D_1^* $(D_1^* = D_1)$, и расчет повторяется до получения удовлетворительной сходимости результатов.

Если полученное в итоге значение D_1 пре-

вышает заданную дальность действия ТВП, то делается вывод, что данный ТВП соответствующему требованию вполне достоверно удовлетворяет.

Понятно, что с увеличением числа испытаний n_{Σ} значение D_1 возрастает, стремясь в пределе к искомой дальности действия ТВП в нормированных условиях.

Нередко целью испытаний является не оценка дальности действия ТВП, а лишь контроль реализации требуемого значения D_1 этой дальности в нормированных условиях, и тогда процедура аттестации в ее экспериментальной части упрощается и сводится к следующим действиям:

- для шумо-ограниченного режима:

а) рассчитать аналогично изложенному значения разности температур, эквивалентной шуму ΔT_1 и ΔT_2 , для нормированных и фактических условий испытаний соответственно;

б) для параметра Q = 0,66, отвечающего, по

(18), значениям $P_1 = 0,8$ и $P_2 = 0,5$, рассчитать по формулам (20) для дистанций D_1 и $D_2 = D_2^* = D_1/Q = 1,52D_1$ значения коэффициентов пропускания атмосферы τ_{a1} и τ_{a2} для нормированных и фактических условий испытаний соответственно;

в) для тех же дистанций рассчитать контролируемое значение дальности действия ТВП *D*₂ в фактических условиях испытаний:

$$D_{2} = \frac{D_{1} \ln\left(1,78 \left| \Delta T_{R2} \right| \tau_{a2} r \alpha \sqrt{h} / \Delta T_{2} \sqrt{D_{2} \delta}\right)}{Q \ln\left(1,78 \left| \Delta T_{R1} \right| \tau_{a1} r \alpha \sqrt{h} / \Delta T_{1} \sqrt{D_{1} \delta}\right)};$$

- для контрастно-ограниченного режима:

а) для дистанций D_1 и $D_2 = D_2^* = 1,52D_1$ рассчитать по (22) с использованием табл. 2 параметры μ_1 , ξ_1 и μ_2 , ξ_2 для нормированных и фактических условий испытаний соответственно;

б) для тех же дистанций рассчитать контролируемое значение дальности действия ТВП D_2 в фактических условиях испытаний:

$$D_2 = \frac{D_1 \sqrt{\ln(0.64K_{m_2}/\mu_2)/(305\xi_2/(\alpha\delta_0'Z)^2 + 5.97)}}{Q_1 \sqrt{\ln(0.64K_{m_1}/\mu_1)/(305\xi_1/(\alpha\delta_0'Z)^2 + 5.97)}}$$

Аналогично, при существенном отличии D_2 от D_2^* может быть выполнена вторая итерация, для чего полученные значения D_2 отождествляются с D_2^* ($D_2^* = D_2$), и расчет повторяется до получения удовлетворительной сходимости результатов. Далее следует:

- для дистанции до объекта D_2 установить значение ${P_{\Sigma}}^*=n/n_{\Sigma}$ экспериментальной оценки вероятности вскрытия объекта;

- рассчитать по формуле (11) для значения $P_2 = 0,5$ соответствующую нижнюю границу $P_{\Sigma 2}$ доверительного интервала для вероятности вскрытия объекта в фактических условиях испытаний;

- для полученных значений P_{Σ}^{*} и $P_{\Sigma 2}$ рассчитать, используя соответствующую формулу (5)-(8), приняв в ней $P_{\Sigma 1} = P_{\Sigma 2}$, – выбор расчетной формулы зависит от конкретной ситуации – доверительную вероятность $R = R(P_{\Sigma} \ge P_{\Sigma 2})$; если вероятность R превышает выбранное минимально допустимое значение, то делается вывод, что дальность действия ТВП в

нормированных условиях не меньше требуемого значения D_1 , соответствующего заданной вероятности вскрытия объекта $P_1 = 0.8$.

Пример. Для наземного ТВП на квантовом фотоприемнике (спектральный рабочий диапазон 8-12 мкм, паспортная разность температур, эквивалентная шуму ΔT_0 = 0,15 К, эффективное значение элементарного поля зрения δ = 0,1 мрад, частота кадров *F* = 25 Гц, микросканирование отсутствует) - требуется определить дальность классификации танка с критическим размером h = 3 м в нормированных условиях (температура воздуха $t_{\rm B1}$ = 17°C, относительная влажность $f_{\text{отн1}}$ = 75 %, метеорологическая дальность видимости $S_{\rm M1}$ = 17 км, разность радиационных температур объекта и фона ΔT_{R1} = 2 К, температура фона T_1 = 288 К, требуемая вероятность классификации P_1 = 0,8). Испытания ТВП проводятся в шумо-ограниченном режиме работы при следующих условиях: $t_{\rm B2}$ = 10°C, $f_{\rm OTH2}$ = 90 %, $S_{\rm M2}$ = 20 км, ΔT_{R2} = 1 К; Т₂ = 280 К, при этом число распознаваемых классов объектов $n_0 = 3$, а число независимых попыток классификации $n_{\Sigma} = 12$. Расчет проводим в следующем порядке:

Для фактических условий испытаний экспериментально устанавливаем дискретную зависимость $P_{\Sigma}^{*} = n/n_{\Sigma} = f(D_{2})$ оценки вероятности классификации танка от дистанции до него. Задаваясь, например, минимально приемлемым значением доверительной вероятности R = 0,8, выбираем, используя табл. 1, оценку вероятности вскрытия объекта $P_{\Sigma}^{*} = 9/12 =$ 0,75, соответствующую, например, дистанции до объекта D_{γ} = 5 км, которой отвечают нижние границы доверительных интервалов $P_{_{\Sigma^2}}$ = 0,62 и, согласно (13), P2 = 0,47. Далее по (18) для $P_1 = 0,8$ рассчитываем соответствующее значение параметра Q = 0,63, по (17) для T_0 = 295 К – разности температур, эквивалентные шуму, ΔT_1 = 0,14 К и ΔT_2 = 0,13 К, по (20) для значений D_1^* = 0,63·5 = 3,15 км и $D_2^{}$ = 5 км при $K_{ni} = K_{ni} = 1 - коэффициенты пропускания$ атмосферы τ_{a1} = 0,45 и τ_{a2} = 0,35, по (14) для типовой яркости изображения фона L' = 10 кд/м² (дешифрирование в полутьме) - коэффициент r = 1,67 и по (19) - нижнюю границу доверительного интервала D_1 = 4,2 км. Далее для значения $D_1^* = D_1 = 4,2$ км рассчитываем по (20) и (19) соответствующие уточненные значения τ_{a1} = 0,34 и D_1 = 3,9 км. В итоге, в качестве искомой нижней границы доверительного интервала для дальности действия ТВП принимаем значение D_1 = 3,9 км.

Дальнейшее уточнение коэффициента пропускания атмосферы τ_{a1} (уже для дистанции 3,9 км) существенного уточнения значения D_1 не дает.

В итоге, в качестве искомой нижней границы доверительного интервала для дальности действия ТВП принимаем значение $D_1 = 3,9$ км. Следовательно, с доверительной вероятностью R = 0,8 можно утверждать, что дальность действия ТВП в нормированных условиях, отвечающая нормированной вероятности классификации объекта $P_1 = 0,8$, будет не меньше найденного значения $D_1 = 3,9$ км или, иначе, что этому значению дальности будет соответствовать вероятность классификации объекта по его прямым демаскирующим признакам не ниже нормированной.

Для повышения степени надежности получаемой оценки D_1 следует использовать более высокую доверительную вероятность $R = R(P_{\Sigma} \ge P_{\Sigma 2})$, что, естественно, приводит к меньшему, но зато реализуемому с большей достоверностью значению D_1 . При этом, поскольку с увеличением R величина $P_{\Sigma 2}$ уменьшается, может потребоваться использование большего значения оценки $P_{\Sigma}^* = n/n_{\Sigma}$, чтобы ему соответствовала рекомендуемая величина P_2 , близкая к 0,5.

Отметим, что поскольку состав основных технических параметров ТВП и телевизионных камер допускает унификацию: вместо разности температур, эквивалентной шуму, разности радиационных температур объекта и фона и диапазона регистрируемой разности температур для телекамер могут использоваться аналогичные по смыслу понятия, а именно разность коэффициентов яркости, эквивалентная шуму, разность коэффициентов яркости объекта и фона и диапазон регистрируемой разности коэффициентов яркости соответственно [15], то полученные в настоящей статье результаты могут быть адаптированы и применительно к телевизионной аппаратуре наблюдения, как дневной, так и ночной.

Таким образом, представленная методология организации и выполнения натурных испытаний ТВП, обеспечивающая статистически достоверную оценку и контроль дальности действия ТВП, в отличие от известных методик, имеет следующие достоинства:

- допускает проведение адекватных испытаний ТВП в достаточно широком диапазоне метеоусловий за счет пересчета результатов этих испытаний на нормированные условия;

- максимизирует нижнюю границу доверительного интервала (оценку снизу) для дальности действия ТВП в нормированных условиях при обеспечении заданного уровня достоверности результатов испытаний и их фиксированном объеме;

- исключает возможность искусственного завышения оценки дальности действия ТВП вследствие угадывания объектов при их распознавании и предоставления операторам априорной информации о них и занижения этой оценки из-за случайных промахов операторов;

- существенно снижает влияние на результаты испытаний субъективных факторов, обусловленных профессиональными и личностными характеристиками операторов, а также вариациями используемых ими критериев вскрытия объектов;

- пригодна для аттестации ТВП с любой пороговой чувствительностью, работающих как в шумо-ограниченном, так и в контрастноограниченном режиме;

 обеспечивает возможность получения сопоставимых оценок дальности действия ТВП отечественного и зарубежного производства;

- концептуально применима к испытаниям не только ТВП, но и телевизионных камер.

Аппаратурное обеспечение испытаний ТВП детально рассмотрено в работах [14,16].

Таблица 1.

Значения P_{Σ^2} нижней границы доверительного интервала для ряда оценок вероятности вскрытия объекта $P_{\Sigma^*} = n/n_{\Sigma}$ и типовых значений доверительной вероятности $R = R(P_{\Sigma} \ge P_{\Sigma^2})$

	$P_{\Sigma 2}$				P_{Σ^2}				$P_{\Sigma 2}$		
P_{Σ}^{*}	R =	R =	R =	P_{Σ}^{*}	R =	R =	R =	P_{Σ}^{*}	R =	R =	R =
-	0,80	0,90	0,95	-	0,80	0,90	0,95	-	0,80	0,90	0,95
1 / 1	0,45	0,32	0,22	9/11	0,68	0,61	0,56	14 / 16	0,76	0,72	0,67
2 / 2	0,58	0,46	0,37	10 / 11	0,77	0,71	0,66	9/17	0,43	0,38	0,34
2/3	0,42	0,32	0,25	7 / 12	0,46	0,40	0,35	10/17	0,48	0,43	0,39
3/3	0,67	0,56	0,47	8 / 12	0,54	0,48	0,43	11/17	0,54	0,49	0,45
3 / 4	0,51	0,42	0,34	9/12	0,62	0,56	0,51	12 / 17	0,60	0,55	0,50
4/4	0,72	0,63	0,55	10 / 12	0,70	0,64	0,59	13 / 17	0,65	0,60	0,56
3 / 5	0,41	0,33	0,27	11 / 12	0,79	0,73	0,68	14 / 17	0,71	0,67	0,62
4 / 5	0,58	0,49	0,42	7 / 13	0,42	0,37	0,33	15 / 17	0,78	0,73	0,69
5 / 5	0,76	0,68	0,61	8 / 13	0,49	0,44	0,39	9 / 18	0,41	0,36	0,32
4 / 6	0,48	0,40	0,34	9 / 13	0,57	0,51	0,46	10 / 18	0,46	0,41	0,37
5/6	0,63	0,55	0,48	10 / 13	0,64	0,58	0,53	11 / 18	0,51	0,46	0,42
6/6	0,79	0,72	0,65	11 / 13	0,72	0,66	0,61	12 / 18	0,56	0,51	0,47
4 / 7	0,42	0,34	0,29	12 / 13	0,8	0,75	0,70	13 / 18	0,62	0,57	0,52
5 / 7	0,54	0,46	0,40	8 / 14	0,46	0,40	0,36	14 / 18	0,67	0,62	0,58
6 / 7	0,67	0,59	0,53	9/14	0,52	0,47	0,42	15 / 18	0,73	0,68	0,64
7 / 7	0,82	0,75	0,69	10 / 14	0,59	0,54	0,49	10 / 19	0,43	0,38	0,35
5 / 8	0,47	0,40	0,35	11 / 14	0,66	0,61	0,56	11 / 19	0,48	0,43	0,39
6 / 8	0,58	0,51	0,45	12 / 14	0,74	0,68	0,64	12 / 19	0,53	0,48	0,44
7 / 8	0,70	0,63	0,57	8 / 15	0,43	0,38	0,33	13 / 19	0,58	0,53	0,49
5/9	0,42	0,35	0,30	9/15	0,49	0,43	0,39	14 / 19	0,63	0,59	0,54
6 / 9	0,52	0,45	0,39	10 / 15	0,55	0,50	0,45	15 / 19	0,69	0,64	0,60
7 / 9	0,62	0,55	0,49	11 / 15	0,62	0,56	0,52	16 / 19	0,74	0,70	0,66
8 / 9	0,73	0,66	0,61	12 / 15	0,68	0,63	0,58	10 / 20	0,41	0,36	0,33
6 / 10	0,46	0,40	0,35	13 / 15	0,75	0,70	0,66	11 / 20	0,46	0,41	0,37
7 / 10	0,55	0,49	0,44	8 / 16	0,40	0,35	0,31	12 / 20	0,50	0,46	0,42
8 / 10	0,65	0,58	0,53	9/16	0,46	0,41	0,36	13/20	0,55	0,50	0,46
9 / 10	0,75	0,69	0,64	10/16	0,52	0,46	0,42	14/20	0,60	0,55	0,51
6/11	0,42	0,36	0,32	11/16	0,57	0,52	0,48	15 / 20	0,65	0,60	0,56
7 / 11	0,50	0,44	0,39	12/16	0,64	0,58	0,54	16/20	0,70	0,65	0,62
8/11	0.59	0.52	0.47	13/16	0.70	0.65	0.60	17/20	0.75	0.71	0.67

Таблица 2.

Значения параметров μ_i и ξ_i аппроксимационной формулы для температурно-частотной характеристики для ряда значений углового размера изображения миры w_i' и яркости изображения фона L'

W_i' ,	L' = 0	,6 кд/м ²	<i>L</i> ' = 1	0 кд/м ²	$L' = 100 \text{ кд/м}^2$		
град	μ_i	ξi	μ_i	ξi	μ_i	ξi	
0,1	0,091	0,0048	0,036	0,0015	0,022	0,0006	
0,2	0,047	0,0056	0,019	0,0021	0,012	0,0011	
0,3	0,032	0,0062	0,014	0,0026	0,0082	0,0015	
0,4	0,025	0,0067	0,011	0,0029	0,0066	0,0018	
0,5	0,021	0,0071	0,0091	0,0033	0,0056	0,0021	
0,6	0,018	0,0074	0,0080	0,0035	0,0050	0,0023	
0,7	0,016	0,0077	0,0072	0,0038	0,0044	0,0025	
0,8	0,015	0,0080	0,0066	0,0040	0,0041	0,0027	
0,9	0,014	0,0082	0,0061	0,0042	0,0038	0,0029	
1,0	0,013	0,0084	0,0057	0,0044	0,0036	0,0030	
1,1	0,012	0,0086	0,0054	0,0046	0,0034	0,0032	
1,2	0,012	0,0088	0,0051	0,0047	0,0033	0,0033	
1,3	0,011	0,0089	0,0049	0,0049	0,0031	0,0034	
1,4	0,011	0,0090	0,0047	0,0050	0,0030	0,0035	
1,5	0,010	0,0092	0,0046	0,0051	0,0029	0,0036	

Список литературы:

1. Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. – Казань: Отечество, 2006. – 595 с.

2. Овсянников В.А., Овсянников Я.В., Филиппов В.Л. Повышение достоверности экспертной оценки вероятности обнаружения и распознавания объектов по тепловизионным изображениям // Оптический журнал. – 2012. – № 3. – С. 65-70.

3. Штоколов Э.А., Шлычков В.И., Золотарев А.И. Методики лабораторных и натурных испытаний телевизионных и тепловизионных каналов оптикоэлектронных обзорно-прицельных систем // Контенант. – 2012. – № 1. – С. 13-16.

4. Омелаев А.И., Скворцов Ю.Е., Филиппов В.Л. Анализ факторов, влияющих на достоверность оценок эффективности тепловизионных приборов в натурных условиях. В кн.: «НПО Государственный институт прикладной оптики». Ч. 2. – Казань: Дом печати, 1997. – С. 662-697.

5. *Трестман М.М., Харькова Н.И.* Алгоритм приведения результатов испытаний тепловизионного прибора к нормированным значениям параметров и условий визирования объекта наблюдения // Прикладная физика. – 2007. – № 1. – С. 137-140.

6. *Deaver D., Voyer S.* Statistical analysis for target acquisition sensor modeling experiments // Proc. SPIE. – 2015. – V. 9452. – P. 945208-1 – 945208-14.

7. *Rotman S., Gordon E., Kowalczyk M.* Modeling human search and target acquisition performance // Optical Engineering. – 1989. – № 11. – Р. 1216-1222.

8. *Абезгауз Г.Г., Тронь А.П., Копенкин Ю.Н., Коровина И.А.* Справочник по вероятностным расчетам. – М.: Воениздат, 1970. – 536 с.

9. O'Connor J., O'Shea P., Palmer J., Deaver D. Standard target sets for field sensor performance measurements // Proc. SPIE. – 2006. – V. 6207. – P. 62070U-1 – 62070U-7.

10. Teaney B., Du Bosq T., Reynolds J., Thompson R., Aghera S., Moyer S., Flug E., Espinola R., Hixson J. Human target acquisition performance // Proc. SPIE. – 2012. – V. 8355. – P. 835510-1 – 835510-14.

11. *Щукин А.Н.* Теория вероятностей и ее применение в инженерно-технических расчетах. – М.: Сов. радио, 1974. – 136 с.

12. Балоев В.А., Овсянников В.А. Современные операциональные модели тепловизионных приборов при обнаружении и распознавании объектов // Оборонная техника. – 2017. – № 3. – С. 38-54.

13. *Маркин В.А.* Пределы температурной чувствительности тепловизоров третьего поколения // Оптический журнал. – 2010. – № 2. – С. 51-60.

14. *Chrzanowski K*. Testing thermal imagers. – Warsaw: Poland, 2010. – 164 p.

15. Ильин Г.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. О возможности унификации основных технических параметров телевизионной и тепловизионной аппаратуры // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 12. – С. 3-10.

16. Бугаенко А.Г., Беляков Ю.М., Иванов В.П., Курт В.И., Маливанов Н.Н. Испытания тепловизионных приборов. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2010. – 363 с.



О НОВОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ

ОВСЯННИКОВ В.А.

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань

E-mail: gipo@telebit.ru

Аннотация: Представлена инженерная методика прогнозирования дальности обнаружения и распознавания объектов посредством высокочувствительных несканирующих тепловизионных приборов, основанная на новой операциональной модели этих приборов NVThermIP (США). Методика учитывает основные особенности таких приборов: наличие выборки в обоих направлениях и возможность реализации за счет накопления сигналов весьма малых значений разности температур, эквивалентной шуму, вследствие чего их эффективность ограничивается не шумом прибора, а контрастной чувствительностью зрительного анализатора оператора.

Ключевые слова: тепловизионный прибор, дальность действия.

Одной из основных тенденций развития тепловизионных приборов (ТВП) в настоящее время является переход к разработке и использованию несканирующих, или «смотрящих», ТВП 3-го поколения, использующих матричные фотоприемные устройства (ФПУ) и имеющих целый ряд специфических особенностей. Наиболее существенные из них - это наличие выборки в обоих направлениях и возможность накопления сигналов в элементах ФПУ за сравнительно длительное время, нередко близкое к периоду кадра, благодаря чему в несканирующих ТВП может быть получена чрезвычайно высокая пороговая чувствительность, достигающая 0,02 К и менее, что, обеспечивая эффективную работу ТВП, например, в неблагоприятных погодных условиях или при наблюдении слабоконтрастных или замаскированных объектов, «приближает тепловизионные изображения по информационной емкости к зрению человека и позволяет совершить качественный переход: от видения источников тепла к видению в тепловых лучах» [1].

Практически во всех опубликованных к настоящему времени в отечественной литературе методиках расчета важнейшего показателя эффективности ТВП – дальности действия (например, [2-5]) молчаливо подразумевается, что возможности ТВП по вскрытию – обнаружению и распознаванию - объектов ограничиваются шумом прибора, поэтому непременным атрибутом данных методик является разность температур, эквивалентная шуму ΔT_{o} . Это вполне справедливо для сканирующих ТВП 1-го и 2-го поколения, а также для несканирующих ТВП 3-го поколения, использующих тепловые, обычно микроболометрические, ФПУ, имеющих сравнительно большое значение ΔT_{0} . Аналогичная ситуация может иметь место и в тех редких случаях, когда объект находится на квазиоднородном фоне или же существует возможность подбора для каждого фоно-целевого сюжета оптимальных значений яркости и контрастности изображения. Такая возможность возникает при обнаружении объекта с известным местоположением или при неограниченном ресурсе времени поиска объекта, когда широкий диапазон регистрируемой разности температур ΔT_m , К, необходимый в иных ситуациях для обеспечения поиска и наблюдения объектов, расположенных на горбах или впадинах температурных фоновых неоднородностей, не требуется, поэтому ТВП здесь также можно считать шумо-ограниченным прибором. Между тем объекты наблюдения, как правило, находятся на неоднородном фоне, и для их оперативного поиска требуется достаточно широкий диапазон ΔT_{m} , чтобы любой объект мог быть отображен на тепловизионном изображении. Однако при малых значениях разности температур, эквивалентной шуму, характерных для несканирующих ТВП на квантовых ФПУ, уменьшение коэффициента усиления видеосигналов, необходимое при ограниченном диапазоне рабочей яркости монитора для расширения диапазона ΔT_{m} , приводит к снижению заметности или даже исчезновению на изображении шума и ослаблению контраста изображения объектов, поэтому такой ТВП, по сути, оказывается уже не шумо-ограниченным, а контрастно-ограниченным прибором, возможности которого по вскрытию объектов существенно определяются контрастной чувствительностью зрительного анализатора оператора [6]. Количественный критерий работы ТВП в контрастноограниченном режиме предложен в работе [7].

В связи с этим нашей задачей является развитие, с учетом отмеченных особенностей несканирующих ТВП и современного состояния соответствующей информационной базы, методики оперативного прогнозирования дальности действия подобных контрастно-ограниченных ТВП при вскрытии объектов и ее критический анализ.

Прогнозирование дальности действия ТВП, как правило, базируется на концепции эквивалентных мир, сводящей задачу вскрытия объектов местности к разрешению этих мир. Для оценки показателей эффективности ТВП в Центре ночного видения и электронных датчиков (NVESD, США) в последние годы создана и активно внедряется в практику новая операциональная модель NVThermIP (например, [8-11]). Данная модель, в отличие от предыдущей модели NVTherm, основанной на использовании классических критериев Джонсона, связывает вероятность вскрытия объектов не с однойединственной величиной – максимальной угловой частотой v_{max} разрешаемой эквивалентной миры, определяющей разрешающую способность ТВП, – это подразумевает возможность «обмена» разности температур, эквивалентной шуму ΔT_0 , на эффективное значение элементарного поля зрения δ и наоборот, который, формально не изменяя значения v_{max} ,

фактически отнюдь не всегда обеспечивает сохранение значения вероятности вскрытия объекта, – а с целой совокупностью угловых частот этой миры, не превышающих максимальную, что позволяет более полно и точно отразить зависимость этой вероятности от всего рабочего участка температурно-частотной характеристики, в частности от значений ΔT_0 и δ в отдельности. Соответствующая формула для вероятности вскрытия P имеет вид:

$$P = [1 + 1/(h/2A_{3}C_{3}\xi)^{\beta}]^{-1}; \quad \beta = 1,51 + 0,24(h/2A_{3}C_{3}\xi); \quad A_{3} = D/2\nu_{3}, \quad (1)$$

где h – критический размер объекта, м; D – дистанция до объекта, км; A_3 , C_3 , v_3 – параметры модели, имеющие смысл эквивалентного разрешения на местности, м, эквивалентного критерия Джонсона и эквивалентной предельной

угловой частоты, мрад-1, соответственно; ξ – поправочный коэффициент, учитывающий наличие выборки, определяемый относительной долей псевдочастот *S* в спектре изображения объекта, составляющий

$$\xi = \begin{cases} 1 - \text{при обнаружении объекта;} \\ (1 - 0,58S)^{-1} - \text{при классификации и идентификации.} \end{cases}$$

Критический размер объекта *h* определяется корнем квадратным из его видимой площади S_{o6} : $h = \psi \sqrt{S_{o6}}$. Здесь ψ – корректирующий коэффициент, который для компактных объектов принимается равным 1, а для удлиненных, вытянутых объектов (с соотношением сторон свыше 10-12), как свидетельствуют отрывочные литературные данные, его можно считать равным 0,8.

При наблюдении из верхней полусферы наземных объектов, имеющих форму, близкую к параллелепипеду, видимая площадь $S_{\rm of}$ объекта приближенно равна [11]:

$$S_{\rm of} = (S_{\rm mof} \cos \varphi_0 + S_{\rm fopt} \sin \varphi_0) \sin \gamma_0 + S_{\rm mmah} \cos \gamma_0,$$

где φ_0 , γ_0 – курсовой угол и угол визирования объекта (от надира) соответственно; $S_{_{лоб}}$, $S_{_{борт}}$, $S_{_{план}}$ – площадь лобовой, бортовой и плановой проекции объекта соответственно.

В частности, для ТВП наземного базирования (γ_0 = 90°) имеем:

$$S_{\rm of} = S_{\rm nof} \cos \varphi_0 + S_{\rm fopt} \sin \varphi_0$$
.

Однако при наблюдении с земли летательных аппаратов, имеющих округлую, аэродинамическую форму, значение S_{of} целесообразно оценивать следующим образом [11]:

$$S_{\rm of} = \sqrt{(S_{\rm nof}^2 \cos^2 \varphi_0 + S_{\rm fopt}^2 \sin^2 \varphi_0) \cos^2 \psi_0 + S_{\rm nnah}^2 \sin^2 \psi_0},$$

где ψ_0 – угол места объекта.

При использовании формулы (1) предполагается, что при дешифрировании изображений объектов реализуются только их прямые демаскирующие признаки. Эту формулу можно аппроксимировать, с учетом дополнительного существенного фактора – квалификации оператора, – более простым выражением вида [11]:

$$P = 1 - \exp\left[-0.7 \left(\frac{\gamma h}{2A_{9}C_{9}\xi}\right)^{1.2}\right],$$
 (2)

где γ = 0,65-1,5 – показатель квалификации оператора (от низкой до высокой соответственно).

Систематизированные на основе опубликованных зарубежных данных значения *C*₃ для различных задач наблюдения, категорий объектов и их алфавита приведены в табл. 1 [11]. (Необходимо отметить, что эти значения постоянно уточняются и конкретизируются, поэтому их следует рассматривать как ориентировочные.)

Эквивалентная предельная угловая частота $v_{_9}$, определяющая значение $A_{_9}$ в (1), (2), рассчитывается по формуле, которую в данном случае можно привести к следующему интегралу:

$$\mathbf{v}_{3} = \int_{\mathbf{v}_{min}}^{\mathbf{v}_{max}} \left(\frac{\Delta T_{R} \tau_{a}}{\Delta T_{pa3}(\mathbf{v})} \right)^{1/2} d\mathbf{v}, \qquad (3)$$

где ΔT_R – тепловой контраст объекта, К; τ_a – коэффициент пропускания атмосферы в спектральном рабочем диапазоне ТВП $\Delta\lambda$ на дистанции до объекта; v_{min} и v_{max} – минимальное и максимальное значения угловой частоты v, мрад⁻¹, в пределах которых температурно-частотная характеристика ТВП $\Delta T_{pa3}(v)$ не превышает значения эффективного (с учетом прозрачности атмосферы) теплового контраста объекта, равного $\Delta T_R \tau_a$ (рис. 1).

Под тепловым контрастом объекта ΔT_R в современных моделях ТВП подразумевается так называемый контраст Дойла, определяемый как [12]



Схема определения граничных значений угловой частоты эквивалентной миры

$$\Delta T_R = \left(\Delta T_{R0}^2 + \sigma_{\Delta T}^2\right)^{1/2}$$

где ΔT_{R0} – средний по видимой площади объекта тепловой контраст – средняя разность радиационных температур объекта и фона, K; $\sigma_{\Delta T}$ – среднеквадратическое отклонение вариаций теплового контраста по площади объекта, составляющее, например для транспортной техники, от $\sigma_{\Delta T}$ = 0,1 K (пассивный объект в стабильную ненастную погоду) до $\sigma_{\Delta T}$ = 1 K (активный объект).

Температурно-частотная характеристика ТВП $\Delta T_{\text{раз}}(\mathbf{v})$ – зависимость минимальной разрешаемой разности температур $T_{\text{раз}}$ от угловой частоты миры \mathbf{v} – контрастно-ограниченного ТВП существенно определяется функцией порогового контраста $M(\mathbf{v}')$ – зависимостью минимального обнаруживаемого оператором контраста $M = (L'_{max} - L'_{min})/(L'_{max} + L'_{min})$, где L'_{max}, L'_{min} – максимальное и минимальное значение яркости, изображения разрешаемой синусоидальной миры от ее угловой частоты. Эта зависимость описывается следующим эмпирическим выражением [12]:

$$M(\mathbf{v}') = \frac{(1+0.7/L')^{0.2}[1+12/(w'(1+v'/3)^2)]}{540v'\exp(-cv')\sqrt{1+0.06\exp(cv')}}; \ c = 0.3(1+100/L')^{0.15};$$

где v' – угловая частота в пространстве изображений, град⁻¹; *L*' – яркость изображения фона, кд/м²; *w*'– угловой размер изображения миры, град, составляющий для стандартной четырехполосной миры *w*'= 3,5/v'. Связь частоты v' с соответствующей угловой частотой v, мрад⁻¹, в пространстве предметов устанавливается формулой v' = $17,45v/\Gamma$, где Γ – видимое увеличение ТВП – отношение угловых размеров изображения объекта и само-

го объекта. Видимое увеличение ТВП обычно подбирается оператором таким образом, чтобы угловой размер элемента изображения, отвечающего элементарному полю зрения, составлял $\delta_0' = 0,8-1$ мрад. Как показали недавние исследования [13], оптимальное значение δ_0' , обеспечивающее максимальную дальность действия контрастно-ограниченных ТВП, равно 0,95 мрад. Комфортная яркость изображения фона определяется условиями освещения при дешифрировании изображений, и ее можно принять равной [12] L' = 0,3-1 кд/м² (дешифрирование изображения в темноте), L' = 3-30 кд/м² (в полутьме), L' = 100 кд/м² (на свету).

При нахождении выражения для $\Delta T_{\text{pas}}(v)$ учтем, что между этой величиной и соответствующей минимальной разрешаемой разностью яркостей изображения $\Delta L'_{\text{pas}}(v)$ существует очевидное соотношение:

$$\Delta L'_{\text{pas}}(\mathbf{v}) = (4/\pi) \Delta T_{\text{pas}}(\mathbf{v}) \Delta L'_m K(\mathbf{v}) / \Delta T_m,$$

где K(v) – функция передачи модуляции ТВП; $\Delta L'_m = L'_2 - L'_1$ – рабочий диапазон яркости монитора, кд/м², отвечающий диапазону регистрируемой разности температур ΔT_m .

Здесь 4/ π – поправочный коэффициент, учитывающий различие амплитуд выходных сигналов для прямоугольной миры, по отношению к которой устанавливается $\Delta T_{\rm pas}(v)$, и синусоидальной миры, используемой при определении функции порогового контраста.

С другой стороны, принимая во внимание, что яркость изображения фона соответствует середине рабочего диапазона яркости монитора – это необходимо для воспроизведения объектов как с положительным, так и с отрицательным тепловым контрастом, – значение функции порогового контраста, согласно ее определению, в данном случае равно:

$$M(\mathbf{v}) = \Delta L'_{\text{pas}}(\mathbf{v})/(L'_2 + L'_1),$$

что дает искомое выражение для $\Delta T_{_{\mathrm{na3}}}(\mathbf{v})$:

$$\Delta T_{\text{pa3}}(v) = \frac{\pi \Delta T_m M(v)}{4K(v)K_m};$$

$$K_m = (L'_2 - L'_1)/(L'_2 + L'_1),$$
(4)

где К, – коэффициент сохранения контраста

для протяженного объекта; при $L'_2 >> L'_1$ значение $K_m \approx 1$, и величина $\Delta T_{\rm pas}(v)$ от диапазона яркости монитора уже не зависит.

Для обеспечения оперативного поиска и наблюдения объектов с положительным или отрицательным тепловым контрастом, локализованных соответственно на горбах или впадинах температурных фоновых неоднородностей, диапазон регистрируемой разности температур ΔT_m , очевидно, должен удовлетворять условию:

$$\Delta T_m \ge (\Delta T_{\phi} + 2\Delta T_R) \tau_{am},$$

где ΔT_{ϕ} – максимальная величина вариаций радиационной температуры фоновых неоднородностей, К (можно приближенно считать: в летний солнечный день ΔT_{ϕ} = 7 К, в облачный день ΔT_{ϕ} = 4 К, ночью ΔT_{ϕ} = 2 К); τ_{am} – максимальный коэффициент пропускания атмосферы, отвечающий минимально возможной дистанции до объектов.

Поскольку значения ΔT_{ϕ} и ΔT_R высококоррелированны, диапазон ΔT_m можно связать только с величиной ΔT_R . Для широкопольных наземных ТВП, в поле зрения которых одновременно находятся не только удаленные, но и близрасположенные объекты поиска, допустимо принять $\tau_{am} = 1$, поэтому, например, летним солнечным днем при типовом значении $\Delta T_R = 7$ К имеем соотношение: $\Delta T_m \ge 21$ К. Это вполне отвечает и рекомендациям авторов модели NVThermIP (например, [12]), согласно которым значение ΔT_m должно составлять:

$$\Delta T_m = q \Delta T_R; \quad q = 6 - 10, \tag{5}$$

где под ΔT_R понимается средний (по множеству объектов) тепловой контраст, для объектов транспортной техники близкий к 2 К.

При этом меньшее значение *q* следует использовать для узкопольных ТВП, работающих в режиме распознавания объектов, а большее – для широкопольных, попадание в поле зрения которых фоновых неоднородностей с максимальными перепадами радиационных температур более вероятно. Однако для ТВП воздушного базирования, находящихся на фиксированной высоте, все объекты местности располагаются в довольно узком диапазоне
дистанций до них, поэтому вместо (5) имеем:

$$\Delta T_m = q \Delta T_R \tau_a; \quad q = 6 - 10, \tag{6}$$

чем обеспечивается приемлемый контраст изображения этих объектов практически независимо от их удаления.

Поэтому при очень малых значениях τ_a в (6) и достаточно больших значениях разности температур, эквивалентной шуму, отмеченный выше критерий может не реализоваться и, следовательно, ТВП фактически будет работать в шумо-ограниченном режиме.

Параметр v_э данной модели более тесно, чем максимальная разрешаемая угловая частота v_{max} в модели ТВП NVTherm, коррелирован с экспериментальными оценками вероятности вскрытия объектов, особенно для ТВП с выборкой, учитывает цифровую обработку изображений, в частности высокочастотную фильтрацию, а также наличие «окрашенного» (небелого) шума.

В отличие от классических критериев Джонсона C, соответствующих вероятности вскрытия объектов P_{Σ} = 0,5, значения C_{3} в (2) опре-

деляют вероятность распознавания объектов только по их прямым демаскирующим признакам, без учета возможности угадывания объектов, вероятность которого составляет P_{y} = 1/ n,, где n, – число классов или типов объектов в каждом данном алфавите, известном оператору. Для корректировки значений этого критерия с целью получения оценок вероятности распознавания, учитывающей возможность такого угадывания, т.е. использование обычного в отечественной практике критерия распознавания объекта «правильное решение оператора», примем во внимание, что фактически достигаемая на практике вероятность распознавания объектов P_{Σ} определяется вероятностью суммы совместных событий:

$$P_{\Sigma} = P_{\mathrm{v}} + P - P_{\mathrm{v}} P.$$

Отсюда вытекает, что для оценки по формуле (2) вероятности *P* распознавания объектов по критерию «правильное решение оператора» значения эквивалентного критерия Джонсона *C*₃ необходимо разделить на поправочный коэффициент µ > 1, равный

$$\mu = \sqrt[1,2]{\ln(1-P_{\Sigma})/\ln(1-P)} = \left[\sqrt[1,2]{1+1,44\ln(1-1/n_{o})}\right]^{-1}.$$
(7)

Таким образом, согласно (1), искомая дальность действия D устанавливается из уравнения $D = 2A_{3}v_{3}$, где эквивалентная предельная частота v_{3} определяется по (3), а требуемое эквивалентное разрешение на местности A_{3} – из (2). Для облегчения практического применения модели NVThermIP при прогнозировании эффективности контрастно-ограниченных ТВП в работе [14] предложена упрощенная методика оперативной оценки дальности действия ТВП, основанная на этой модели и пригодная для использования в режиме «ручного счета»,

при следующих основных допущениях: в ТВП используется дифракционно-ограниченный объектив; микросканирование отсутствует; коэффициент заполнения ФПУ и коэффициент сохранения контраста равны 1; минимальная угловая частота $v_{min} = 0$, а максимальная v_{max} совпадает с частотой Найквиста, равной половине частоты выборки; угловой размер элемента изображения составляет 1 мрад. При этом, с учетом (1), (3), (4), дальность действия ТВП D, км, находится как решение уравнения:

$$D = 2,25A_{9}Q_{\sqrt{\Delta T_{R}\tau_{a}/\Delta T_{m}}}; \quad Q = \int_{0}^{v_{max}} [K(v)/M(v)]^{1/2} dv = D_{o}z/\lambda_{0}; \quad z = f(\lambda_{0}/\epsilon a), \quad (8)$$

где $D_{_0}$ – диаметр объектива, мм; ε – относительное отверстие объектива; λ_0 – средняя длина волны диапазона $\Delta\lambda$, мкм; a – размер

элемента ФПУ, мкм; z – безразмерный параметр, зависящий от отношения $\lambda_0/\epsilon a$.

Требуемое эквивалентное разрешение на

местности $A_{,,}$ м, в (8), определяемое заданной вероятностью вскрытия объекта P, вытекает из формулы (2) при ξ = 1 (фактическое значение этого коэффициента заложено в параметре z):

$$A_{3} = \frac{h\gamma}{2.7C_{3} \sqrt[1.2]{-\ln(1-P)}}.$$
 (9)

Анализ результатов, приведенных в [14] для случая, когда функция K(v) является произведением функций передачи модуляции объектива, элемента ФПУ и монитора, позволяет рекомендовать для расчета параметра z в (8) следующую аппроксимационную формулу, пригодную для отношения $\lambda_0/\varepsilon a \leq 3$, которое на практике, как правило, выполняется:

$$z = \eta \lg(\lambda_0 / \varepsilon a + 1); \quad \eta = \begin{cases} 23 - \text{при обнаружении объекта;} \\ 21,5 - \text{при классификации и идентификации.} \end{cases}$$
(10)

Учитывая, что функцию передачи модуляции как дифрационно-ограниченного, так и аберрационного объектива допустимо аппроксимировать гауссовской зависимостью, можно, используя результаты [11,12], показать, что формулы (8), (10) пригодны для любого объектива при замене значения λ_0 на эффективную длину волны λ_3 , мкм, эквивалентного дифракционноограниченного объектива, определяемую формулой:

$$\lambda_{\mathfrak{I}} = \lambda_0 \sqrt{1 + (0.5d\varepsilon/\lambda_0)^2}, \qquad (11)$$

где *d* – диаметр аберрационного кружка рассеяния с концентрацией энергии 85%, мкм.

Из (8) следует, что, в отличие от шумо-ограниченных ТВП первых поколений, дальность

действия контрастно-ограниченных ТВП от разности температур, эквивалентной шуму ΔT_0 , не зависит, поскольку тепловизионное изображение здесь визуально не зашумлено.

Для получения явного расчетного выражения для дальности действия наземного ТВП, когда выполняется соотношение (5), воспользуемся приближенной методикой оценки коэффициента пропускания атмосферы в спектральных рабочих диапазонах, COOTветствующих окнам прозрачности атмосферы 3-5 и 8-12 мкм, согласно которой для наклонных трасс, когда ТВП находится на земле, а объект – на высоте *H* ≥ 0 км (или наоборот), значение τ составляет [11]:

$$\begin{aligned} \tau_{a} = \exp[-(L_{p} + L_{n})]; \ L_{p} = \sigma_{p}K_{p}D; \ L_{n} = \begin{cases} \sigma_{n}\sqrt{K_{n}D} & (3-5 \text{ MKM}); \\ \sigma_{n}K_{n}D & (8-12 \text{ MKM}); \end{cases} \\ \sigma_{p} = \begin{cases} (2,26 - 0,49 \ln S_{M})/S_{M} & (3-5 \text{ MKM}); \\ (1,66 - 0,35 \ln S_{M})/S_{M} & (8-12 \text{ MKM}); \end{cases} \\ \sigma_{n} = \begin{cases} 0,15 \ln(W/217) + 1,2 & (3-5 \text{ MKM}); \\ 0,05 + 0,015W & (8-12 \text{ MKM}); \\ 0,05 + 0,015W & (8-12 \text{ MKM}); \end{cases} \\ K_{p} = h_{po}[1 - \exp(-H/h_{po})]/H; \ K_{n} = h_{no}[1 - \exp(-H/h_{no})]/H; \\ h_{po} = 0,78 + 0,038S_{M}; \ h_{no} = 2,2 \text{ KM}; \end{cases} \\ W = \frac{2,17 \cdot 10^{-2} f_{\text{отн}}}{t_{B} + 273} \exp(-0,000311t_{B}^{2} + 0,0738t_{B} + 6,41), \end{aligned}$$
(13)

где $L_{\rm p}, L_{\rm n}$ – оптическая толщина атмосферы, обусловленная аэрозольным рассеянием и поглощением излучения парами воды соответственно; $\sigma_{\rm p}, \sigma_{\rm n}$ – показатели аэрозольного рассеяния и поглощения излучения парами воды соответственно; $S_{\rm m}$ – метеорологическая даль-

ность видимости, км; W – абсолютная влажность воздуха, г/м³; K_p , K_n – коэффициенты приведения наклонной трассы к эквивалентной приземной горизонтальной по соответствующим факторам ослабления излучения (для горизонтальных приземных трасс $K_p = K_n = 1$);

 $h_{\rm po}, h_{\rm no}$ – параметры экспоненциальной аппроксимации вертикальных профилей показателей аэрозольного рассеяния и поглощения излучения парами воды, км; $f_{\rm отн}$ – относительная

влажность воздуха, %; $t_{\rm B}$ – температура приземного воздуха, °C.

Тогда уравнение (8) для диапазона спектра Δλ = 3-5 мкм с учетом (5) преобразуется в следующее:

$$x \exp[(x + \alpha \sqrt{x})/2] = B; \quad x = \sigma_{\rm p} K_{\rm p} D;$$

$$\alpha = \sigma_{\rm n} \sqrt{K_{\rm n}} / \sqrt{\sigma_{\rm p} K_{\rm p}}; \quad B = 2,25 A_{\rm s} \sigma_{\rm p} K_{\rm p} D_{\rm o} z / \lambda_0 \sqrt{q}.$$
 (14)

Рассчитанные с использованием уравнения (14) зависимости x = f(B), определяющие искомую дальность действия $\text{ТВП } D = x/\sigma_p K_p$, приведены для ряда значений параметра α на рис. 2*a* и, в более крупном масштабе, на рис. 2*б*. Полученные зависимости можно использовать и для спектрального диапазона $\Delta\lambda = 8-12$ мкм, для чего необходимо принять:

 $\alpha = 0; \quad x = (\sigma_{\rm p}K_{\rm p} + \sigma_{\rm n}K_{\rm n})D;$ $B = 2,25A_{\rm s}(\sigma_{\rm p}K_{\rm p} + \sigma_{\rm n}K_{\rm n})D_{\rm o}z/\lambda_0\sqrt{q}$

Для контрастно-ограниченного ТВП воздушного базирования, согласно соотношениям (6), (8), дальность действия от коэффициента пропускания атмосферы не зависит, – разумеется, когда этот коэффициент еще достаточно большой и не сужает чрезмерно значения ΔT_m , а соответствующий контраст изображения объекта, необходимый для его наблюдения, сравнительно невелик и не обусловливает появления на изображении видимого шума, являющегося признаком перехода ТВП в шумо-ограниченный режим, – и для обоих диапазонов спектра определяется общей формулой:

$$D = 2,25 A_{2} D_{o} z / \lambda_{0} \sqrt{q}$$

Анализ показывает, что данная методика вполне пригодна и для ТВП, использующего ФПУ с коэффициентом заполнения, отличным от 1, но не менее 0,9; погрешность оценки дальности действия при этом не превышает 3-4%.

Пример. Требуется рассчитать дальность действия наземного контрастно-ограниченного ТВП (спектральный рабочий диапазон $\Delta\lambda$ = 3-5 мкм, диаметр объектива D_o = 100 мм, относительное отверстие ε = 1:4, размер элемента ФПУ a = 15 мкм) при классификации в узком поле зрения с вероятностью P = 0,8 оператором высокой квалификации танка с площадью S_{ob} = 12 м² (борт) в группе из трех объектов



Рисунок 2. Зависимости x = f(B), определяющие дальность действия ТВП, для различных значений параметра а: a) – для B = 0-20, б) – для B = 0-5

разных классов в благоприятных летних условиях (метеорологическая дальность видимости $S_{_{\rm M}}$ = 10 км, температура воздуха $t_{_{\rm B}}$ = 20°С, относительная влажность $f_{_{\rm OTH}}$ = 75%):

- приняв, согласно табл. 1, C_3 = 14,5 и γ = 1,5, рассчитываем по (9) для критического размера объекта $h = \sqrt{12} = 3,5$ м эквивалентное разрешение на местности $A_3 = 0,09$ м;

- приняв типовое соотношение *d* = *a*, рассчитываем по (11) для λ_0 = 4 мкм эффективную длину волны λ_3 = 4,4 мкм;

- приняв η = 21,5, рассчитываем по (10) параметр *z* = 7,26;

- рассчитываем по (13) абсолютную влаж-

ность воздуха $W = 13 \text{ г/м}^3$;

- рассчитываем по (12) показатели аэрозольного рассеяния $\sigma_p = 0,113$ км⁻¹ и поглощения излучения парами воды $\sigma_n = 0,78$ км^{-1/2};

- приняв $K_{\rm p} = K_{\rm n} = 1, \lambda_0^{\rm o} = \lambda_{\rm s} = 4,4$ мкм и q = 6, находим по (14) параметры α = 2,3 и B = 1,44;

- определяем по рис. 26 значение x = 0,51 и находим искомую дальность действия D = 0,51/0,113 = 4,5 км.

С учетом возможности угадывания объектов при их классификации ($n_0 = 3$), значение C_3 , согласно (7), оказывается в $\mu = 2,08$ раза меньше, что в итоге повышает дальность действия ТВП до D = 6,6 км.

Таблица 1. Средние значения эквивалентного критерия Джонсона С₂ при вскрытии объектов

Задача	Условия	$C_{\mathfrak{H}}$
	Движущийся объект (на любом фоне):	
Выделение	- техника	1,4
	- люди	1
	Фон со слабой неоднородностью (снежное поле, чистое небо, лю-	
(обнаружение	бой фон в дождь)	2
на неоднород-	Фон со средней неоднородностью (поле, луг, море)	2,7
ном фонс) оов-	Фон с сильной неоднородностью (лес, кустарник, пустыня, облач-	
CKIU	ность)	4
	Фон с очень сильной неоднородностью (горы, город, облачность с	
	разрывами)	8
Kaacauburauur	Алфавит, содержащий сильно различающиеся классы объектов:	
облекта (распо-	гусеничная техника, колесная техника, самолеты, вертолеты,	
гиарание по	люди, животные и все другие объекты:	
зпавание до класса)	 техника (число классов – 3) 	14,5
Kildeed)	 - люди (число классов – 3) 	5,4
	Алфавит, содержащий похожие подклассы объектов: танки и	
	БМП; автомашины и БТР; человек с грузом, человек с линейным	
Различение	объектом (винтовка и др.) и человек с компактным объектом, не-	
объекта (распо-	сущий его в одной руке; предметы в руках человека (длинные,	
знавание до	средние или короткие):	
подкласса)	 техника (число подклассов – 3) 	17
	 - люди (число подклассов – 3) 	6,9
	 предметы в руках (число подклассов – 3) 	16,7
	Алфавит, содержащий похожие типы объектов: танки Т-80 и Т-72;	
	БМП-1, БМП-2 и БМП-3; самолеты МиГ-27, МиГ-29 и МиГ-31;	
	военнослужащий, боевик (партизан) и человек гражданский; ору-	
	жие и орудия труда в руках человека (винтовка, гранатомет, авто-	
	мат, лопата, метла или грабли и др.); мелкие предметы в одной	
	руке (пистолет, граната, нож, телефон или фонарь и др.):	
Илентификация	- техника (число типов – 8)	18.5
облекта (распо-	 гусеничная техника (число типов – 12) 	20,5
знавание до типа)	 автомобили (число типов – 12) 	27,5
	- люди (число типов – 3)	16,7
	- люди (число типов – 12)	18,8
	 оружие и орудия труда в руках человека, наблюдение в фас 	
	(число типов – 10)	9,2
	- оружие и орудия труда в руках человека, в среднем по ракурсам	
	(число типов – 10)	19,3
	 мелкие предметы в одной руке (число типов – 12) 	17
	- вид деятельности человека (24 варианта)	8

Отметим, что дальность действия контрастно-ограниченных ТВП существенно зависит от выбираемого оператором диапазона регистрируемой разности температур ΔT_m , поэтому, в связи с некоторой произвольностью данного выбора, оценка этой дальности будет варьироваться. Указанное обстоятельство и оправдывает использование в методике отмеченных выше допущений и упрощений.

Имея в виду представленную операциональ-

ную модель ТВП, оценим далее относительное влияние на дальность действия ТВП таких входных параметров модели, являющихся конструктивными параметрами ТВП, как диаметр D_o и относительное отверстие ε объектива, размер a элемента ФПУ и диаметр d аберрационного кружка рассеяния. Для решения подобных задач в работе [15] предложено использовать относительный (нормализованный) градиент $\nabla y(x)$ исследуемой функции y = f(x), определяемый как

$$\nabla y(x) = \frac{y(x(1+p)) - y(x)}{y(x)} / \frac{x(1+p) - x}{x} = \left(\frac{y(x(1+p))}{y(x)} - 1\right) / p$$

где *p* – малое относительное приращение аргумента *x*.

Понимая под y дальность действия D, а под x– последовательно параметры D_{a} , ε , *a* и *d* и придавая отношениям $\lambda_0/\epsilon a$ и d/a типовые значения, равные 1, находим соответствующие значения относительного градиента $\nabla D(x)$, одинаковые для обоих спектральных рабочих диапазонов: $\nabla D(D_{a}) = 1$ (при фиксированном относительном отверстии объектива), $\nabla D(D_{a}) = 0.24$ (при фиксированном фокусном расстоянии объектива), $\nabla D(\varepsilon) = -0.76$ (при фиксированном диаметре объектива), $\nabla D(a) = -0.7$, $\nabla D(d) = -0.06$. Следовательно, наибольшее влияние на дальность действия ТВП оказывает диаметр объектива, который, при фиксированном значении є, должен быть по возможности максимальным, а наименьшее – размер аберрационного кружка рассеяния, увеличение которого, напротив, приводит к некоторому снижению этой дальности.

Таким образом, данная методика оперативной оценки дальности действия современных высокочувствительных ТВП позволяет избежать необоснованного завышения данной оценки, неизбежного при учете лишь шумовых ограничений в ТВП, и, тем самым, повысить точность прогноза реальной эффективности этих приборов, а также определить их наиболее критические конструктивные параметры.

При сравнении и выборе для практического использования модели ТВП NVTherm или NV-ThermIP необходимо отдавать себе отчет в том, что ни одна, даже самая совершенная, модель не может дать результаты более точные, чем точность, с которой известны ее входные параметры. В данном случае, в связи с отсутствием четких критериев или соответствующей, достаточно полной информации, невозможно точно определить, в том числе формально учитываемые моделями, факторы, существенно влияющие на оценку эффективности ТВП: алфавит и конкретную категорию вскрываемых объектов; текущее состояние и стратификацию атмосферы; квалификацию, психофизическое состояние и число задействованных операторов-дешифровщиков, а также критерии их коллективного решения; характер и степень тепловой неоднородности фона; локализацию (в том числе в поле зрения ТВП) и видимые размеры объекта, учитывающие, в частности, его возможное частичное экранирование, например, растительностью, распределение радиационной температуры по площади объекта, наличие и вид его тепловой маскировки, ракурс наблюдения и движение объекта; условия дешифрирования изображения (яркость, контрастность, зашумленность, ресурс времени) и возможность их оптимизации; наличие и вид вторичной обработки изображения. Поэтому различие результатов, получаемых с использованием этих моделей, обычно меньше погрешности оценки показателей эффективности ТВП, обусловленной отмеченными факторами. Данное обстоятельство и оправдывает все еще широкое применение гораздо более простой и обозримой операциональной модели NVTherm.

Список литературы:

1. *Таубкин И.И., Тришенков М.А.* Предельная чувствительность и информативность тепловизоров и других оптико-электронных преобразователей изображения // Оптический журнал. – 1996. – № 6. – С. 3-13.

2. Ицкевич Е.В. Итерационный метод определения дальности действия оптико-электронных приборов наблюдения // Изв. вузов. Сер. «Приборостроение». – 1988. – № 12. – С. 53-55.

3. *Скобло В.С.* К оценке дальности действия тепловизионных систем // Изв. вузов. Сер. «Приборостроение». – 2001. – № 1. – С. 47-51.

4. *Трестман М.М., Харькова Н.И.* Сигнатура объекта наблюдения тепловизионным прибором и алгоритм расчета дальности распознавания // Прикладная физика. – 2005. – № 3. – С. 89-91.

5. Тымкул В.М., Тымкул Л.В., Фесько Ю.А., Поликанин А.Н. Дальность действия тепловизионных систем. Ч.1. Методика расчета // Автометрия. – 2014. – № 4. – С. 96-101.

 Driggers R., Jacobs E., Vollmerhausen R., O'Cane
 B., Self M., Moyer S., Hixson J., Page G. Current infrared target acquisition approach for military sensor design and wargaming // Proc. SPIE. – 2006. – V. 6207. – P. 620709-1 – 620709-17.

7. Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Методика оценки эффективности тепловизионных приборов при обнаружении движущихся объектов на неоднородном фоне // Оборонная техника. – 2017. – № 3. – С. 3-9.

8. *Vollmerhausen R.* New metric for predicting target acquisition performance // Optical Engineering. – 2004. – № 11. – P. 2806-2818.

9. *Teaney B., Reynolds J., O'Connor J.* Guidance on methods and parameters for army target acquisition models // Proc. SPIE. – 2007. – V. 6543. – P. 65430L-1 – 65430L-12.

10. Barela J., Kastek M., Firmanty K., Trzaskawka P., Dulski R. Determining detection, recognition and identification ranges of thermal cameras on the basis of laboratory measurements and TTP model // Proc. SPIE. – 2012. – V. 8355. – P. 83551E-1 – 83551E-10.

11. Балоев В.А., Ильин Г.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Эффективность, помехозащищенность и помехоустойчивость видовых оптико-электронных систем.

– Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2015. – 424 с.

12. *Holst G.* Electro-optical imaging system performance. 3 ed. – US: SPIE press, 2003. – 442 p.

13. Holst G. Optimum viewing distance for target acquisition // Proc. SPIE. – 2015. – V. 9452. – P. 94520K-1 – 94520K-7.

14. Holst G. An engineer's approach to system performance // Proc. SPIE. – 2007. – V. 6543. – P. 65430A-1 – 65430A-8.

15. *Fanning J., Teaney B.* Imaging system sensitivity analysis with NV-IPM // Proc. SPIE. – 2014. – V. 9071. – P. 90710J-1 – 90710J-15.

ИМИТАЦИОННОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ СТРУЙ САМОЛЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

ГРИГОРЬЕВ И.С., ГУСЕВА А.А.

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань

E-mail: gipo@telebit.ru, GrigorevIS@stud.kai.ru

Аннотация: Тематика трехмерного имитационного моделирования различных сюжетов давно развивается в АО «НПО ГИПО». Компьютерные имитационные модели, оснащенные реальными физическими характеристиками, применяются, в частности, для оптимизации конструкций современных оптико-электронных систем, работающих в сложных погодных условиях, различных географических широтах, при различной орографии подстилающих поверхностей и освещенности визируемых сцен и разнообразных ракурсах наблюдения. Данная работа посвящена имитационному математическому моделированию излучения струй самолетных двигателей с использованием шейдерных подпрограмм и параллельного расчета уравнения переноса излучения на ресурсах видеокарты. Для графической реализации модели используется стандарт ОреnGL.

Ключевые слова: шейдерные подпрограммы, параллельные вычисления, уравнение переноса излучения, метод дискретных ординат.

MATHEMATICAL COMPUTER SIMULATION OF AIRCRAFT ENGINE JET RADIATION

GRIGOREV I.S., GUSEVA A.A.

JSC Scientific and Production Association State Institute of Applied Optics

E-mail: gipo@telebit.ru, GrigorevIS@stud.kai.ru

Abstract: The subject of three-dimensional simulation of various scenes has been developing in JSC «NPO «GIPO» for a long time. Computer simulation models equipped with real physical characteristics are used, in particular, to optimize the designs of modern optoelectronic systems operating in difficult weather conditions, different geographical latitudes, with different orography of underlying surfaces and illumination of visible scenes and a variety of viewing angles. This work is devoted to the mathematical simulation of radiation jets of aircraft engines using shader subroutines and parallel calculation of the equation of radiation transfer on the resources of the graphics card. The OpenGL standard is used for graphical implementation of the model.

Keywords: shader subroutines, parallel computing, radiation transfer equation, discrete ordinate method.

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача данной работы — создание трехмерной имитационной модели излучения горячих выхлопных струй, образованных продуктами сгорания в авиационных двигателях. Специфика задачи следующая. Обычно для решения уравнений переноса излучения и Навье-Стокса используются численные алгоритмы, подразумевающие построение расчетной сетки, и требующие достаточного времени для своей реализации. Нам же необходимо реализовать алгоритм, который будет, во-первых, применим по быстроте к задачам трехмерной визуализации на стандартной видеокарте, во-вторых, будет обладать максимально реализуемой теоретической строгостью. Результат моделирования представляет собой трехмерный объект, над которым возможно производить различные пространственные преобразования, при каждом из которых в параллельном режиме реализуется эффективный расчет яркости при масштабировании и вращении модели скорость расчета излучения достаточна для плавного изменения картинки. У задачи, в той форме, в которой она описана, есть две крайности. Первая связана со способом визуализации, применяемой в индустрии видеоигр, в которой полупрозрачные среды зачастую моделируются трехмерными картинками (текстурами), не несущими в себе реального физического смысла. Вторая крайность связана со строгим расчетом сначала уравнений Навье-Стокса (получение распределения температур), а затем уравнения переноса излучения (для расчета яркости в заданном направлении). Этот метод требует большого количества времени. В представленной работе реализован подход, в котором сочетаются высокая скорость расчета и визуализации, с одной стороны, и методологическая корректность – с другой. По вопросу расчета уравнения переноса излучения к преимуществам данной работы стоит отнести использование непосредственно уравнения переноса излучения без его упрощенных феноменологических модификаций [1], что обеспечивает устойчивость дальнейшего развития программного продукта.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МОДЕЛИ И ПРИБЛИЖЕНИЯ

Задача расчета струй традиционно включает в себя два этапа: расчет пространственных распределений газодинамических параметров (температуры, давления, скорости, плотности) и расчет уравнений переноса излучения. Для исключения расчетов уравнений Навье-Стокса, первый этап реализуется с использованием аналитической теории турбулентных струй Абрамовича [2]. Ее преимущества заключаются в том, что она позволяет единым образом описать распределение параметров потока в струе в зависимости от соотношения скоростей потока и температур на срезе сопла и во внешней среде (соответственно, т и в). Основной недостаток - теория предназначена для расчетных струй (когда давление на срезе сопла равно атмосферному). Равенство этих давлений обеспечивает максимальную тягу сопла, поэтому на практике реализуется в основном вариант слабых отклонений от изобарического течения. Однако неизобаричность все же меняет паттерн распределения температур.

Традиционно в струе выделяют три участка: начальный, характеризующийся наличием потенциального ядра течения, переходный и основной [2]. В работе [3] произведен анализ модели Абрамовича, на основании которого принята достаточность рассмотрения только начального и небольшого куска переходного участков струи, ввиду наибольшего вклада в ИК- излучение именно от этих областей. Граница струи находится с использованием уравнения, описывающего увеличение толщины слоя смешения (г) от продольной координаты (х):

$$\frac{dr}{dx} = C \frac{u_1 - u_2}{\overline{u}}$$

где $u_1 u u_2$ – скорости потока на границах слоя смешения, \overline{u} – средняя скорость, C – константа. Величина константы определяет величину начального участка струи при фиксированных соотношениях температур и скоростей струи и спутного потока.

Уравнение переноса излучения рассматривается в постановке неизотермической нерассеивающей среды. Форму уравнения, выражающего собой запись формального решения уравнения переноса излучения, возьмем как в [4]:

$$I_{\lambda} = J_{\lambda}^{em,soplo} \exp\left[-\int_{0}^{s} k_{\lambda}^{gas}(s')ds'\right] + \int_{0}^{s} \left[J_{\lambda}^{em,gas}(s')\right] \exp\left[-\int_{s'}^{s} k_{\lambda}^{gas}(s'')ds''\right]ds'$$
(1)
$$I^{em,soplo} = L^{soplo} B_{\lambda}(T_{\lambda})$$

$$J_{\lambda}^{em,gas} = k_{\lambda}^{gas} J_{\lambda}^{black} = B_{\lambda}(T(s)) \sum_{i} k_{\lambda}^{gas_{i}},$$

где I_{λ} – спектральная интенсивность излучения, Вт ср⁻¹м⁻²мкм⁻¹;

 k_{λ} – спектральный объемный коэффициент поглощения, м⁻¹;

 $B_{2}(T)$ – функция Планка, Вт ср⁻¹м⁻²мкм⁻¹;

Такая форма позволяет единообразно учесть в расчете как вклад от внутренних стенок сопла (soplo), так и самого горячего объема струи (gas). Интегрирование производится по длине участка линии визирования, заключенного внутри излучающего объема (рис. 1). Для расчетов используются параллельные вычисления с использованием ресурсов видеокарты и шейдерных подпрограмм, поэтому за метод вычисления изначально был принят метод дискретных ординат. Только если, например, в [4] метод дискретных ординат аппроксимирует угловое распределение интенсивности излучения путем построения множества дискретных ординат из каждой точки расчетной области, в нашем случае мы получаем интенсивность излучения в конкретной точке наблюдения путем построения множества дискретных ординат, соединяющих точку наблюдения и точки поверхности струи (рис. 1)

Для коэффициентов поглощения молекул воды и углекислого газа использовалась база данных HITRAN [5].



Рисунок 1. К параллельному расчету линий визирования трехмерного тела, покрытого полигонами

Вдоль каждой линии визирования осуществляется параллельный расчет координат точек пересечения с поверхностью струи и уравнения переноса излучения в форме (1). Для интегрирования по длине волны строилась аналитическая аппроксимация коэффициентов поглощения углекислого газа и воды с помощью программного пакета OriginLab. Аналитическое представление спектров и распределения температур позволяет осуществлять интегрирование как по толщине так и по длине волны, используя метод Симпсона

В первую очередь необходимо отметить особенности работы со спектральной базой данных HITRAN. Используя доступ к базе данных через модуль HITRANOnline, можно получать необходимые коэффициенты поглощения (absorptionCoefficient) в размерности см⁻¹. Далее при желании можно получить безразмерный спектр коэффициента поглощения (absorptionSpectrum), соответствующего определенной пространственной длине L, на которой происходит поглощение (по умолчанию эта длина составляет 100 см). По смыслу безразмерный спектр связан с размерным соотношением

$absorptionSpectrum = 1 - exp[-absorptionCoefficient \cdot L].$

Ввиду принятой модели неизотермического газа, в расчетах используется размерный коэффициент поглощения.

Рассмотрим геометрическую реализацию струи. Поверхность струи представляет собой конус, меньшее сечение которого принадлежит плоскости сопла, а наибольшее сечение принадлежит плоскости конца струи. Используемый способ покрытия поверхности полигонами применим для любого осесимметричного тела, граница которого задана гладкой функцией. Однако данный подход не ограничивается теориями, использующими аналитическое описание параметров струй, но также принципиально применим к данным, представляющим собой результат расчетов в пакетах вычислительной газодинамики. Сначала производится разбиение вдоль двумерной границы - в массивы записываются координаты точек и нормалей, остальные координаты на поверхности находятся путем вращения найденных координат границы. Существенным для передачи геометрии в виде буферного объекта на видеокарту является способ перечисления индексов и координат полигонов – необходимо избежать повторных учетов точек. Боковую поверхность тела вращения можно представить в виде замкнутого на себя прямоугольника, образующего границу стыка. Также сечение основания конуса может быть представлено в виде объединения замкнутого прямоугольника и круга. Тогда вдоль каждой границы замыкания внутри прямоугольников, между прямоугольниками, и между прямоугольником и кругом необходимо перечислять индексы вершин, избегая их повторного учета.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2 представлены полученные изображения струи в инфракрасном диапазоне длин волн. В рассмотренном диапазоне корпус самолета не виден, поэтому на рисунке слева, чтобы сопоставить размеры струи и самолета использовано низкоэнергетическое представление. При фиксированных геометрических габаритах струй (их длина примерно равна длине самолета), и фиксированной температуре на форсажном и максимальном режимах работы двигателя, а также при принятом алгоритме расчета возможность варьировать выходные расчетные яркости определяется, во-первых, качеством используемых спектров коэффициентов поглощения, а во-вторых, наличием области догорания продуктов сгорания (факел). На текущем этапе разработки для форсажного режима расчет дает немного заниженные результаты по сравнению с экспериментальными данными. Однако использование коэффициентов поглощения при ином значении концентраций излучающих компонент, а также введение пограничного слоя догорания, решит данную проблему.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализованный алгоритм расчета яркостей струй отличается компактным теоретическим содержанием, благодаря использованию коэффициентов поглощения из базы данных HITRAN, а также применению параллельного расчета основного уравнения теории переноса излучения. Сформированный подход к расчету уравнения переноса излучения позволяет перейти к разработке расчета излучения по данным, представленным в виде числовых массивов. Теория Абрамовича дает хорошее приближение для расчетов реальных струй. Ее аналитичность позволяет производить расчеты с достаточной для непрерывного графического отображения скоростью. Однако интерес



Рисунок 2. Струя в энергетических единицах





Рисунок 3. Пространственно немонотонное распределение температур в струе

представляют и более сложные паттерны распределения температур, как на рис. 3. Справа от фотографии самолета помещено изображение распределения температур, рассчитанное в пакете вычислительной газодинамики для неизобарической струи.

Для повышения натуралистичности трехмерных моделей струй предполагается построение обобщенного алгоритма расчета уравнения переноса излучения на видеокарте, работающего не только с аналитическими моделями, но также и с результатами расчетов в пакетах вычислительной газодинамики. При этом в качестве отрисовываемой поверхности струи можно также использовать конус, однако необходимо будет учитывать более сложное распределение температур.

После реализации алгоритма расчета уравнения переноса излучения основные сложности относятся к компактному, но информативному заданию коэффициентов поглощения, изменяющихся в общем случае с изменением температуры и давления, а в случае применения численных расчетов струй – к способам эффективной обработки массивов газодинамических параметров. Для более тонкой работы с коэффициентами поглощения, равно как и с геометрическими вариациями паттернов температуры, возможно дальнейшее построение соответствующих регрессионных моделей.

Список литературы:

1. W. Du The plume infrared radiation based on visualization computing[Tekct]/Du W., Fang N.//2016 MCEMIC . – 2016. – p. 115-121.

2. *Абрамович, Г.Н.* Теория турбулентных струй [Текст] / Г.Н. Абрамович. – М. : Наука. – 1960. – 715 с.

3. *Григорьев, И.С.* Математическая модель излучения дозвуковой турбулентной струи [Текст]: диссертация на степень магистра ф-.м. наук:03.04.02: защищена 25.06.2017: утв. 23.06.2017 / Григорьев Иван Сергеевич. – Казань, 2017. – 106 с.

4. *Суржиков, С.Т.* Тепловое излучение газов и плазмы [Текст] / С.Т. Суржиков. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2004. – 544 с.

5. *Rothman, L.S.* The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database [Текст] / L. S. Rothman // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. – 2009. – Vol.110. – P. 533 – 572

List of literature:

1. W. Du The plume infrared radiation based on visualization computing[Text]/Du W., Fang N.//2016 MCEMIC . - 2016. - p. 115-121.

 Abramovich, G.N. Teoriya turbulentnyh struj [Theory of turbulent jets] [Text] / G.N. Abramovich. – M.
 Science. – 1960. – 715 p.

3. *Grigorev, I.S.* Matematicheskaya model' izlucheniya dozvukovoj turbulentnoj strui [Mathematical model of radiation of a subsonic turbulent jet] [Text]: thesis for a master's degree of f-m. science:03.04.02: protected 25.06.2017: approved 23.06.2017 / Grigorev Ivan Sergeevich. – Kazan, 2017. – 106 p.

4. *Surzhikov, S.T.* Teplovoe izluchenie gazov i plazmy [Thermal radiation of gases and plasma] [Text] / S.T. Surzhikov. – M. : MSTU n. a. N.E. Bauman. – 2004. – 544 p.

5. *Rothman, L.S.* The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database [Text] / L. S. Rothman // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. – 2009. – Vol.110. – P. 533 – 572



ПРОБЛЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ЦЕЛЕЙ

МУРЗИН П.Е., ПОЗДНЯКОВ А.А., ШУЛЬГА И.Н.

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

3-я научная рота Космических войск Воздушно-космических сил РФ

E-mail: nrkvvks@mail.ru, drunia-kreng@rambler.ru, shulgain66@mail.ru

Аннотация: Цель данной статьи наглядно рассмотреть принципы формирования подходов, методов и алгоритмов цифровой обработки сигналов, в части касающейся радиолокационного (РЛ) сопровождения целей, а также проблемы их совершенствования. Сюда включаются как методы построения базовых фильтров сопровождения, так и некоторые подходы к адаптивной фильтрации в условиях неопределенности. Вопросы моделирования целей и измерений, лежащих в основе синтеза фильтра не рассматриваются. Содержание статьи сопровождается схемой, на которой наглядно представлены указанные принципы. Схема показана на рис. 1.

Ключевые слова: фильтр сопровождения, фильтр Калмана, модель ускорения, нелинейная фильтрация.

DEVELOPMENT TROUBLES OF RADAR TRACKING METHODS

MURZIN P.E., POZDNYAKOV A.A., SHULGA I.N.

PJSC "Krasnogorskij Zavod named S.A. Zverev"

3-rd Scientific Company of the Space Forces of the Air and Space Forces of the Russian Federation

E-mail: nrkvvks@mail.ru, drunia-kreng@rambler.ru, shulgain66@mail.ru

Abstract: The aim of this work is to present visually generation rules of methods and algorithms of radar data processing in the radar tracking field. It suggests both building ways of basis tracking filter and some adaptive filtering ways and indeterminations resolution. Simulations of target motion and radar measures are not considered in the paper. Text is accompanied by the figure that present visually described rules.

Keywords: radar tracking filter, Kalman's filter, acceleration simulation, nonlinear filtering.

Теория оценивания и фильтрации является основой построения фильтров РЛ сопровождения целей. В соответствии с этим, в первую очередь принимается во внимание, какие модели описывают неизвестные параметры *х* и их измерения *z*, а также какая имеется априорная информация о модели вектора *x*.

В радиолокации составляющими вектора *х* могут являться истинные координаты обнаруженных целей в различных системах координат, а *z*, соответственно, их измерения, полученные с помощью РЛС.

Учитывая модели описания неизвестных параметров и их измерений, можно представить следующую классификацию [1]:

x – неизвестный детерминированный вектор,
 z – некоторая известная функция *x*, причём обращение этой функции невозможно;

x – неизвестный детерминированный вектор,
 z – известная функция *x*, искаженная шумом измерений;

х и *z* – случайные векторы, имеющие совместное распределение;

х – вектор состояния динамической системы, находящийся под воздействием случайного шума, *z* – вектор выходных сигналов, искаженный шумом измерений.

В зависимости от имеющейся **априорной** информации о модели вектора *x*, перечислим в порядке увеличения полноты информации функции и параметры, которые могут быть использованы [1]:

- функция, описывающая зависимость между векторами *х* и *z*;

- дисперсия шума измерений;

- статистические параметры первого и второго порядка совместного случайного вектора (*x*, *z*) – средние значения и дисперсии;

- функция распределения плотности вероятностей шума измерений;

- совместная плотность распределения (x, z);

- априорная плотность распределения *x*, а также совместное распределение (*x*, *z*).

Зная априорную информацию о модели цели, а также модели описания неизвестных параметров и их измерений, можно определиться с выбором **критерия оптимизации**. Приведем их в порядке увеличения полноты информации, с одной стороны, и порядке усложнения оценивателя, с другой стороны [1]:

- наименьших квадратов;

- взвешенных наименьших квадратов;

 минимальной средней квадратической ошибки;

- максимального правдоподобия;

 максимума апостериорной информации (байесовский).

К примеру, критерии наименьших квадратов и взвешенных наименьших квадратов используются в тех случаях, когда невозможно задать распределение *х* и *z*, и имеется весьма ограниченная информация об ошибке измерения. Критерий минимальной средней квадратической ошибки применяется в тех случаях, когда *х* и *z* – совместно распределенные случайные векторы.

Оценка по критерию максимального правдоподобия формируется только на основании знаний о распределении вероятностей ошибки измерений, и её значение не зависит от функции плотности распределения вероятностей *x*, а байесовский критерий может быть использован, если *x* – случайный вектор с априорно заданной плотностью распределения вероятностей [1].

Также при построении фильтра необходимо учитывать имеющиеся **ограничения** по таким признакам как [2]:

- характер текущего времени эволюции системы (дискретное или непрерывное время);

- вид уравнений, описывающих эволюцию системы (линейные или нелинейные уравнения), а также их зависимость от времени;

- полнота, имеющихся знаний о параметрах системы (полные и неполные знания).

В зависимости от имеющихся данных, выбранного на их основе критерия оптимизации оценивателя, модели движения цели и принятых ограничений строится структура фильтра. Наиболее распространенными из них являются:

- α – β фильтр – основывается на критериях наименьших квадратов и взвешенных наименьших квадратов. Он обеспечивает как сглаживание, так и экстраполяцию. Относится к алгоритмам рекурсивного типа;

- фильтр Винера и фильтр Калмана –



Рисунок 1. Схема формирования базового фильтра РЛ сопровождения

основывается на критерии минимальной средней квадратической ошибки. Первый используется, если процессы не зависят от времени, последовательность поступающих данных не ограничена, а фильтры стационарны и работают в установившемся режиме. Это приводит к формированию фильтра с постоянными параметрами. При втором, калмановском, подходе могут решаться нестационарные задачи при конечном интервале наблюдений. Такой подход приводит к синтезу нестационарного фильтра, при этом выражения для оценки сигнала и её ковариации имеют форму рекурсивных разностных или дифференциальных уравнений в зависимости от дискретного или непрерывного характера исследуемых вопросов [2].

Линейная модель часто является лишь приближенным описанием реальных динамических систем и наблюдаемых процессов, в то время как нелинейная более адекватно отображает реальные процессы. Развитие нелинейной фильтрации весьма важно для формирования РЛ алгоритмов сопровождения, поскольку во многих случаях зависимость между данными измерений и динамическими параметрами цели имеет нелинейный характер. Задача оценивания состояния нелинейной системы может рассматриваться как распространение среднего квадратического способа на динамический случай. Все существующие нелинейные оцениватели имеет субоптимальный характер:

- Расширенный фильтр Калмана. Представляет собой нелинейный субоптимальный алгоритм, основанный на том, что нелинейные функции перехода состояний системы, перехода состояний в результате воздействия входных сигналов и отображения состояний системы в результаты наблюдений, достаточно гладкие, то эти функции могут быть разложены в ряд Тейлора и аппроксимированы членами ряда невысоких порядков [3].

- Метод преобразования наблюдений. Он основан на задании процесса линейным уравнением, а связь процесса с наблюдениями нелинейным. В этом случае формируется фильтр, состоящий из нелинейного процессора без памяти, за которым следует обычный калмановский фильтр [1]. - Статистически линеаризованный фильтр. Применяется, когда аппроксимация с помощью ряда Тейлора невозможна. Применение статистической линеаризации приводит к формированию нелинейного субоптимального фильтра, имеющего структуру, определяемую калмановским фильтром для линеаризованной модели [4].

- Гауссовский фильтр второго порядка. При этом подходе в разложении нелинейностей в ряд Тейлора учитываются первые и вторые производные. При линейном уравнении измерений этот фильтр преобразуется в обычный калмановский фильтр, а при отбрасывании производных второго порядка – в расширенный калмановский фильтр [5].

Рассмотренные алгоритмы в соответствии с их сложностью и эффективностью можно представить в следующем порядке: расширенный калмановский фильтр реализует простейший алгоритм и даёт хорошие результаты при умеренных нелинейностях и невысоком уровне шума; Гауссовский фильтр второго порядка обеспечивает более высокое качество фильтрации за счёт усложнения алгоритма; наконец, метод статистической линеаризации позволяет добиться хороших результатов в различных случаях применения, однако требует больших вычислительных затрат. На практике для выбора наиболее подходящего алгоритма для конкретного применения необходимо проведения сравнительного анализа по критерию «стоимость-эффективность» [1]. Основной проблемой нелинейной фильтрации являются значительные трудности в выводе аналитических решений, поэтому приходится пользоваться приближенными численными решениями.

Эффективность применения рассмотренных подходов, методов и алгоритмов фильтрации в значительной степени определяется особенностями конкретной решаемой задачи.

Возможным решением проблем связанных с ограничением линейности фильтра, поиска субоптимальных решений задач осуществляется методами теории адаптивной фильтрации (рис. 2). Параметры таких фильтров корректируются в соответствии с входными данными.



Рисунок 2. Подходы к адаптивности фильтра сопровождения

Другими словами, алгоритм фильтра «подстраивается» к оцениваемым параметрам модели поступающей информации. В реальных системах сопровождения необходимо одновременно обеспечить высокое качество фильтрации шума и быстрое реагирование на резкие манёвры цели. Следовательно, в алгоритме сопровождения, удовлетворяющим этим требованиям, должны быть предусмотрены средства обнаружения факта маневрирования и адаптации параметров и (или) архитектуры фильтра в соответствии со складывающейся реальной обстановкой [5,6].

Возможным решением этой проблемы является использование процедуры обнаружения манёвра, которая предполагает адаптивную подстройку параметров фильтра в соответствии с оценкой ускорения. Данная процедура может быть реализована с помощью формирования узкого (внутреннего) и широкого (внешнего) стробов в экстраполированной точке. Если отметка о цели попадает во внутренний строб, то значения параметров фильтра устанавливаются небольшими. И, напротив, если отметка выходит за пределы внутреннего строба, но попадает во внешний, то значения пара-метров увеличиваются. Действия, предпринимаемые после обнаружения манёвра, представляют собой повторное инициирование фильтра. При использовании предложенной процедуры следует учитывать возможности замирания отраженных сигналов и ложные тревоги. В этих целях при обнаружении манёвра могут формироваться две траектории. Первая траектория строится по отметкам, попадающим во внешний строб; при построении второй траектории отметки внешнего строба не учитываются, а экстраполируется уже имеющаяся траектория. Неопределенность снимается после нескольких последовательных циклов обзора и одна из траекторий стирается. Рассмотренные процедуры просты и дают хорошие результаты, если ускорение цели невелико, вероятность обнаружения высока и вероятность ложной тревоги мала. Кроме того, траектории целей должны быть разнесены в пространстве на достаточно большое расстояние. Однако в реальных условиях указанные

допущения не всегда выполняются, что приводит к неопределенностям при сопоставлении отметок и траекторий [1].

Эффективность алгоритмов может быть повышена при разделении траекторий на классы (например, стационарные, баллистические траектории, траектории с маневрирующей целью) и последующей их обработке с учётом приоритета каждого класса и с использованием различных корреляционных стробов. Допустимо также принятие гипотезы о возможности обновления траектории с учётом ошибочно выбранной отметки. Вероятность этого события является мерой достоверности процесса привязки. Следует отметить подход, при котором используется дополнительная информация об отметках траекториях. Например, повышения точности привязки, осуществленной с использованием меры пространственной близости, можно добиться, анализируя ситуацию с учётом измерений радиальной скорости [1].

Чтобы избежать использования стробов очень больших размеров при сопровождении стационарных и баллистических целей, размер корреляционного строба согласовывается с классом цели. При сопровождении баллистической цели размер строба зависит от ошибок измерений и экстраполяции, а при сопровождении маневрирующей цели учитывается также её ускорение [1].

Рассмотрим алгоритм обнаружения манёвра. Он представляет собой решающее правило, с помощью которого определяется момент начала манёвра. Кроме того, такой алгоритм позволяет оценить параметры (интенсивность, длительность) манёвра. Алгоритм основан на обработке обновляющей последовательности в фильтре сопровождения с достаточно узкой полосой, необходимой для подавления шума и сопровождения баллистических целей. Если манёвры являются событиями редкими, то используется обычный калмановский фильтр. Однако, если маневрирующие цели всё же появляются, то обнаружение манёвра осуществляться на основе анализа обновляющей последовательности. Обнаружение манёвра может быть основано на контроле в реальном времени обновляющей последовательности и

выявлении отклонений среднего значения от нуля, а самой последовательности от гауссовского некоррелированного процесса [1].

Методы сопровождения охватывают три связанные между собой задачи:

- обнаружение манёвра;

- коррекция оценки состояния калмановского фильтра для компенсации ошибки, обусловленной начальной стадией манёвра;

- настройка параметров калмановского фильтра в соответствии с ожидаемым манёвром.

При решении задачи обнаружения манёвра цели наибольшие трудности вызывает формирование модели манёвра. После того как выбор модели манёвра цели сделан, используется обычно один из двух подходов. При подходе, предложенном Бар-Шаломом, после обнаружения манёвра осуществляется повторная инициализация фильтра на основе результатов последних измерений. При этом исходят из того, что поскольку новые параметры фильтра получены по данным характеризующим манёвр цели, то ошибка корректируется автоматически. При втором подходе оцениваются (по критерию минимума средней квадратичной ошибки) входные параметры (время начала и интенсивность) манёвра цели. Затем данные оценки используются для корректировки фильтра. Два указанных метода существенно отличаются друг от друга. В первом случае обнаружение манёвра и коррекция рассматриваются как самостоятельные задачи. Во втором случае эти задачи решаются совместно, что позволяет непрерывно и рекурсивно производить вычисления [1].

На критериях максимального правдоподобия и максимума апостериорной информации основываются **подходы адаптивности** линейных фильтров такие как:

- Оптимальный и субоптимальный байесовский подход. В оптимальном подходе учитываются все возможные варианты параметров или гипотез относительно модели. Для каждого из них вычисляется оценка состояния, которая затем взвешивается с учётом апостериорной вероятности верной гипотезы. В Субоптимальном подходе производится свёртывание информации о всех траекториях до момента k-1 в один усредненный параметр;

- Метод «ближайшего соседа». В этом подходе отметка ближайшая к экстраполированному положению (т.е. отметка, соответствующая наиболее правдоподобной гипотезе), принимается за истинную отметку о цели, а все остальные отбрасываются. Поэтому на каждом шаге только одна отметка вводится в калмановский фильтр в качестве результата наблюдения ;

- Метод разветвления траекторий. В этом подходе на каждом шаге алгоритм «разветвляется», и формируется большое количество параллельно поддерживаемых траекторий, каждая из которых взвешивается с соответствующей функцией правдоподобия. Траектории, правдоподобие существования которых находится ниже заданного порога, отбрасываются. Это позволяет ограничить число ветвей алгоритма.

Свойство адаптивности фильтра используется для его подстройки в случае возникновения неопределенностей. В теории цифровой обработки радиолокационной информации существует **два основных источника неопределенностей**:

 непредсказуемые манёвры целей (неопределенность содержится в параметрах модели);

- наличие многочисленных отметок, вызванных отраженными от множества целей или ложными тревогами [1].

Кроме указанных, также нашёл распространение метод адаптивности, основанный на обнаружении расходимости фильтра и адаптации усиления фильтра.

Считается [1], что имеет место расходимость, если средняя квадратичная ошибка оценивания намного превышает величину оценки, при этом значение средней квадратичной ошибки может со временем неограниченно возрастать. При работе в реальном времени надежное обнаружение расходимости имеет большое значение. В системах сопровождения одним из основных источников расходимости является манёвр цели, особенно в том случае, когда фильтр сопровождения достиг установившегося режима и усиление его мало (фильтр узкополосен). Когда ожидаемые значения дисперсии ускорения незначительны, усиление фильтра уменьшается. Другими словами, фильтр сопровождения имеет узкую полосу пропускания и соответствующие средние квадратичные ошибки очень малы. С другой стороны, на участке ускорения цели наблюдаются очень большие смещения оценок. С увеличением значения ускорения полоса фильтра расширяется и смещение оценок уменьшается из-за повышения среднего квадратичного значения ошибок [1].

Способы обнаружения расходимости:

 наличие смещения от нулевого среднего значения;

- превышение истинной ковариации значения ковариации оптимального фильтра;

 отличие спектра обновляющей последовательности от процесса типа белого шума;

- сравнение функции обновляющей последовательности с заданным порогом.

Действия после обнаружения расходимости:

- повторная инициализация фильтра;

- увеличение размерности матрицы ковариации случайных входных сигналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрев кратко изложенные принципы, методы построения фильтров РЛ сопровождения, нетрудно заметить, что на современном этапе широко используются субоптимальные фильтры, разработанные для выполнения прикладных задач, причём строгие решения на практике не реализуемы. Пути совершенствования методов РЛ сопровождения связаны с синтезом различных подходов, с разработкой методов получения дополнительной информации о наблюдаемых системах, моделях взаимосвязи этих систем и результатов их измерений, сужения или расширения имеющихся ограничений, разработкой новых или усовершенствованием имеющихся критериев оптимизации оценивателей, и построением на основе новых исходных данных базовых фильтров сопровождения. Также далека от завершения теория адаптивной фильтрации, пути совершенствования которой представляются в синтезе различных подходов адаптации, а также в разработке алгоритмов последовательного и параллельного применения различных подходов, и построения на этих основах новых адаптивных фильтров.

Список литературы:

1. *А. Фарина, Ф. Студер*. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей // Пер. с англ. Под ред. А.Н. Юрьева. – М.: Радио и связь, 1993. – 322 с.

2. В.Е. Фербер. Основы траекторной обработки радиолокационной информации в многоканальных РЛС // Учебное пособие – М.: МФТИ, 2005. – 160 с.

3. *B.D.O. Anderson & J.B. Moore.* Optimal Filtering // Information and System Sciences Series, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ. – 1979.

4. *A.H. Jazwinski.* Stochastic Processes and Filtering Theory // Academic Press, New York. – 1970.

5. *A. Gelb.* Applied Optimal Estimation // The MIT Press. – 1974.

6. *D.G. Lainiotis.* Optimal adaptive estimation: structure and parameter adapta-tion // IEEE Trans. – 1971. Vol. AC-16, pp. 160 – 170



ОБРАБОТКА ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ЛАЗЕРНОГО ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

ГОРОДНИЧЕВ В.А., БЕЛОВ М. Л., БЕЛОВ А. М., МИХАЙЛОВСКАЯ М.Б.

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

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

Аннотация: В статье проведен анализ возможности лазерного моноимпульсного метода монито-ринга коэффициента отражения природных образований при использовании для обработки данных измерений алгоритма муравьиной колонии. Математическое моделирование показывает, что лазерный моноимпульсный метод позволяет измерять пространственное распределение коэффициента отражения на земной поверхности в большом секторе обзора лидара. Использование гибридного муравьиного алгоритма для восстановления из данных измерений пространственного распределения коэффициента отражения обеспечивает получение результатов с приемлемой погрешность (с погрешностью определения коэффициентов разложения не более 20 – 27% процентов при шуме измерения 1 - 3 %) в условиях сильно и нелинейно меняющегося (по пространственной координате) пространственного распределения коэффициента отражения

Ключевые слова: лазерное зондирование, моноимпульсный метод, земная поверхность, коэффициенты отражения.

PROCESSING THE MEASURED DATA FOR LASER REMOTE SENSING OF LANDSCAPE ELEMENTS

GORODNICHEVV.A., BELOV M.L., BELOV A.M., MIKHAYLOVSKAYA M.B.

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

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

Abstract: The paper discusses feasibility of laser monopulse method for sounding of landscape ele-ments reflectivity when using ant colony algorithm for processing the measured data. Mathematical simulation shows that laser monopulse method allows reconstruct of reflectivity spatial distribution on earth surface in coverage area of lidar receiving optical system. Using of hybrid ant algorithm for reconstruct of reflectivity spatial distribution from measured data provides to obtain results with reasonable error (with error of expansion coefficients estimate no more 20 - 27% for relative measurement noise 1 - 3%) for greatly and nonlinear variable (in spatial coordinate) reflectivity spatial distribution.

Keywords: laser sounding, monopulse method, land surface, reflectivity.

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений мониторинга состояния земной поверхности является дистанционный контроль с использованием аппаратуры, установленной на авиационном или космическом носителе и работающей в различных диапазонах спектра.

В оптическом диапазоне спектра для ряда практических задач эффективным является использование лидарных (активных импульсных) систем зондирования. Достоинством лидарных систем зондирования является возможность работы в широком диапазоне атмосферных условий и независимо от времени суток. При этом в лидарных системах авиационного базирования полоса зондирования (на земной поверхности) обеспечивается использованием сканирования или метода моноимпульсного зондирования (без сканирования) (см., например, [1-4]).

В лидарных системах авиационного базирования со сканированием поперечная развертка формируется за счет сканирования зондирующего лазерного пучка в плоскости, перпендикулярной направлению движения авиационного носителя.

Для упрощения аппаратуры используют моноимпульсные системы (использующие одноплощадочный фотоприемник и не требующие сканирующей системы). Их работа основана специальной обработке импульсного лазерного эхо-сигнала, отраженного от земной поверхности.

Одной из задач зондирования земной поверхности является мониторинг коэффициента отражения природных образований, который представляет интерес для ряда практических приложений (например, задач, связанных с контролем сельскохозяйственных культур или контролем состояния лесов).

Ниже в статье анализируются возможности лазерного моноимпульсного метода мониторинга коэффициента отражения природных образований при использовании для обработки данных измерений алгоритма муравьиной колонии.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Схема наклонного моностатического (оптические оси источника и приемника лидара совмещены и лежат в одной плоскости, перпендикулярной направлению полета) моноимпульсного мониторинга показана на рис.1.

Лидар, расположенный на авиационном носителе, облучает земную поверхность (считаем ее трехмерной случайно неровной в среднем плоской локально-ламбертовской поверхностью [4]) под углом к нормали при широком угле расходимости лазерного пучка (считаем его далее равным углу поля зрения приемной оптической системы лидара.

Для схемы наклонного лазерного мониторинга, приведенной на рис. 1, продольная развертка формируется за счет полета авиационного носителя, а поперечная – за счет использованием моноимпульсного метода зондирования, основанного на специальной обработке регистрируемого лидарного сигнала, отраженного от земной поверхности в широком угловом секторе обзора.

Как показано в [3] формула для временной реализации лидарного сигнала (регистрируемого в схеме моностатического наклонного мониторинга, показанной на рис.1), может быть (после ряда преобразований) представлена в виде

$$B(\tau) \cong \int_{a}^{b} R_{omp}(x) f(\tau - x) dx \quad , \tag{1}$$



Рисунок 1. Схема наклонного моностатического лазерного зондирования

 $B(\tau)$ - мощность регистрируемого лидарного сигнала;

(*a*,*b*) - область интегрирования по *x* на поверхности (в направлении поперек движения авиационного носителя);

 $R_{_{omp}}(x)$ - пространственное распределение коэффициента отражения земной поверхности вдоль оси x.

Выражение (1) – это интегральное уравнение первого рода типа свертки. В его левой части стоит временная реализация лидарного сигнала, а под интегралом в правой части стоит пространственное распределение коэффициента отражения $R_{omp}(x)$ на земной поверхности.

Моноимпульсный метод в схеме наклонного моностатического лазерного зондирования использовался в [3] для задачи мониторинга коэффициента отражения природных образований. Однако, в работе [3] для обработки временной реализации сигнала использовался переход от интегрального уравнения к его дискретному аналогу [5]. Поэтому моноимпульсный метод в [3] хорошо работает только при небольших шумах измерения (при относительном среднеквадратическом значении шума не более 0,5 %) и при линейном и плавно изменяющимся (не более чем в два раза) пространственном распределении $R_{omp}(x)$.

Цель статьи - анализ лазерного моноимпульсного метода мониторинга коэффициента отражения природных образований при реальных шумах измерения в условиях сильно и нелинейно изменяющегося пространственного распределения коэффициента отражения природных образований.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА МУРАВЬИНОЙ КОЛОНИИ ДЛЯ ПОИСКА КВАЗИРЕШЕНИЙ В ЗАДАЧЕ МОНОИМПУЛЬСНОГО ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Задача нахождения пространственного распределения $R_{omp}(x)$ из (1) является некорректной математической задачей, для решения которой используются специальные методы [5,6].

Положим, что пространственное распределение коэффициента отражения $R_{omp}(x)$ может быть представлено в модельном виде – в виде многочлена

$$R_{omp}(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \tag{2}$$

В этом случае пространственное распределение коэффициента отражения $R_{omp}(x)$ зависит от трех неизвестных параметров – a_0, a_1, a_2 . Для восстановления этих параметров по данным измерений необходимо провести измерения лидарного сигнала $B(\tau)$ в некоторые моменты времени и решить следующую систему интегральных уравнений

$$B_{\text{mod}}(\tau_n, a_0, a_1, a_2) = B_{\text{meas}}(\tau_n)$$

где

n - число измерений;

 $B_{\text{meas}}(\tau_i)$ - измеренное в момент времени τ_i значение лидарного сигнала $B(\tau)$;

 $B_{\rm mod}(\tau_i, a_0, a_1, a_2)$ - модельное значение лидарного сигнала $B(\tau)$ в момент времени τ_i (зависящее от трех неизвестных параметров – a_0, a_1, a_2).

Определим функцию невязки $\Delta(a_0, a_1, a_2)$ между измеренными и модельными значениями сигнала

$$\Delta(a_0, a_1, a_2) = \sum_{i=1}^{n} [B_{\text{meas}}(\tau_i) - B_{\text{mod}}(\tau_i, a_0, a_1, a_2)]^2$$
(4)

Значения параметров a_0, a_1, a_2 , обращающие в ноль функцию невязки $\Delta(a_0, a_1, a_2)$, будут решением системы интегральных уравнений (3). Однако, даже при наличии небольшого шума измерения возникают ситуации, когда решение системы уравнений (3) не существует [5,6]. Для решения таких некорректных математических задач одним из эффективных методов является метод поиска квазирешений [5-8].

Метод поиска квазирешений (для нахождения пространственного распределения $R_{omp}(x)$ из (1)), состоит в том, что для разных значений компонент вектора $\vec{A} = (a_0, a_1, a_2)$ (в области M значений параметров, удовлетворяющих физическому смыслу задачи) решается прямая задача - вычисляются модельные значения лидарного сигнала $B_{mod}(\tau_i, a_0, a_1, a_2)$), а затем - находится вектор параметров $\vec{A} \in M$ который минимизирует невязку $\Delta(a_0, a_1, a_2)$ между измеренными и модельными значения

ми сигнала. Найденный вектор параметров является квазирешением системы интегральных уравнений (3) и находится из условия

$$\Delta(\vec{A}) = \inf_{\vec{A} \in M} \sum_{i=1}^{n} [B_{\text{meas}}(\tau_i) - B_{\text{mod}}(\tau_i, a_0, a_1, a_2)]^2 (5)$$

rge

 $\inf_{\overline{A} \in M} \rho$ - точная нижняя граница величины расстояния ρ между измеренными и модельными значениями сигнала в области ограниченной значениями параметров a_0, a_1, a_2 , определяемыми физическим смыслом задачи.

Таким образом, задача поиска квазирешения системы интегральных уравнений (3) сводится к нахождению минимума функции $\Delta(a_0, a_1, a_2)$ в области значений параметров a_0, a_1, a_2 определяемой физическим смыслом задачи.

Вид функции невязки $\Delta(a_0, a_1, a_2)$ представлен на рис. 2. Здесь показан вид функции невязки $\Delta(a_0, a_1)$ для $a_2 = 0,025$.

Для нахождения минимума функции $\Delta(a_0, a_1, a_2)$ можно использовать метод перебора по значениям параметров a_0, a_1, a_2 . Однако, использование метода перебора в большинстве случаев требует значительного объема вычислений. Поэтому возникает необходимость использовать более сложные, но более быстрые алгоритмы поиска.

В настоящее время интенсивно разрабатывается математические методы, в которых заложены механизмы принятия решений, существующие в природе. Эти принципы принятия решений обеспечивают эффективную адаптацию фауны к природной среде и эффективно работают при решении задач оптимизации.



Рисунок 2. Вид функции невязки $\Delta(a_0, a_1)$

В работе для поиска квазирешений был использован алгоритм муравьиной колонии (см., например, [9-16]).

Муравьиные алгоритмы представляют собой один из наиболее эффективно работающих классов алгоритмов оптимизации, инспирированных живой природой. В основу этих алгоритмов положено моделирование самоорганизации в муравьиной колонии, как многоагентной системе, в которой каждый агент (муравей) функционирует по очень простым правилам, но поведение системы в целом оказывается высоко рациональным.

Суть муравьиных алгоритмов поиска заключается в анализе и использовании модели поведения муравьёв, ищущих пути от колонии к источнику питания, и представляет собой метаэвристическую оптимизацию.

Общение между муравьями происходит через каналы прямого взаимодействия и стигмергии. Прямое взаимодействие между агентами осуществляется посредством обмена пищей и выделениями желез.

Непрямой обмен – канал стигмержи (стигмергии, stigmergy), представляет собой разнесённое во времени взаимодействие, при котором одна особь изменяет некоторую область окружающей среды, а другие используют эту информацию позже, когда в неё попадают. Биологи установили, что такое отложенное взаимодействие происходит через специальное химическое вещество – феромон (pheromone), секрет специальных желёз, откладываемый при перемещении муравья. Концентрация феромона на пути определяет предпочтительность движения по нему.

Идея муравьиного алгоритма – моделирование поведения муравьёв, связанного с их способностью быстро находить кратчайший путь от муравейника к источнику пищи и адаптироваться к изменяющимся условиям, находя новый кратчайший путь. При своём движении муравей метит путь феромоном, и эта информация используется другими муравьями для выбора пути. Это элементарное правило поведения и определяет способность муравьёв находить новый путь, если старый оказывается недоступным. Очевидная положительная обратная связь быстро приведёт к тому, что кратчайший путь станет единственным маршрутом движения большинства муравьёв. Моделирование испарения феромона – отрицательной обратной связи – гарантирует нам, что найденное локально оптимальное решение не будет единственным – муравьи будут искать и другие пути.

Общие этапы создания метода поиска на основе муравьиного алгоритма [9-16]:

1. Представление задачи в виде набора компонент и переходов или набора неориентированных взвешенных графов, на которых муравьи могут строить решения.

2. Определение значение следа феромона.

3. Определение эвристики поведения муравья, при построении решение.

4. Реализация эффективного локального поиска.

5. Выбор наиболее подходящего для решения задачи муравьиного алгоритма.

6. Настройка параметров муравьиного алгоритма.

В работе был использован гибридный алгоритм непрерывно взаимодействующей муравьиной колонии (Hybrid Continuous Interacting Ant Colony, HCIAC) [10,14]. Этот алгоритм исправляет некоторые недостатки классического алгоритма муравьиной колонии и повышает его эффективность. Алгоритм использует комбинацию глобального поиска муравьиным алгоритмом и локального поиска классическим алгоритмом Нелдера-Мида (алгоритмом деформируемого многогранника) [17].

Метод Нелдера-Мида — метод оптимизации (поиска минимума) функции от нескольких переменных. Простой и в тоже время эффективный метод, позволяющий оптимизировать функции без использования градиентов. Метод заключается в формировании симплекса (геометрической фигуры, являющейся n - мерным обобщением треугольника) и последующего его деформирования в направлении минимума, посредством трех операций: отражения; растяжения, сжатия. Работа алгоритма заканчивается, когда выполнено заданное количество итераций или площадь симплекса достигла заданной величины или текущее лучшее решение достигло необходимой точности. Для оценки возможности лазерного моноимпульсного метода мониторинга коэффициента отражения природных образований при использовании для обработки данных измерений гибридного алгоритма муравьиной колонии HCIAC проводилось математическое моделирование.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЛИДАРНОГО МОНОИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА МОНИТОРИНГА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ

При проведении статистического моделирования поиск решения гибридным муравьиным алгоритмом останавливался либо через 1000 итераций алгоритма, либо когда за последние 10 итераций относительное изменение (между итерациями) функции невязки не превышало 10^{-10} . Для получения решения гибридный муравьиный алгоритм запускался 20 раз и к качестве решения принимался набор параметров, обеспечивающий наилучший (в смысле наименьшего значения функции невязки) результат.

Число измерений задавалось в диапазоне от 4 до 8. Задаваемые диапазоны значений параметров a_0, a_1, a_2 : $a_0 = 0...0, 5$, $a_1 = -0, 75...0, 75$, $a_2 = -0, 5...0, 5$. Задаваемый пространственный диапазон x: от 1 до 3 км. Полученные в результате решения значения параметров a_0, a_1, a_2 должны удовлетворять условию: коэффициент отражения R_{omp} (x) должен быть меньше или равен единице.

Шум измерения считался гауссовским с нулевым средним значением. Величина относительного (по отношению к значению лидарного сигнала) среднеквадратического значения шума задавалась в диапазоне 1 - 10%.

Форма импульса лидарного сигнала считалась гауссовской: $f(t) \cong \exp\{-\frac{t^2}{\tau_s^2}\}$, где: τ_s

- длительность импульса лидарного сигнала. Тогда для функции $f(\tau)$ в подинтегральном выражении в (1) имеем

$$f(\tau) \cong \exp\{-\frac{\tau^2}{R_s^2}\}$$
,
где

 R_s - пространственная протяженность лидарного импульса на земной поверхности; $R_s = \frac{c\tau_s}{2\sin\theta}$. На рис. З приведены примеры заданных и восстановленных пространственных распределений коэффициента отражения $R_{ann}(x)$.

Представлены примеры (рис. За, рис. Зб) пространственных распределений коэффициента отражения R_{отп} (x) - заданных и восстановленных (из результатов «измерений» моноимпульным методом при среднеквадратическом значении шума 3 % и числе измерений п равном 8) методом поиска квазирешений при использовании гибридного алгоритма муравьиной колонии. Пространственная протяженность лидарного импульса R_s полагалась равной 1,5 км. Заданные пространственные распределения на рисунках показаны линиями с маркерами в виде кружков (для рисунка За а₀=0,49; а₁=0,45; а₂=0,2; для рисунка 3б a₀=0,1; a₁=0,09; a₂=0,07), а восстановленные пространственные распределения – линиями с маркерами в виде треугольников.

Восстановленные пространственные распределения $R_{omp}(x)$ имею вид гладких кривых. Это связано с тем, что из данных измерений восстанавливается не пространственное распределение $R_{omp}(x)$, а значения параметров a_0, a_1, a_2 модельного пространственного распределения (2).

Результаты статистического моделирования показывают, что при наличии шума измерения с относительным среднеквадратическим значением $\sigma = 1 - 3$ % восстановленное из данных измерений пространственное распределение коэффициента отражения $R_{omp}(x)$ (которое может нелинейно и сильно изменяться по пространственной координате) с приемлемой погрешностью согласуется с заданным простран-

ственным распределением коэффициента отражения.

Ниже в таблицах 1, 2 приведены (в процентах) относительные погрешности восстановленных значений параметров a_0, a_1, a_2 для двух алгоритмов поиска квазирешений – полного перебора (с дискретом перебора 10^{-3} для каждого параметра) и гибридного муравьиного алгоритма.

Таблица 1 показывает погрешности восстановленных значений параметров a_0, a_1, a_2 для пространственного распределения коэффициента отражения $R_{omp}(x)$, приведенного на рис. За, а таблица 2 – для пространственного распределения $R_{omp}(x)$, приведенного на рис. Зб.

Результаты моделирования, приведенные в таблицах 1 И 2, показывают что. использование гибридного муравьиного алгоритма для восстановления из данных измерений пространственного распределения отражения коэффициента обеспечивает получение результатов С приемлемой погрешность (с погрешностью определения коэффициентов разложения не более 20 – 27% процентов при шуме измерения 1 - 3 %) в условиях сильно и нелинейно меняющегося (по пространственной координате) пространственного распределения коэффициента отражения.

При этом использование метод перебора для поиска квазирешения приводит не только к большому времени вычислений, но и сильной зависимости погрешности ВОССТАНОВЛЕНИЯ параметров a_0, a_1, a_2 от самих значений этих параметров (и в ряде случаев – см. Таблицу 2 к неприемлемо большим погрешностям восстановления пространственного распределения коэффициента отражения).



Примеры заданных и восстановленных пространственных распределений $R_{_{omn}}\left(x
ight)$

Таблица 1. Погрешности восстановления значений параметров a_0, a_1, a_2 для данных рис. За

Пополюти	$\sigma = 1 \%$		$\sigma = 3 \%$		
Параметр	Погрешности, %		Погрешности, %		
	Полный перебор	Гибридный муравьиный алгоритм	Полный перебор	Гибридный муравьиный алгоритм	
a_0	0,8	1,8	4,9	8,8	
a_1	2,2	2,1	6,0	11,1	
a_2	2,0	1,1	3,0	5,8	
Время вычислений	10 ч 33 м	1 ч 14 м	10 ч 14 м	1ч11мс	

Таблица 2. Погрешности восстановления значений параметров a_0, a_1, a_2 для данных рис. Зб

	$\sigma = 1 \%$		$\sigma = 3 \%$		
	Погрешности, %		Погрешности, %		
Параметр	Полный перебор	Гибридный муравьиный алгоритм	Полный перебор	Гибридный муравьиный алгоритм	
a_0	91,0	19,3	58,0	8,9	
a_1	123,3	27,6	80,3	15,4	
<i>a</i> ₂	44,3	8,3	31,4	2,8	
Время вычислений	9ч15м	1 ч 08 м	9ч15м	1 ч 16 м	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведен анализ возможности лазерного моноимпульсного метода мониторинга коэффициента отражения природных образований при использовании для обработки данных измерений алгоритма муравьиной колонии. Математическое моделирование показывает, что лазерный моноимпульсный метод позволяет измерять пространственное распределение коэффициента отражения в большом секторе обзора лидара. Использование гибридного муравьиного алгоритма для восстановления данных измерений пространственного ИЗ коэффициента отражения распределения обеспечивает получение результатов С приемлемой погрешность (с погрешностью определения коэффициентов разложения не более 20 - 27% процентов при шуме измерения 1 - 3 %) в условиях сильно и нелинейно меняющегося (по пространственной координате) пространственного распределения коэффициента отражения.

Список литературы:

1. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация Земли и леса. М.: Геолидар, Геоскосмос; Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. 230 с.

2. Сазонникова Н.А. Повышение эффективности обнаружения при лазерном зондировании поверхности // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. N3 (19), С. 219-226.

3. Белов М.Л., Белов А.М., Козинцев В.И., Стрелков Б.В. Моноимпульсный локационный метод зондирования природных образований // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 12. С.319-332. DOI: 10.7463/1212.0482683. Режим доступа: http://engineering-science.ru/ doc/482683.html (дата обращения 15.06.2018).

4. Козинцев В.И.,. Белов М.Л, Орлов В.М., Городничев В.А., Стрелков Б.В.Основы импульсной лазерной локации. М.: Из-во МГТУ, 2010. 573 с.

5. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я*. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 288 с.

6. Воскобойников Ю.Э., Преображенский Н.Г., Седельников А.Н. Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике. Новосибирск: Наука, 1984, 238 с.

7. Васин В. В. Метод квазирешений Иванова и его эффективная реализация. // Известия УрГУ. 2008. №58. С. 59 -77.

8. Воскобойников Ю. Е., Мицель А.А. Некорректные задачи математической физики. Томск: ТУСУР, 2018. 126 с.

9. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М.: Из-во МГТУ, 2014. 446 с.

10. Гладков Л. А., Курейчик В. В, Курейчик В. М., Сороколетов П.В. Биоинспирированные методы в оптимизации. М.: Физматлит, 2009. 384 с.

11. Карпенко А. П., Чернобривченко К. А. Мультимемеевая модификация гибридного муравьиного алгоритма непрерывной оптимизации HCIAC. // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 9. С.261-296. DOI: 10.7463/0912.0470529. Режим доступа: http://www. technomag.bmstu.ru/doc/470529.html (дата обращения 15.06.2018).

12. Карпенко А.П., Чернобривченко К.А. Эф-

фективность оптимизации методом непрерывно взаимодействующей колонии муравьев (CIAC) // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 2. Режим доступа: http:// technomag.edu.ru/doc/165551.html (дата обращения 15.06.2018).

13. *Dréo J., Siarry P.* Continuous interacting ant colony algorithm based on dense heterachy // Future Generation Computer Systems. 2004. Vol. 20, No. 5. P. 841–856. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2003.07.015.

14. *Dreo J., Siarry P.* Hybrid Continuous Interacting Ant Colony aimed at enhanced global optimization // Algorithmic Operations Research. 2007. Vol. 2, No. 1. P. 52–64.

15. *Чураков М., Якушев А*. Муравьиные алгоритмы. Режим доступа: http://rain.ifmo.ru/cat/data/theory/ unsorted/ant-algo-2006/article.pdf (дата обращения 15.06.2018).

16. *McConnell J.J.* Analysis of Algorithms: An Active Learning Approach. Sudbury, Massachusetts: Jones & Bartlett Publishers, 2001. 315 p.

17. Метод оптимизации Нелдера — Мида. Режим доступа: https://habr.com/post/332092/ (дата обращения 15.06.2018).

УДК 681.7.013:528.8



ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

АРХИПОВ С.А., ГЕНЖАЕВ Ш.А., САЛЬНИКОВА М.А., АБДУЛКАДЫРОВ М.А.*, ДОБРИКОВ Н.С.*

ПАО «Красногорский завод им С.А. Зверева»

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

E-mail: arhipof@zenit-kmz.ru

Аннотация: Сформулированы требования к технологическим погрешностям, сохранности форм рабочих поверхностей и взаимного положения оптических деталей оптико-механической системы оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли. Раскрыты особенности проектирования оптико-механических систем из карбида кремния третьего поколения (SSiC), учитывающие технологические ограничения изготовления деталей из SSiC. Рассмотрены альтернативные конструкторские решения построения облегченных зеркал и несущей конструкции.

Ключевые слова: карбид кремния, опто-механическая система, оптоэлектронный электронный прибор для дистанционного зондирования Земли, легкое зеркало, конструкция подшипника, стабильность размеров.

DESIGN FEATURES OF LARGE-SIZE OPTICAL-MECHANICAL SYSTEMS FROM SILICON CARBIDE OPTICAL-ELECTRONIC EQUIPMENT FOR EARTH REMOTE SENSING

ARKHIPOV S.A., GENZHAEV SH.A., SALNIKOVA M.A., ABDULKADYROV M.A., DOBRIKOV N.S.

PJSC "Krasnogorskiy zavod im. S.A.Zvereva"

JSC "Lytkarino Optical Glass Factory", Lytkarino, Moscow region

E-mail: arhipof@zenit-kmz.ru

Abstract: The requirements to technological errors, the keeping of forms the working surfaces and the relative position of the optical components opto-mechanical system (OMS) optical-electronic instrument for remote sensing of the Earth. The features of planning of the OMS exposed from the carbide of silicon of the third generation (SSIC), taking into account technological limitations of making of details from SSIC. The alternative designer decisions of construction of the lightweight mirrors and bearing construction are considered.

Keywords: silicon carbide, opto-mechanical system, optoelectronic electronic instrument for remote sensing of the Earth, *t*, lightweight mirror, bearing construction, size stability.

Система оптико-механической (СОМ) оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) дистанционного зондирования Земли функционально включает оптический тракт и несущую конструкцию (корпус). СОМ имеет ярко выраженное пространственное строение. В ней выделяются оптические детали (элементы оптического тракта – зеркала, линзы, призмы), которые закреплены на несущей конструкции.

Для обеспечения основных выходных характеристик, прежде всего пространственного разрешения и фотограмметрических параметров ОЭА, СОМ должна удовлетворять следующим требованиям:

технологические погрешности изготовления оптических деталей: среднеквадратическое отклонение (СКО) от ближайшей сферы ~ 0,03 мкм, погрешность радиуса ближайшей сферы ΔR ~ 0,01%

технологические погрешности взаимного положения базовых поверхностей несущей конструкции: Δ 1~ 10 мкм , Δ φ ~ 10 угл. сек.

 – сохранности формы оптических деталей в эксплуатации:

δ СКО от ближайшей сферы ~ 0,003 мкм, δ R
 ~ 0,001%,

сохранности взаимного положения базовых поверхностей несущей конструкции : б 1 ~ 1 мкм, б ф ~ 1 угл. сек.

Следует отметить, что перечисленные требования не новы. Они уже реализованы в отечественной аппаратуре ДЗЗ прошлого века. Однако габариты оптики (зеркал) не превышали 1500 мм, активные бортовые системы термостатирования обеспечивали комфортные условия 20+2°С, соответствующие наземным условиям сборки и юстировки, аппаратура размещалась в герметичных отсеках, при этом ее масса могла достигать нескольких тонн.

Современная ОЭА должна иметь минимальную массу, значительные габариты (диаметр главного зеркала до 2,5 м и более, позволяющий достигать предельно возможного пространственного разрешения), располагаться в негерметизированных отсеках, на внешней поверхности космического аппарата, при этом температура ОЭА может изменяться от -20 до +40 °C. Таким образом задачи минимизации массы и термостабилизации СОМ для современной ОЭА весьма актуальны. Решение этих противоречивых задач возможно за счет использования, как для зеркал, так и для несущей конструкции, материала с большим модулем Юнга, малой плотностью, высоким коэффициентом теплопроводности. Конструкционные элементы из этого «идеального» материала должны сохранять свои размеры на протяжении длительного срока эксплуатации ОЭА не менее 10-12 лет в условиях космического пространства.

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ

В статье [1] были сформулированы требования к «идеальному» конструкционному материалу для изготовления облегченных зеркал и несущих конструкций оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Карбид кремния, в отличие от других конструкционных материалов, обладает уникальным сочетанием физико-механических свойств позволяющих создавать облегченные, термостабилизированные оптико-механические системы ОЭА ДЗЗ. На основе анализа состояния технологических разработок изготовления крупногабаритных зеркал из карбида кремния показано, что для изготовления крупногабаритных облегченных оптических элементов в разное время использовались 3 различных технологии. Их можно разделить на три поколения по времени разработки и технологическому уровню сложности:

- первое поколение – технология изготовления зеркал из реакционносвязанного карбида кремния с использованием шликерного литья (LPSiC): формование заготовки без давления, температура изготовления около 1800°С;

- второе поколение – технология изготовления зеркал из реакционносвязанного карбида кремния с использованием гидростатического прессования заготовок (SiSiC): формование заготовки с давлением около 200 МПа, температура спекания около 1800°С;

- третье поколение – технология изготовления зеркал из спеченного карбида кремния с использованием гидростатического прессования заготовок (SSiC): формование заготовки с давлением около 200 МПа, температура спекания около 2100°С.

Карбид кремния третьего поколения (SSiC – спеченный карбид кремния) имеет ряд существенных преимуществ перед карбидами 1-го и 2-го поколения, а именно: высокая однородность, трещиностойкость, отсутствие остаточных внутренний напряжений, хорошая обрабатываемость, небольшая величина остаточной микрошероховатости. позволяющая использовать Зеркала из SSiC возможно использовать не только в инфракрасном, но и в видимом диапазоне спектра.

В настоящей статье приведены результаты исследований особенностей использования карбида кремния третьего поколения в элементах конструкции СОМ.

ОСОБЕННОСТИ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ

1. Элементы конструкции должны быть равной толщины. При большой разнице в толщине элементов конструкции происходит неравномерный рост кристаллов карбида кремния, который при остывании приводит к появлению значительных остаточных напряжений. Большой уровень остаточных напряжений приводит к появлению локальных трещин и браку детали, КОТОрая не может быть восстановлена и подлежит утилизации. Испорченный материал использовать невозможно, в отличие от стекломатериалов и металлов.

На рисунках 1 и 2 показаны примеры конструкций зеркала. Зеркало, показанное на рисунке 1, имеет несколько областей с толстым слоем материала (поз.1) с переходом на тонкостенную область (поз. 2). Рабочая пластина отражающей поверхности Б также имеет значительные перепады толщины в зонах цилиндрических отверстий, параллельных тыльной поверхности А. Отметим, что такая конструкция типична и максимально технологична для стекломатериалов. Для карбидокремниевой керамики необходимо использовать несколько другой подход. На рисунке 2 показано, как можно устранить недостатки конструкции. Переходы между толстым и тонким слоем незначительны (рисунок 2, поз.1, 2). Рабочая пластина (поз.3) отражающей поверхности Б имеет равную толщину по всему объему и эквидистантна поверхности Б. В такой технологичной конструкции из карбида кремния не возникнет остаточных напряжений в процессе спекания. Фрезерование структуры облегчения не доставит проблем. Массогабаритные характеристики конструкции, при сохранении аналогичной жесткости, минимальны.

2. Для деталей из карбида кремния с отношением габаритных размеров более, чем 3 к 1, таких как пилоны, стержни и т.п. следует в конструкцию закладывать сквозное отверстие. Это позволяет сделать деталь более технологичной и уменьшить ее массу. Данная особенность связана с тем, что после прессования деталь должна быть подвергнута обработке до спекания.



Б

Рисунок 1.

Пример неправильно спроектированного зеркала



Рисунок 2. Пример правильно спроектированного зеркала



Рисунок 3. Схема обработки стержня с внутренним отверстием

Материал заготовки на этой стадии очень хрупкий и обработка является большой технологической проблемой. Для получения прессованной заготовки во внутреннюю полость заготовки закладывается металлический стержень, который остается в ней вплоть до стадии обработки. Схема обработки представлена на рисунке 3.

3. Ограничение по минимальной толщине стенки детали. Технологические процессы, отработанные в АО ЛЗОС обеспечивают изготовление пространственных конструкций из карбида кремния с минимальной толщиной стенки до 3 мм.

4. Ограничение по максимальному размеру детали.

При проектировании деталей из карбида кремния (SSIC) необходимо учитывать существующие на данный момент в АО ЛЗОС ограничения печи, в которой происходит заключительная стадия спекания заготовки. Максимальные размеры облегченных структур зеркал, рам, стержней или оболочечных несущих конструкций не должны превышать 1,5 м.

5. Для облегченных зеркал из карбида кремния нежелательно применение полировки с тыльной стороны, с дальнейшем нанесением на нее оптического отражающего покрытия (со стороны структуры облегчения). Это ограничение обусловлено порядком технологических операций, отличным от технологий обработки стекломатериалов. При изготовлении зеркал из стекла изначально шлифуется и полируется тыльная поверхность, после чего переходят к изготовлению рабочей поверхности. В случае с карбидом кремния структура облегчения изготавливается на этапе обработки прессованной заготовки. На данном этапе шлифовка и полировка невозможна. После спекания заготовки ее полировка также практически невозможна. Для получения отражающих поверхностей на тыльной стороне зеркала следует приклеивать к ней отражающие пластины.

6. Эффект изменения масштаба конструкции в процессе изготовления. Преимущества технологии третьего поколения (высокая однородность, трещиностойкость, отсутствие остаточных внутренний напряжений, хорошая обрабатываемость, небольшая величина остаточной микрошероховатости поверхности) достигаются за счет уплотнения материала заготовки в процессе спекания. При этом исходные размеры заготовки после спекания уменьшаются равномерно приблизительно на 20 %. Эту особенность важно учитывать при проектировании деталей из карбида кремния (SSIC), проводить тщательную технологическую проработку, по результатам которой итерационно оптимизировать конструкцию.

ОСОБЕННОСТИ СОЕДИНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ДЕТАЛЯМИ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ (SSIC)

1. В качестве материала закладных деталей следует выбирать металлические сплавы (инвар, ковар), коэффициенты температурного расширения которых минимальны и близки к коэффициенту температурного расширения карбида кремния (SSiC).

2. Закладные детали могут соединятся с деталью из карбида кремния несколькими способами:

- клеевое соединение;



г)

Рисунок 4. Рисунок 4. Конструкции соединения закладных деталей с изделием из карбида кремния а – клеевое соединение; б – зажимное соединение; в – комбинированное соединение; г – резьбовое соединение

- зажимное соединение;

- комбинированное соединение – зажимное с использованием клея для фиксации;

- резьбовое соединение.

Примеры конструкций соединений показаны на рисунке 4.

Каждый из указанных способов имеет свои достоинства и недостатки. Клееевые соединения могут иметь пониженную прочность и быть причиной размерной нестабильности соединения. В связи с этим для клеевых соединений обязательна экспериментальная отработка конструкции на прочность. К достоинствам клеевых соединений можно отнести возможность компенсации температурных напряжений, вызванных неравенством коэффициентов температурного расширения карбида кремния и материала закладной детали, демпфирование вибрационных нагрузок. Зажимные соединения наиболее просты в изготовлении, но могут быть источником размерной нестабильность сборки при сдвиговых нагрузках, вибрации, а также при значительных изменениях температуры. Резьбовые соединения сложны в изготовлении, т.к. требуют высоких точностей изготовления размеров и форм соединяемых поверхностей.

3. Для клеевого соединения SSIC/инвар можно рекомендовать клей DP 190 [2]. В таблице 1 приведены его характеристики. Ииспытания на разрыв клеевого соединения «карбид кремния – клей DP 190 – инвар 32HKД» показали, что такое соединение имеет достаточную механическую прочность для применения в оптико-механических узлах. Среднее значение разрывной нагрузки составило ~ 13,7 МПа, с разбросов по образцам от 11,2 до 15,9 МПа.

ПРИМЕР ВЫБОРА КОНСТРУКЦИИ ОБЛЕГЧЕННОГО ЗЕРКАЛА

Общеизвестны два основных типа конструкций облегченных зеркал [3]:

 двух или трехслойные (sandwich) ячеистые зеркала,

- тарельчатые зеркала, имеющие арочную (contoured back) конфигурацию задней поверхности.

Для зеркал небольших габаритов (диаметром до 500 мм) представляется целесообразным выбирать изящную арочную конструкцию (рисунок 5, б), позволяющую в ребре жесткости (основании арки) разместить закладные элементы под опоры зеркала. Однако такой выбор приводит к неравной толщине конструк-

Таблица 1.	
Характеристика клея	DP 190

Состав и соотношение компонентов	Плотность, [г/см ³]	Коэффициент температурного расширения, [1/К]	Время отверждения, [час]	Время работы для 100 г смеси, [мин]
Основа – модифицированная эпоксидная смола – 1 весовая часть	1,33	При температуре	туре -30°С 24 часа при температуре 21±3°С	9 мин. при температуре 24°С
Катализатор – модифицированный амин – 1 весовая часть	1,29	от -50 до +30°С 62×10 ⁻⁶		



а) ячеистое зеркало



б) арочное зеркало

Рисунок 5. Альтернативные конструкции зеркал из SSIC

ции и, как следствие, к проблемам остаточных напряжений после спекания. Учитывая эту особенность, для облегченных зеркал из карбида кремния (SSiC) следует выбирать двухслойные ячеистые конструкции, типа указанных на рисунке 5, а).

Выбор крупногабаритной несущей конструкции из карбида кремния (SSiC)

Высокие показатели термомеханических характеристик карбида кремния (SSIC), представленные в таблице 2, дают возможность применять этот материал для изготовления корпуса (несущей конструкции) ОЭА ДЗЗ.

Крупногабаритная несущая конструкция ОЭА может быть оболочечной или ферменной. Необходимыми элементами оболочечных конструкций являются фланцы и распределенные утолщения (ребра жесткости, распределенные зоны для крепления закладных деталей), наличие которых приводит к неравнотолщинности оболочек, что крайне нежелательно. Точечное соединение оболочек (посредством закладных бонок) снижает основное преимущество – поверхностное распределение напряжений и деформаций, и сводит силовую схему оболочечной конструкции к рамной конструкции.

Таким образом, учитывая имеющиеся технологические ограничения и особенности, создание крупногабаритных оболочечных несущих конструкций из карбида кремния (SSIC) нецелесообразно. Ферменная несущая конструкция, составленная из стержневых элементов и элементов рам, размером не более 1,5 м каждая, удовлетворяет всем особенностям существующей технологии.

На рисунке 6 представлен вариант несущей конструкции, собранный из унифицированных стержней и рам, позволяющий реализовывать габариты СОМ до 3 м и более.

Наибольшие трудности при проектировании ферменной несущей конструкции связаны с задачей разработки узла соединения ее стержней, от решения которой зависит прочность и размерная стабильность СОМ.

Таблица 2. Термомеханические характеристики карбида кремния (SSIC)

Характеристики	Размерность	Значение
Плотность	г/см ³	3,1-3,2
Модуль Юнга	ГПа	420
Коэффициент Пуассона	-	0,17-0,21
Прочность на сжатие	МПа	3000
Прочность на изгиб	МПа	450
Теплопроводность	Вт/м·К	130
Коэффициент температурного расширения	1/K	4,0-4,5.10-6



Рисунок 6. Вариант ферменной несущей конструкции

Рисунок 7. Примеры соединения стержней ферменной несущей конструкции

На рисунке 7 представлены примеры узлов соединения ферменной несущей конструкции.

Вариант 1 (рисунок 7 а) – Унифицированная сборка представляет собой стержень, на краях которого расположена ответная часть, работающая по принципу карданной передачи. Сборка состоит из цилиндрической пустотелой трубки, выполненной из карбида кремния, и ответной части, выполненной из металлического сплава.

Вариант 2 (рисунок 7 б) – Узел соединения представляет собой многостержневое шарнирное соединение. Такая универсальная конструкция даёт возможность применения различного числа стержней, при этом перемещение каждого отдельного стержня не ограничивает перемещение другого стержня. Конструкция состоит из основания с углублениями по типу полусферы и вставленных в него нескольких стержневых элементов из карбида кремния с вклеенными в них закладными шарнирными элементами.

Список литературы

1. Архипов С.А., Абдулкадыров М.А., Добриков Н.С. Анализ физико-технологических проблем изготовления облегченных термостабильных оптикомеханических систем на основе карбида кремния для оптико-электронной аппаратуры космического базирования // Научно-технический журнал «Контенант», 2017 г., том 16, № 1, С.28-46.

2. Конструкционные адгезивы на основе эпоксидной смолы DP-190B/A Прозрачный DP-190B/A Серый// Техническая информация, 2002

3. Vukobrakovich D. Lightweight Mirrors // Optomechanical System Design./ The Infrared & Electro-Optical System Handbook, 1993, vol.4, p.159-164.



ПСЕВДОБИНОКУЛЯРНЫЕ ОЧКИ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ С УГЛОМ ПОЛЯ ЗРЕНИЯ 100°

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

АО «Московский завод «Сапфир», г. Москва

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

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

Аннотация: Рассматриваются различные схемы построения новых псевдобинокулярных очков ночного видения с углом поля зрения 100°: с коаксиальными объективами. С применением двух объективов с одинаковыми или с различными фокусными расстояниями, с дополнительным вводом тепловизионного и телевизионного каналов, с использованием комбинации зеркально-линзового и линзового объективов, с применением ассиметричной схемы построения.

Ключевые слова: очки ночного видения, объектив, электронно-оптический преобразователь, окулярная система, тепловизионный канал, телевизионный канал, угол поля зрения, дальность обнаружения, дальность распознавания, масса.

PSEUDOBINOCULAR NIGHT VISION GOGGLES WITH 100° FIELD OF VIEW ANGLE

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

JSC "Moskovskij Zavod "Sapphir"

PJSC "Krasnogorskij Zavod named S.A. Zverev"

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

Abstract: Various schemes of construction of new pseudobinocular night vision goggles with 100° field of view angle: with coaxial lenses are considered, with the use of two lenses with the same or with different focal lengths, with additional input of thermal imaging and television channels, using a combination of mirror-lens and lens len

ses, using an asymmetric construction scheme.

Keywords: *night vision goggles, lens, electron-optical converter, ocular system, thermal imaging channel, television channel, angle of view, detection range, recognition range, mass.*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение в современной технике получили псевдобинокулярные очки ночного видения (ОНВ) [1]. Они нашли применение для наблюдения при пониженном уровне освещенности (сумерки, ночь) для обеспечения работы органов МВД, пограничных и охранных служб и др. Их известный недостаток - угол поля зрения всего лишь 40 - 50°. Для лучшего поиска, нужно, чтобы угол поля зрения ОНВ (хотя бы в горизонтальной плоскости) достигал 100°. В США созданы бинокулярные 4-х канальные ОНВ, имеющий угол поля зрения по горизонту 100°, по вертикали 40° [1]. Однако их масса и в особенности стоимость были неприемлемо высоки. В связи с этим в данной работе предложены схемы новых псевдобинокулярных ОНВ на базе отечественных серийных электронно-оптических преобразователей (ЭОП)

ПСЕВДОБИНОКУЛЯРНЫЕ ОНВ С КОАКСИАЛЬНЫМ ОБЪЕКТИВОМ

На рис. 1 представлена схема псевдобинокулярных ОНВ с коаксиальным объективом. Объектив 1 имеет фокусное расстояние 18,76 мм, угол поля зрения 50°, относительное отверстие 1:1,4. В центральной части объектива 1 выполнено концентрическое отверстие, в которое вставлен объектив 2 с фокусным расстоянием 7,34 мм, углом поля зрения 100°, относительным отверстием 1:1,4. Перед объективами установлена ирисовая диафрагма 3 с регулируемым отверстием. Оба объектива 1, 2 сфокусированы на фотокатод ЭОП 4. Последний имеет диаметр фотокатода 17,5 мм. На экран ЭОП 4 сфокусирована окулярная система 5. При работе объектива 1 угол поля зрения ОНВ составляет 50°. При этом увеличение окулярной системы 5 составляет 13,326^x, а ее линейное поле зрения 17,5 мм. При работе объектива 2 (входной зрачок объектива 1 перекрыт при этом диафрагмой 3) угол поля зрения ОНВ составляет 100°. Дальность распознавания ростовой фигуры человека (РФЧ) ночью в нормированных условиях при угле поля зрения 50° составляет 200 м, а при угле поля зрения 100° дальность обнаружения РФЧ также составляет 200 м, а ее распознавания - 150 м. При этом увеличение окулярной системы 5 должно составлять 34[×] при том же линейном поле зрения. Для изменение увеличения окулярной системы 5 служит ее линзовый компонент 6 с переменным увеличением. Управление им и диаметром ирисовой диафрагмы 3 осуществляется с помощью электромеханического блока 7. Конечно, можно при работе объектива 2 не менять увеличение окулярной системы 5



Рисунок 1.

Схема псевдобинокулярных ОНВ с коаксиальным объективом и с ЭОП с диаметром фотокатода 18 мм: 1 – длиннофокусный объектив, 2 – короткофокусный объектив, 3 – ирисовая диафрагма, 4 – ЭОП, 5 – окулярная система, 6 – компоненты с переменным фокусным расстоянием, 7 – блок управления полем зрения
для ее упрощения. Но тогда увеличение ОНВ окажется равным не 1^x, а 0,39^x. Расстояние по базе глаз окулярной системы регулируется в пределах 57 – 78 мм.

Возможен другой вариант построения схемы ОНВ, в котором используется не коаксиальная оптика, а вариообъектив, фокусное расстояние которого плавно или ступенчато изменяется от 18,76 мм до 7,34 мм при соответствующем изменении угла поля зрения от 50° до 100° при относительном отверстии 1:1.4. Соответственно изменению фокусного расстояния объектива меняется и фокусное расстояние окуляра для сохранения увеличения ОНВ, равного 1[×]. Для того, чтобы ОНВ могли работать не только при нормальной, но и при пониженной прозрачности атмосферы, а также в присутствии в поле зрения световых помех и в дневных условиях (т.е. обладали бы всепогодностью и круглосуточностью работы), схема ОНВ дополнена тепловизионным каналом. Его ИК объектив 8 оптически сопряжен с тепловизионным модулем 9 и сфокусирован на матрицу микроболометров 10. Сигнал с ее выхода обрабатывается в электронном блоке 11, а изображение представляется на OLED дисплее 12. Это изображение с помощью линзового компонента 13 через полупрозрачное зеркало 14 оптически сопряжено с окулярной 3 системой 5 и вводится в ее левый канал. Тепловизионный канал работает в области спектра 8 - 12 мкм, имеет дальность распознавания ростовой фигуры человека 300 м, угол поля зрения 8x12°, увеличение 1[×]. На выходе полупрозрачного зеркала 14 установлен телевизионный (ТВ) канал. Его объектив 15 сфокусирован на матрицу ПЗС ТВ камеры 16. Благодаря этому изображение с экрана ЭОП 4 и с OLED дисплея 12 вводится в ТВ канал. Это позволяет передать изображение дистанционно (если дополнительно использовать радиорелейный канал связи) или может быть введено в персональный компьютер с целью запоминания изображения, его цифровой обработки и тиражирования. Расстояние по базе глаз окулярной системы регулируется в пределах 57 – 78 мм. Питание ОНВ обеспечивается от аккумуляторной батареи с напряжением 9 В. Масса ОНВ составляет 600 г.

Возможна другая схема построения псевдобинокулярных ОНВ. Здесь используется объектив 1 с фокусным расстоянием 10,5 мм, углом поля зрения 100°, относительным отверстием 1:1.4, ЭОП 2 с диаметром фотокатода 25 мм и окулярная система 3 с увеличением 23.8^x при линейном поле зрения 25 мм. При этом ОНВ имеют угол поля зрения 100° и увеличение 1[×]. Достоинством таких ОНВ является простота схемы. Однако уменьшение фокусного расстояния приведет к сокращению дальности действия ОНВ до 150 м. И в таких ОНВ возможно применение вариообъектива с фокусным расстоянием, изменяемым в пределах 26,8 – 10,5 мм при угле поля зрения, изменяемым соответственно в пределах 50° - 100° и относительном отверстии 1:1,4, а также сопряжение ОНВ с тепловизионным каналом и ТВ каналами. Дальности обнаружения и распознавания в тепловизионном канале те же, что и для ОНВ по схеме рис. 1.

ПСЕВДОБИНОКУЛЯРНЫЕ ОНВ С ДВУМЯ ЛИНЗОВЫМИ ОБЪЕКТИВАМИ

На рис. 2а показана схема построения псевдобинокулярных ОНВ с двумя идентичными объективами 1, 2 и с ЭОП 3 с диаметром фотокатода 25 мм. Объективы имеют фокусное расстояние 13,4 мм, угол поля зрения 50°, относительное отверстие 1:1,4. Характер поля зрения ОНВ представлен на рис. 2б. При этом увеличение окулярной системы 4 равно 18,657[×] при линейном поле зрения 25 мм.

Благодаря такому техническому решению дальность распознавания составляет 150 м по РФЧ в нормированных условиях. Возникает вопрос, какие объективы потребуются для такой схемы ОНВ, если диаметр фотокатода ЭОП составляет 17,5 мм. Объективы будут иметь фокусное расстояние 7,34 мм, угол поля зрения 50°, относительное отверстие 1:1,4. При этом увеличение окулярной системы 4 равно 34[×] при линейном поле зрения 17,5 мм. Нетрудно видеть, что дальность действия ОНВ при такой схеме снизится.

Данная схема псевдобинокулярных ОНВ на базе ЭОП 3 с диаметром фотокатода 25 мм допускает применение двух объективов с различ-









ными фокусными расстояниями: короткофокусного широкопольного объектива 1 с фокусным расстоянием 6,3 мм, углом поля зрения 100°, относительным отверстием 1:1,4 и сравнительно длиннофокусного узкопольного объектива 2 с фокусным расстоянием 18,76 мм, углом поля зрения 50°, относительным отверстием 1:1,4. Здесь используется окулярная система 4 с увеличением 13,44[×] при линейном поле зрения 25 мм. При этом линейное поле зрения для объектива 1 составляет 17,5 мм, а для объектива 2 – 7,5 мм. Линейные поля зрения обоих объективов находятся в пределах диаметра фотокатода 25 мм и контактируют друг с другом по касательной. ЭОП 3 с диаметром фотокатода 25 мм имеет смещение своей оптической оси в поперечном направлении для конструктивного объединения обоих объективов. Увеличение ОНВ для узкого поля зрения составляет 1[×], а для широкого поля зрения – 0,3^x. Такую же схему в принципе можно использовать и для ЭОП с диаметром фотокатода 17,5 мм, только поля зрения будут частично перекрывать друг друга. Зато линейное поле зрения окулярной системы сократится до 17,5 мм. Это благоприятно скажется на возможностях ее расчета.



Рисунок 3.

Схема псевдобинокулярных ОНВ с длиннофокусным зеркально линзовым объективом и короткофокусным линзовым объективом: 1 – зеркально-линзовый объектив, 2 – линза-зеркало, 3 – зеркало Манжена, 4 – линзовый компенсатор полевых аберраций, 5 – группа линзовых компонентов линзового объектива, 6 – ЭОП, 7 – окулярная система, 8 – ИК объектив, 9 – фотоприемное устройство с блоком электронной обработки, 10 – OLED дисплей, 11 – линзовый компонент, 12 – полупрозрачное зеркало, 13 – объектив ТВ камеры, 14 – ТВ камера

ПСЕВДОБИНОКУЛЯРНЫЕ ОНВ С ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫМ И ЛИНЗОВЫМ ОБЪЕКТИВАМИ

На рис. 3 представлена схема псевдобинокулярных ОНВ, содержащих зеркально-линзовый объектив 1 с фокусным расстоянием 60 мм, эффективным относительным отверстием 1:1,3 и углом поля зрения 15°. В центральной нерабочей части линзы-зеркала 2 выполнено концентрическое отверстие, в котором установлена группа линз 5. Вместе с линзовым компенсатором 4 полевых аберраций зеркально-линзового объектива 1 эта группа 5 образует короткофокусный линзовый объектив. Его фокусное расстояние составляет 7,34 мм, относительно отверстие 1:1, угол поля зрения 100°. Оба объектива сфокусированы на фотокатод диаметром 17,5 мм ЭОП 6. На его экран сфокусирована псевдобинокулярная окулярная система 7. Ее увеличение составляет 12,5 крат, линейное поле зрения 17,5 мм, диаметр выходного зрачка 10 мм при его удалении 20 мм. Расстояние по базе глаз окулярной системы регулируется в пределах 57 – 78 мм. Увеличение ОНВ при работе зеркально-линзового объектива составляет 3^x при угле поля зрения 15°. Увеличение ОНВ при работе линзового объектива составляет 0,3^х при угле поля зрения 100°. При необходимости может быть использован линзовый объектив с фокусным расстоянием 18 мм, относительным отверстием 1:1.4 и углом поля зрения 50°.

При этом увеличение ОНВ составляет 1[×] при угле поля зрения 50°. В любом случае линзовый объектив используется для поиска в широком угле поля зрения объекта 5 наблюдения, а зеркально-линзовый объектив – для его распознавания. Фактически ОНВ с зеркальнолинзовым объективом превращаются в наголовный бинокль. Дальность распознавания в него РФЧ в нормированных условиях составляет 300 м. Дальность обнаружения РФЧ при условии использования линзового объектива с углом поля зрения 100° составляет 200 м, а линзового объектива с углом поля зрения 50° - 300 м. Как и в схеме по рис. 1, данная схема ОНВ может быть дополнена тепловизионным каналом. Его ИК объектив 8 оптически сопряжен с фотоприемным устройством 9, объединяющим матрицу микроболометров и электронный блок управления 9. Объектив сфокусирован на матрицу микроболометров фотоприемного устройства 9. Сигнал с его выхода передается в OLED дисплей 10. Его изображение с помощью линзового компонента 11 через полупрозрачное зеркало 12 оптически сопряжено с окулярной системой 7 и вводится в ее левый канал. Тепловизионный канал работает в области спектра 8 – 12 мкм, имеет дальность распознавания ростовой фигуры человека 300 м, угол поля зрения 8x12°, увеличение 1[×]. На выходе полупрозрачного зеркала 14 установлен ТВ канал. Его объектив 13 сфокусирован на матрицу ПЗС ТВ камеры 46. Благодаря этому изображение с экрана ЭОП 6 и с OLED дисплея 10 вводится в ТВ канал. Питание ОНВ обеспечивается от аккумуляторных батарей с напряжением 9 В. Масса ОНВ не превышает 850 г.

АССИМЕТРИЧНЫЕ ПСЕВДОБИНОКУЛЯРНЫЕ ОНВ

На рис.4. дана схема ассиметричных псевдобинокулярных ОНВ. В ней объектив 1 сфокусирован на фотокатод диаметром 17,5 мм ЭОП 2. Изображение с его экрана через гипотенузную светоделительную грань 4 1-й куб-призмы 3 оптически сопряжено с 1-м окуляром 5. Благодаря гипотенузной грани 4 1-й куб-призмы 3 изображение с экрана ЭОП 2 передается также через 1-е плоское зеркало 6 в линзовую оборачивающую систему 7. Она оборачивает изображение, затем через 2-е плоское зеркало 8 и гипотенузную грань 10 2-й куб-призмы 9 передает его во 2-й окуляр 11. Таким образом, ОНВ имеет ассиметричную схему построения. Линзовый объектив 1 имеет фокусное расстояние 7,34 мм, относительное отверстие 1:1,4, угол поля зрения 100°. Окуляры 5, 11 имеют увеличение 12,5^x, линейное поле зрения 17,5 мм, диаметр выходного зрачка 10 мм при его удалении 20 мм. Увеличение ОНВ составляет 0,3[×] при угле поля зрения 100° и дальности обнаружения РФЧ в нормированных условиях, равной 200 м. Схема ОНВ может содержать дополнительные тепловизионный и ТВ каналы. ИК



Рисунок 4. Схема ассиметричных псевдобинокулярных ОНВ: 1 – объектив, 2 – ЭОП, 3 – 1-я куб-призма, 4 – 1-й окуляр, 5 – 1-е плоское зеркало, 6 – линзовая оборачивающая система, 7 – 2-е плоское зеркало, 8 – 2-я куб-призма, 9 – 2-й окуляр, 10 – ИК объектив, 11 – тепловизионный модуль, 12 – объектив 1-й ТВ камеры, 13 – 1-я ТВ камера, 14 – объектив 2-й ТВ камеры, 15 – 2-я ТВ камера

объектив 12 сфокусирован на тепловизионный модуль 13. Изображение с его OLED дисплея через куб-призму 9 передается во 2-й окуляр 11. Изображение с экрана ЭОП 2 и с OLED дисплея модуля 13 переносится с помощью объектива 14 на матрицу ПЗС ТВ камеры 15. Тепловизионный 6 канал имеет те же параметры, что и описанный выше. Питание OHB обеспечивается от аккумуляторных батарей с напряжением 9 В. Масса OHB не превышает 650 г. База глаз регулируется в пределах 57 – 78 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Принципиально возможно создание различных вариантов псевдобинокулярных ОНВ с углом поля зрения 100°.

2. К этим вариантам относятся псевдобинокулярные ОНВ с использованием коаксиальных линзовых объективов, на основе применения двух объективов с одинаковым или с различными фокусными расстояниями, ОНВ, использующих сочетание зеркально-линзового и линзового объективов, ОНВ, выполненных по ассиметричной схеме.

3. ОНВ могут дополнительно содержать тепловизионный канал для всепогодного и круглосуточного наблюдения, а также телевизионный канал для передачи изображения дистанционно или в персональный компьютер.

4. Выбор конкретной схемы построения ОНВ определяется ограничениями по стоимости и соображениями, связанными с конкретным применением ОНВ.

Список литературы:

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

УДК 622.232.8:621.384.3.01:531.714.2



ПИЛОТАЖНЫЕ ДВУХКАНАЛЬНЫЕ ОЧКИ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

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

АО «Московский завод «Сапфир», г. Москва

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

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

Аннотация: рассматривается современное состояние техники пилотажных очков ночного видения (OHB), предлагается новая идеология построения пилотажных OHB круглосуточного и всепогодного действия. Проанализирован сущность различных вариантов построения новых OHB. Выбран оптимальный вариант их построения.

Ключевые слова: очки ночного видения, ночной канал, тепловизионный канал, электронно-оптический преобразователь, низкоуровневый телевизионный канал, фокально-плоскостная матрица,, рабочая область спектра, угол поля зрения.

AEROBATIC DUAL-CHANNEL NIGHT VISION GOGGLES

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

JSC "Moskovskij Zavod "Sapphir"

PJSC "Krasnogorskij Zavod named S.A. Zverev"

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

Abstract: the current state of the technology of night vision goggles (NVG) is considered, a new ideology of constructing aerobatic NVG round-the-clock and all-weather action is proposed. Examines the nature of various design options for a new NVG. The optimal variant of their construction is chosen.

Keywords: night vision glasses, night channel, thermal imaging channel, electron-optical Converter, lowlevel television channel, focal-plane matrix,, the working area of the spectrum, the angle of the field of view.

В настоящее время для обеспечения работы членов экипажа вертолета в сумерках и ночью используют вертолетные очки ночного видения (ОНВ) [1 – 4]. ОНВ обеспечивают наблюдение закабинного пространства вертолета при пилотировании в условиях маловысотного полета, при взлетах, зависании, посадках, в том числе на необорудованные и неосвещенные площадки. При работе с ОНВ пилот вертолета может одновременно считывать показания приборов, переведя взгляд на приборную панель вниз или в сторону мимо окуляров ОНВ. Кабина вертолета должна быть адаптирована под применение ОНВ (по спектральному составу излучения светотехнического оборудования, окраске внутренних поверхностей кабины и другие параметры).

Традиционные бинокулярные пилотажные ОНВ на базе электронно-оптических преобразователей (ЭОП) обеспечивают наблюдение закабинного пространства в темное время суток только при нормальной прозрачности атмосферы. При понижении ее прозрачности (дымка, туман, дождь, снегопад, пыльная или песчаная буря и др.) наблюдение в ОНВ затруднено или становится невозможным. В этих условиях в ОНВ не обеспечивается видение проводов линий электропередач, в результате столкновения с которыми во многих случаях происходят аварии вертолетов. При наличии в поле зрения ОНВ мощных световых помех (например, излучения прожекторов, пламени пожаров и др.) ОНВ засвечиваются, и наблюдение в них становится невозможным. При полете над морской поверхностью трудно обнаружить потерпевших бедствие из-за мощного соляного тумана, висящего над морем. Контраст таких объектов с морской поверхностью очень низок. Это создает дополнительные трудности при поиске потерпевших кораблекрушение.

Для устранения указанных недостатков предлагается создать новые пилотажные ОНВ круглосуточного и всепогодного действия. Первый вариант таких ОНВ содержит ночной канал на базе ЭОП третьего поколения, работающий в области спектра 0,4 – 0,9 мкм, и тепловизионный (ТВП) канал, работающий в области спектра 3 – 5 мкм. Но вертолетах стекло кабины

(фонарь) вертолета, выполненный из полиметилметакрилата (плексиглаза), пропускает только видимый свет, но не пропускает ИК излучение в областях спектра 3 – 5 мкм или 8 – 14 мкм, характерных для современных ТВП [5].

Существующие ТВП монокуляры и ТВП ОНВ работают в области спектра 8 – 14 мкм [3, 4]. В этой области спектра существуют в приземном слое атмосферы высокие температурные контрасты и пропускание. Но использовать такие ТВП каналы для пилотажных очков не представляется возможным без введения в фонарь вертолета вставки из оптического материала, хорошо пропускающего как в видимой, так и в ИК области спектра. В принципе оптическая керамика ПО-4 может работать от 0.35 до 14 мкм [5], но в видимой области спектра в ней существует сильно светорассеяние, и пилот будет видеть невооруженным глазом и в канал ОНВ на базе ЭОП мутное изображение, совершенно неприемлемое для нормальной работы. К тому же вертолет летает уже не в приземном слое атмосферы, где область спектра 8 - 14 мкм менее эффективна по сравнению с областью спектра 3 – 5 мкм. Кроме того, эта область наиболее эффективна при повышенной влажности в атмосфере, т.е. создаются более благоприятные условия при полете над морской поверхностью. Для области спектра 3 - 5 мкм существует достаточно большое количество оптических материалов. Наибольший интерес среди них представляет лейкосапфир, хорошо пропускающий в области спектра 0,1 - 5 мкм (рис. 1) [5].



Рисунок 1. Спектральная характеристика вертолетного фонаря из лейкосапфира

Из лейкосапфира и рекомендуется сделать вставку – защитное окно в фонаре вертолета. Оно одинаково хорошо работает как в видимой, так и в ИК области спектра. При этом, естественно, ТВП канал должен работать в области спектра 3 – 5 мкм. Для круглосуточной и всепогодной работы пилота можно использовать следующие варианты построения пилотажных 2-х канальных ОНВ:

1. Ночной канал на базе ЭОП для области спектра 0,4 – 0,9 мкм + ТВП канал для области спектра 3 – 5 мкм;

2. Низкоуровневый телевизионный (НТВ) канал для области спектра 0,8 – 1,1мкм + ТВП канал для области спектра 3 – 5 мкм;

3. НТВ канал для области спектра 0,8 – 1,7 мкм + ТВП канал для области спектра 3 – 5 мкм.

Рассмотрим все эти варианты. Для 1-го варианта ночной канал на базе ЭОП выполнен в виде ночного монокуляра от ОНВ «Альфа-2031» [2]. ТВП канал должен быть выполнен на базе фокально-плоскостной матрицы (ФПМ) фотодетекторов, работающей в области спектра 3 – 5 мкм. При этом широко применяемые в ТВП ФПМ на основе InSb или PtSi здесь не подходят, т.к. они работают при глубоком охлаждении - до 80 К и требуют применения газовой холодильной машины. Это приводит к значительным массе, габаритам и энергопотреблению ТВП канала, что неприемлемо для построения ОНВ. Поэтому выбор может быть сделан между ФПМ на базе PbSe и CdHgTe (КРТ), работающих в области спектра 3 - 5 мкм при термоэлектрическом охлаждении (ТЭО). Эти ФПУ имею примерно одинаковые удельные обнаружительные способности D^{*} = (2,5 – 3)х10¹⁰ Вт⁻¹см Гц^{1/2} [2]. Однако фоточувствительный элемент (ФЧЭ) КРТ имеет существенно меньшие размеры, чем ФЧЭ ФПМ на основе PbSe: 25x25 мкм для ФПМ на базе КРТ против 90х100 мкм для ФПМ на базе PbSe. Из-за этого разрешающая способность ФПМ на базе КРТ выше, чем у ФПМ на базе PbSe. Кроме того, частотные характеристики ФПМ на базе PbSe значительно хуже, т.е. время инерции больше, чем у ФПМ на базе КРТ. Из-за этого невозможно создать ФПМ на базе PbSe с достаточно большим количеством ФЧЭ: формат такой ФПМ не превышает 320х240 пикселей. В то же время ФПМ на базе КРТ имеет формат до 640х512 пикселей [7 – 10]. Поэтому ФПМ на базе КРТ позволяет получить изображение с более высоким качеством, а также обеспечить больший угол поля зрения по сравнению с ФПМ на базе PbSe.

Данный 1-й вариант 2-х канальных ОНВ выполнен по блок-схеме рис. 2. ТВП канал 1с использованием ФПМ на базе КРТ имеет такой же принцип построения, что и ТВП монокуляр, описанный в работе [4]. ТВП канал 1 содержит ИК объектив 2, работающий в области спектра 3 – 5 мкм и сфокусированный на ТВП модуль 3. ТВП модуль 3, состоит из ФПМ 4, охлаждаемого с помощью ТЭО 5, блока электронной обработки (БЭО) 6 в интегральном исполнении и OLED дисплея 7.



Рисунок 2. Блок-схема пилотажных, ОНВ, содержащих ночной канал на базе ЭОП и ТВП канал



Рисунок 3. Спектральные характеристики ФПУ на базе КРТ ОАО «Швабе-Фотоприбор»: кривые 1 – 3 – ФПУ с ТЭО, кривые 4 – 5 – ФПУ с охлаждением до 80 К

Спектральные характеристики ФПМ 4 на основе КРТ представлены на рис. 3. На экран дисплея 7 сфокусирован 1-й окуляр 8. Модуль ТВП канала 1 выполнен в габаритах ЭОП ночного канала. Это позволяет в основном сохранить в новых ОНВ конструктивное исполнение ОНВ «Альфа-2031». В состав ТВП канала 1 входит также 1-й источник первичного питания (ИПП) – аккумуляторная батарея на базе Liионных аккумуляторов (напряжение = 9 – 12 В, ток потребления до 200 мА), обеспечивающий автономное питание канала 1. Ночной канал 10 содержит объектив 11, сфокусированный на фотокатод ЭОП 12, на экран которого сфокусирован 2-й окуляр 13. Ночной канал 10 содержит также 2-й ИПП 14 – 2 аккумуляторные батареи АА-типа (напряжение 2,2 - 3,2 В, ток потребления 25 мА). В ночной канал 10 обеспечивается наблюдение изображения местности и линии горизонта, а также объекта наблюдения при нормальной прозрачности атмосферы и при отсутствии в поле зрения ОНВ световых помех. В ТВП канал 1 обеспечивается наблюдение того же самого (при условии достаточно высоких природных температурных контрастах), а также объекта наблюдения также и при пониженной прозрачности атмосферы, а также при наличии световых помех.. Мозг оператора совмещает оба изображения, наблюдаемые в окуляры 8 и 13. Данные 2-х канальные ОНВ получаются достаточно простыми и сравнительно дешевыми, но имеют два недостатка:

1. Спектральный рабочий диапазон 0,4 – 0,9 мкм ночного канал 1 плохо обеспечивает формирование изображения при пониженной прозрачности атмосферы; для повышения качества изображения в таких условиях необходимо уходить в ИК область спектра;

2. Простое аддитивное совмещение двух изображений не позволяет осуществить их совместную цифровую обработку и сформировать более совершенное интегрированное изображение.

Поэтому на рис. 4 представлена блок-схема более совершенных 2-х канальных ОНВ, позволяющих сформировать интегрированное изображение. ОНВ содержат ТВП канал 1 и НТВ канал 11. ТВП канал 1 имеет ИК объектив, оптически сопряженный с ТВП модулем 3, содержащим ФПМ 4 и БЭО 5 в интегральном исполнении. ТЭО обеспечивает охлаждение ФПМ 4. Выход БЭО 5 подключен к 1-му входу блока формирования интегрированного изображения (БФИИ) 9. Его выход подключен к входу 1-ого OLED дисплея 7, на экран которого сфокусирован окуляр 8. 1-й ИПП 10 устроен и работает так же, как это описывалось выше. НТВ канал 11 содержит объектив 12, сфоку-



Рисунок 4. Блок-схема пилотажных, ОНВ, содержащих НТВ канал и ТВП канал

сированный на матрицу ПЗС ЕМССД ТВ камеры 13 [6]. Ее выход подключен ко 2-му входу БФИИ 9. На экран 2-го OLED дисплея 14 сфокусирован 2-й окуляр 15. OLED дисплеи 7, 14 и окуляры 8 и 15 взаимно идентичны. ИПП 16 обеспечивает питание НТВ канала 11. ИПП 16 – аккумуляторная батарея на базе Li- ионных аккумуляторов (напряжение = 9 – 12 В, ток потребления до 150 мА). НТВ канал работает в области спектра 0,8 - 1,1 мкм. Эта область спектра выделена как рабочая с помощью отсекающего фильтра на основе CdTe:Zn, подавляющего видимую область спектра 0,4 - 0,78 мкм (рис. 5). Такой спектральный диапазон создает более благоприятные условия для работы НТВ канала 11 при пониженной прозрачности атмосферы, чем для работы ночного канала на базе ЭОП по схеме рис. 3. Кроме того, микропроцессорный БФИИ 9 формирует единое интегрированное изображение, совмещая наиболее информативные признаки изображений в отдельных каналах. Одновременно осуществляется цифровая обработка изображения в реальном масштабе времени. Интегрированное изображение представляется на экранах OLED дисплеев 7 и 14. Его качество существенно лучше, чем для изображения в ОНВ по схеме рис.6.5.3, хотя стоимость ОНВ по 2-му варианту выше.



Рисунок 5. Спектральная характеристика ЕМССД (кривая 1) и отсекающего фильтра на основе CdTe:Zn (кривая 2)

Для еще более эффективной работы НТВ канала 11 по схеме рис. 4 при пониженной прозрачности атмосферы целесообразно перейти к рабочей области спектра 0,8 - 1,8 мкм. Эта область спектра обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с областями спектра 0,4 - 0,9 мкм и 0,8 - 1,1 мкм [3, 4]. Средняя величина естественной ночной освещенности в безлунную ночь для области спектра 0,4 - 0,9 мкм (фотокатод ЭОП поколений 2,2⁺, 3) достигает (1,5-3)х10⁻⁹ Вт/см² мкм, а в области спектра 1,4-1,8 мкм – (1,5-2)x10⁻⁷ Вт/см² мкм, т.е. на два порядка выше. В дополнение к этому улучшается прозрачность атмосферы: при метеорологической дальности видимости 10 км пропускание толщи атмосферы 1 км на длине волны 0,6 мкм составляет 0,72, а в центре области спектра 1,4 - 1,8 мкм – 0,93. При этом яркость атмосферной дымки снижается больше чем на порядок в области спектра 1,4 - 1,8 мкм по сравнению с видимой областью спектра. Величина контраста объекта наблюдения с фоном в этой области спектра более стабильна и выше в 1,4 - 1,5 раза, чем в области спектра 0,4 - 0,9 мкм. Кроме того, если в этой области спектра освещенность ночью меняется от 10⁻⁵ до 2,5х10⁻⁹ Вт/см², то в области 1,4 - 1,8 мкм – от 1,6х10⁻⁴ до (3-4)х10⁻⁷ Вт/см² при тех же условиях освещенности, т.е. почти на два порядка. Процент обеспеченности освещенностью в течение всего года для естественной ночной освещенности в пределах 5х10⁻³ – 5х10⁻⁴ лк для области спектра 1,4 - 1,8 мкм также почти в 2 раза выше, чем для 0,4 - 0,9 мкм [3, 4].

В области спектра 1,4 - 1,8 мкм можно работать до определенной степени в некоторых дымах и в пыли, а также визуализировать излучение современных лазерных целеуказателей-дальномеров, работающих на длине волны 1,55 мкм и 1,7 мкм.

Весьма результативно использование ПНВ, работающих в области спектра 1,4 - 1,8 мкм для демаскировки объектов: разница в отражательной способности обмундирования позволяет в области спектра 1,4 - 1,8 мкм не только обнаружить солдата на фоне зелени, но и отличить своего от чужого. Известно, что камуфляж позволяет замаскировать различные объекты на фоне окружающего пространства. Однако камуфляж, разработанный для видимой области спектра, может быть неэффективен для области спектра 1,4 - 1,8 мкм. Для нее узор камуфляжа исчезает, и обнаруживается силуэт замаскированного объекта [3, 4].

В области спектра 1,4 - 1,8 мкм можно не только видеть в тумане, но и обнаруживать следы льда на крышах самолетов в аэропортах. Это похоже на «черный» лед на дорогах. Его нельзя заметить в видимой области спектра, но можно увидеть в области спектра 1,4 - 1,8 мкм.

В связи с этим в 3-м варианте 2-х канальных ОНВ (блок-схема – см. тот же рис. 4) НТВ канал содержит ТВ камеру 13, в которой вместо матрицы ПЗС ЕМССО установлена матрица фотодетекторов на основе InGaAs. работающая в области спектра 0,8 – 1,7 мкм, Новая ТВ камера называется SWIR (Shot Wave Infra Re) камера. Ее спектральная характеристика представлена на рис. 6.

Новые 2-х канальные ОНВ обеспечивают круглосуточное и всепогодное наблюдение с борта вертолета земной поверхности в широком угле поля зрения без искусственного



Рисунок 6. Типичные кривые спектральной чувствительности НТВ на базе модели SWIR камеры фирмы Allied Vision Infrared Cameras (кривая 1) и модели Goldeye G-008SWIR (кривая 2



Рисунок 7. Внешний вид пилотажных ОНВ на шлеме ЗШ-7В пилота вертолета

освещения местности. Это позволяет экипажам вертолетов осуществлять пилотирование в условиях маловысотного полета, взлет, посадку, поисковые и патрульные операции в ограниченных условиях видения.

ОНВ имеют крепление, допускающее их установку на защитном шлеме пилота (в частности, ЗШ-7В). Крепление представляет собой кронштейн, обеспечивающий откидывание ОНВ наверх в нерабочее положение с последующей жесткой фиксацией с одновременным отключением электропитания, а также возможность быстрого сбрасывания ОНВ со шлема при возникновении нештатных ситуаций. Одновременное отключение ОНВ от бортсети вертолета обеспечивается с помощью быстро разрывного разъема. Кронштейн содержит также съемный противовес, размещаемый в задней части защитного шлема для улучшения балансировки головы пилота. Конструкция крепления ОНВ на шлеме допускает регулировку положения ОНВ по отношению к глазам пилота по всем 6-и степеням свободы с последующей жесткой фиксацией в выбранном положении. Внешний вид ОНВ на защитном шлеме ЗШ-7В дан на рис.7.

В качестве ФПМ на базе КРТ может быть использована модель формата 640x512 пикселей. Размер пикселя 25x25 мкм, размер активной области матрицы 16x12,8 мм, рабочая область спектра 3 – 5 мкм, D* = 2x10¹⁰ Вт ⁻¹см Гц^{1/2}, NETD = 15 мК, питание = 9 – 12 В,

	TBN			43,5(г)х35,5(в)х54(д)			1500	1400	700	1300 1200	600
m	НТВ			37(r)x37(в)x50,3(д)			1000	006	300	1300 1200	600
0	TBN			43,5(г)х35,5(в)х54(д)			1500	1400	700	1300 1200	600
помер варианта Опт	НТВ	Бинокулярное	~	37(г)х37(в)х50,3(д)			800	800	300	1000 1000	300
	TBU			43,5(r)x35,5(B)x54(д)			1500	1400	700	1300 1200	600
	Ночной на базе ЭОП			38			500- 800	-009 700	300	505050	<20
паименование параметра	Тип канала	Конструктивное исполнение	Увеличение, крат	Угол поля зрения, град.	Дальность обнаружения, м, при наблюдении в	нормированных условиях (ЕНО = 5х10 ⁻³ лк, т _а = 0 8.	о,о). - грузового автомобиля,	- мачты ЛЭП,	- ростовой фигуры человека	Дальность обнаружения, м, при наблюдении при пониженной прозрачности атмосферы (ЕНО = 5х10 ³ лк, т _а = 0,4): - грузового автомобиля, - мачты ЛЭП,	- ростовой фигуры человека
	-	2	ю	4			വ			Q	

Сравнительные параметры различных вариантов пилотажных 2-х канальных очков ночного видения Таблица I.

2	Рабочая область спектра, мкм	0,4 0.9 -	3 - 5	0,8 – 1,1	3 - 5	0,8 - 1,7	3 - 5
ω	Фокусное расстояние	25	20	20	20	20	20
6	объектива, им Относительное отверстие объектива	1:1,4	1:1	1:1,2	1:1	1:1,2	1:1
10	фокусное расстояние окуляра	25	20	20	20	20	20
1	Формат матрицы, пиксели		640x512	1024x1024	640x512	1280×1024	640x512
12	Размеры пикселя, мкм		25x25	12,5x12,5	25x25	12,5x12,5	25x25
13	Размер чувствительной области, мм	Ø17,5	16(r)x12,8(в)x20,5(r)	13,3(r)x13,3(B)x18,81(r)	16(r)x12,8(B)x20,5(r)	16(r)x12,8(в)x20,5(r)	16(r)x12,8(в)x20,5(r)
4	Диапазон регулировки межзрачкового расстояния, мм			56 – 72,2			
15	Диапазон диоптрийной установки окуляров, дптр.			± 4			
16	Удаление выходного зрачка, мм			20			
17	Время непрерывной работы в автономном режиме электропитания), не менее, часов			8 (во всех условиях эксг 20 (в нормальных климє	лгуатации) атических условиях)		
18	Напряжение питания, В			24 – 29,4			
	- от аккумуляторов	2,2 3,2 –	9-12	9-12	9-12	9-12	9-12
21	Масса, кг	0),65	0,7		0,75	
22	Диапазон рабочих температур, °С			(-40) – (+40)			

Примечания: 2 – по горизонту, в – по вертикали, д – по диагонали, ЕНО – естественная ночная освещенность, au_a – пропускание атмосферы на 1 км

Продолжение таблицы 1.

энергопотребление ТЭО 11 Вт, время выхода на режим менее 1 мин.

ТВ камера модель CCD201-20(ВТ) на базе ЕМССD фирмы E2V имеет формат 1024х1ё024 пикселя, размер активной области матрицы ПЗС 13,3х13,3 мм, размер пикселя 12,5х12,5 мкм, чувствительность 10⁻⁵ лк, отношение сигнал/шум 50 дБ, разрешающая способность 470 ТВ линий, питание = 9 – 12 В.

ТВ камера Mini SWIR JSX Snap Shot фирмы Goodrich на основе матрицы InGaAs имеет формат 1024x1024 мкм, размер активной области 16x12,8 мм, размер пикселя 12,5x12,5 мкм, D* = 2x10¹⁰ BT⁻¹см Гц^{1/2}, питание = 9 – 12 B.

Основные параметры всех трех вариантов ОНВ даны в таблице 1. Из нее следует, что 3-й вариант ОНВ является наиболее эффективным.

Таким образом, сделан новый шаг в создании пилотажных ОНВ круглосуточного и всепогодного действия.

Список литературы:

1. Изделие «Альфа-2031».: Руководство по эксплуатации. АРЮК.201211.010.ОАО «НПО «Альфа». М., 2011.

2. Специальные наблюдательные приборы предупреждения катастроф и обеспечения аварийно-спасательных работ: Каталог ОАО «НПО «Альфа». М., 2011.

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

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

5. Зверев В.Г., Кривопустова Е.В., Точилина Т.В. Оптические материалы. Часть 2. Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов. СПб НИУ ИТМО. С-Пет., 2013, 248 с.

6. Матрицы ПЗС EMCCD и TB камеры Merlin на их основе. Htth://DiaWorld.ru/catalog/merlinom247.pdf.

7. Фотоприемные устройства, микрокриогенные системы, приборы ночного видения, тепловизоры. Каталог ОАО «Швабе - Фотоприбор», РФ, М., 2013 г.

 8. ИК фотоприемники для тепловизионных систем на 3 – 5 и 8 – 12 мкм. Каталог ИФП СО РАН, г. Новосибирск, 2010 г.

9. Over and above the visible. Каталог фирмы SOFRADIR, Франция, 2013 г.

10. Сидоров Ю.Г., Сабинина И.В., Сидоров Г.Ю., Марчишин И.В., Предеин А.В., Дворецкий С.А., Васильев В.В. Высококачественные матрицы фотодиодов на основе КРТ форматов 640х512 и 320х256 на длины волн 3 – 5 и 8 – 12 мкм. Труды XXIII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. 28 – 30 мая 2014 г, М., Россия, ОАО «НПО «Орион». – 605 с., с.29 – 32.

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ СИНТЕЗИРОВАНИЯ ФИЛЬТРОВ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ

СУЛЕЙМАНОВ Г.М., ПОЗДНЯКОВ А.А., ФЕДОРОВ Д.А.

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

3-я научная рота Космических войск Воздушно-космических сил РФ

E-mail: nrkvvks@mail.ru, drunia-kreng@rambler.ru, f_doca@mail.ru

Аннотация: Цель данной статьи – показать структурно, каким образом синтезируются фильтры радиолокационного (РЛ) сопровождения целей, от чего зависит их состав и применяемые методы обработки. Кратко рассматриваются подходы адаптивной фильтрации, связь качества фильтрации с имеющимися возможностями по получению РЛ измерений и особенностями построения антенной системы, а также методы обеспечения режима сопровождения.

Ключевые слова: фильтр сопровождения, адаптивная фильтрация, синтез фильтра.

POSSIBLE WAYS OF RADAR TRACKING FILTER FUSION

SULEIMANOV G.M., POZDNYAKOV A.A., FEDOROV D.A.

PJSC "Krasnogorskij Zavod named S.A. Zverev"

3-rd Scientific Company of the Space Forces of the Air and Space Forces of the Russian Federation

E-mail: nrkvvks@mail.ru, drunia-kreng@rambler.ru, f_doca@mail.ru

Abstract: The aim of this work is to present as a structure, how does radar tracking filter is fused, what does the composition and utilized processing methods are depended. Different ways of adaptive filtering are considered briefly, as well as filtering capacity association from existing performance of radar measurements, aerial system building features and tracking mode provision methods.

Keywords: *radar tracking filter, adaptive filtering, filter fusion.*

Базовый фильтр сопровождения основан на имеющихся данных о состоянии системы, моделях связи состояния и измерений, выбранного на их основе критерия оптимизации оценивателя, модели движения цели и принятых ограничений. Но для функционирования в реальных условиях он должен обладать определенным набором свойств. Режим сопровождения устройства обработки сигналов РЛС следует после обнаружения отметки о цели, и, как известно, между этими режимами и в их процессе проходят этапы работы, обеспечивающие этот переход и дальнейшее функциониро-вание в режиме сопровождения. Рассмотрим подходы и методы, обеспечения режима сопровождения (рис. 1.):

- Подходы к разделению направлений;
- Методы привязки отметок и траекторий;

- Методы формирования корреляционных стробов;

- Методы завязки траекторий.

Для организации структуры файлов контролируемое пространство разбивается на ряд азимутальных направлений. Секторы для отметок и траекторий могут либо совпадать, либо быть сдвинуты на половину сектора. В процессе определения принадлежности отметки к траектории сравниваются заданная траектории и отметки, содержащиеся в том же секторе, а также в двух смежных. В целях сокращения вычислительных затрат секторы отметок и траектории могут выбираться с перекрытием. В этом случае достаточно учитывать отметки лишь двух секторов [1].

Определившись с разделением направлений, необходимо осуществить привязку от-



Рисунок 1. Подходы и методы обеспечения режима сопровождения

меток к траекториям. Так как однозначно это сделать не представляется возможным, существует несколько методов (рис. 1.):

- Метод, основанный на применении матрицы вариантов привязки «отметка-траектория»;

- Метод разделения приоритетов траектории по классам;

- Метод, основанный на принятии гипотезы о возможности обновления траектории с учётом ошибочно выбранной отметки;

- Метод, основанный на использовании дополнительной информации об отметках и траектории;

- Метод синтезированных алгоритмов завязки траекторий;

- Метод гипотез моделей движения целей.

В отдельности на каждый в данной статье не разбирается, информа-ция по ним детально представлена в [1, 4, 5]. При высокой пространствен-ной плотности отметок и траекторий необходим надёжный алгоритм, поскольку при сопоставлении могут возникать неопределенности, обусловленные как возможностью попадания одной отметки в несколько корреляционных стробов, так и ситуацией, когда в корреляционный строб одной траектории могут попасть несколько отметок [1].

С процессом привязки отметок к траектории тесно связана процедура формирования корреляционных стробов (рис. 2.). Под корреляционным стробом понимается область пространства, центр которой совмещен с экстраполированными координатами цели на определенном цикле обзора РЛС. Форма и размеры строба выбираются таким образом, чтобы действительные результаты измерений (если отметка обнаружена) с высокой вероятностью находились в пределах строба и в то же время число мешающих отметок было ограниченным [1]. Перечислим методы формирования корреляционных стробов:

- С учётом особенностей, применяемых систем координат;

- С учётом коэффициента правдоподобия;

- С учётом дисперсии ускорения цели;

- С учётом согласования с классом цели.

Размер строба непосредственно влияет на показатели качества обнаружения траекто-

рии. Его увеличение приводит к увеличению числа ложных отметок в стробе, в результате возрастает вероятность ложной обнаружения. Уменьшение размера строба может привести к непопаданию истинной отметки в строб, при этом снижается вероятность правильного обнаружения [2].

Процедура формирования корреляционных стробов также тесно связана с непосредственной завязкой траектории. Завязка траектории – это процесс принятия на сопровождение новой цели, входящей в зону обзора РЛС [1]. На этом этапе применяются два основных метода – «скользящего окна» (подробно изложен в [6]) и последовательных испытаний (подробно изложен в [4]). Важным требованием к любому алгоритму автоматической завязки траекторий является возможно меньшее время формирования траектории после входа цели в зону обзора РЛС. В тоже время алгоритм должен предотвращать завязку ложных траекторий, обусловленную ложными отметками.

Таким образом, в процессе автосопровождения цели выполняются следующие операции: оценка параметров траектории цели; экстраполяция параметров траектории на следующий обзор или несколько обзоров; формирование нового строба, в котором с некоторой вероятностью ожидается появление новой отметки; селекция отметок в стробе с целью выбора одной из них для продолжения траектории [3].

Поиск оптимальных и субоптимальных решений задач осуществляется методами теории адаптивной фильтрации (рис. 2). Параметры таких фильтров корректируются в соответствии с входными данными. Другими словами, алгоритм фильтра «подстраивается» к оцениваемым параметрам модели поступающей информации. В реальных системах сопровождения необходимо одновременно обеспечить высокое качество фильтрации шума и быстрое реагирование на резкие манёвры цели. Следовательно, в алгоритме сопровождения, удовлетворяющим этим требованиям, должны быть предусмотрены средства обнаружения факта маневрирования и адаптации параметров и (или) архитектуры фильтра в соответствии со складывающейся реальной обстановкой [1].



Рисунок 2. Подходы к адаптивности фильтра сопровождения

Возможным решением этой проблемы является использование процедуры обнаружения манёвра, которая предполагает адаптивную подстройку параметров фильтра в соответствии с оценкой ускорения. Данная процедура может быть реализована с помощью формирования узкого (внутреннего) и широкого (внешнего) стробов в экстраполированной точке. Если отметка о цели попадает во внутренний строб, то значения параметров фильтра устанавливаются небольшими. И, напротив, если отметка выходит за пределы внутреннего строба, но попадает во внешний, то значения параметров увеличиваются. Действия, предпринимаемые после обнаружения манёвра, представляют собой повторное инициирование фильтра. При использовании предложенной процедуры следует учитывать возможности замирания отраженных сигналов и ложные тревоги. В этих целях при обнаружении манёвра могут формироваться две траектории. Первая траектория строится по отметкам, попадающим во внешний строб; при построении второй траектории отметки внешнего строба не учитываются, а экстраполируется уже имеющаяся траектория. Неопределенность снимается после нескольких последовательных циклов обзора и одна из траекторий стирается. Рассмотренные проце-

дуры просты и дают хорошие результаты, если ускорение цели невелико, вероятность обнаружения высока и вероятность ложной тревоги мала. Кроме того, траектории целей должны быть разнесены в пространстве на достаточно большое расстояние. Однако в реальных условиях указанные допущения не всегда выполняются, что приводит к неопределенностям при сопоставлении отметок и траекторий [1].

Эффективность алгоритмов может быть повышена при разделении траекторий на классы (например, стационарные, баллистические траектории, траектории с маневрирующей целью) и последующей их обработке с учётом приоритета каждого класса и с использованием различных корреляционных стробов. Допустимо также принятие гипотезы о возможности обновления траектории с учётом ошибочно выбранной отметки. Вероятность этого события является мерой достоверности процесса привязки. Следует отметить подход, при котором используется дополнительная информация об отметках траекториях. Например, повышения точности привязки, осуществленной с использованием меры пространственной близости, можно добиться, анализируя ситуацию с учётом измерений радиальной скорости [1].

Чтобы избежать использования стробов очень больших размеров при сопровождении стационарных и баллистических целей, размер корреляционного строба согласовывается с классом цели. При сопровождении баллистической цели размер строба зависит от ошибок измерений и экстраполяции, а при сопровождении маневрирующей цели учитывается также её ускорение [1].

Рассмотрим алгоритм обнаружения манёвра. Он представляет собой решающее правило, с помощью которого определяется момент начала манёвра. Кроме того, такой алгоритм позволяет оценить параметры (интенсивность, длительность) манёвра. Алгоритм основан на обработке обновляющей последовательности в фильтре сопровождения с достаточно узкой полосой, необходимой для подавления шума и сопровождения баллистических целей. Если манёвры являются событиями редкими, то используется обычный калмановский фильтр. Однако, если маневрирующие цели всё же появляются, то обнаружение манёвра осуществляться на основе анализа обновляющей последовательности. Обнаружение манёвра может быть основано на контроле в реальном времени обновляющей последовательности и выявлении отклонений среднего значения от нуля, а самой последовательности от гауссовского некоррелированного процесса [1].

Методы сопровождения охватывают три связанные между собой задачи:

- обнаружение манёвра;

- коррекция оценки состояния калмановского фильтра для компенсации ошибки, обусловленной начальной стадией манёвра;

- настройка параметров калмановского фильтра в соответствии с ожидаемым манёвром.

При решении задачи обнаружения манёвра цели наибольшие трудности вызывает формирование модели манёвра. После того как выбор модели манёвра цели сделан, используется обычно один из двух подходов. При подходе, предложенном Бар-Шаломом, после обнаружения манёвра осуществляется повторная инициализация фильтра на основе результатов последних измерений. При этом исходят из того, что поскольку новые параметры фильтра получены по данным характеризующим манёвр цели, то ошибка корректируется автоматически. При втором подходе оцениваются (по критерию минимума средней квадратичной ошибки) входные параметры (время начала и интенсивность) манёвра цели. Затем данные оценки используются для корректировки фильтра. Два указанных метода суще-ственно отличаются друг от друга. В первом случае обнаружение манёвра и коррекция рассматриваются как самостоятельные задачи. Во втором случае эти задачи решаются совместно, что позволяет непрерывно и рекурсивно производить вычисления [1].

На критериях максимального правдоподобия и максимума апостериорной информации основываются **подходы адаптивности** линейных фильтров такие как:

- Оптимальный и субоптимальный байесовский подход. В оптимальном подходе учитываются все возможные варианты параметров или гипотез относительно модели. Для каждого из них вычисляется оценка состояния, которая затем взвешивается с учётом апостериорной вероятности верной гипотезы.

В Субоптимальном подходе производится свёртывание информации о всех траекториях до момента k-1 в один усредненный параметр;

- Метод «ближайшего соседа». В этом подходе отметка ближайшая к экстраполированному положению (т.е. отметка, соответствующая наиболее правдоподобной гипотезе), принимается за истинную отметку о цели, а все остальные отбрасываются. Поэтому на каждом шаге только одна отметка вводится в калмановский фильтр в качестве результата наблюдения ;

- Метод разветвления траекторий. В этом подходе на каждом шаге алгоритм «разветвляется», и формируется большое количество параллельно поддерживаемых траекторий, каждая из которых взвешивается с соответствующей функцией правдоподобия. Траектории, правдоподобие существования которых находится ниже заданного порога, отбрасываются. Это позволяет ограничить число ветвей алгоритма.

Свойство адаптивности фильтра используется для его подстройки в случае возникновения неопределенностей. В теории цифровой обработки радиолокационной информации существует **два основных источника неопределенностей:**

 непредсказуемые манёвры целей (неопределенность содержится в параметрах модели);

- наличие многочисленных отметок, вызванных отраженными от множества целей или ложными тревогами [1].

Кроме указанных, также нашёл распространение метод адаптивности, основанный на обнаружении расходимости фильтра и адаптации усиления фильтра.

Считается [1], что имеет место расходимость, если средняя квадратичная ошибка оценивания намного превышает величину оценки, при этом значение средней квадратичной ошибки может со временем неограниченно воз-растать. При работе в реальном времени надежное обнаружение расходимости имеет большое значение. В системах сопровождения одним из основных источников расходимости является манёвр цели, особенно в том случае, когда фильтр сопровождения достиг установившегося режима и усиление его мало (фильтр узкополосен). Когда ожидаемые значения дисперсии ускорения незначительны, усиление фильтра уменьшается. Другими словами, фильтр сопровождения имеет узкую полосу пропускания и соответствующие средние квадратичные ошибки очень малы. С другой стороны, на участке ускорения цели наблюдаются очень большие смещения оценок. С увеличением значения ускорения полоса фильтра расширяется и смещение оценок уменьшается из-за повышения среднего квадратичного значения ошибок [1].

Способы обнаружения расходимости:

 наличие смещения от нулевого среднего значения;

- превышение истинной ковариации значения ковариации оптимального фильтра;

- отличие спектра обновляющей последовательности от процесса типа белого шума;

- сравнение функции обновляющей последовательности с заданным порогом.

Действия после обнаружения расходимости:

- повторная инициализация фильтра;

- увеличение размерности матрицы ковариации случайных входных сигналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были кратко рассмотрены:

- Подходы и методы обеспечения режима сопровождения на этапах работы;

- Подходы и методы адаптивной фильтрации;

Особенности, учитывающиеся в указанных направлениях, составляют структуру фильтра сопровождения. Таким образом, в целях синтеза устройства сопровождения, функционирующего в реальных условиях, в базовом линейном или нелинейном фильтре учитываются его базовые особенности, включаются процедуры обеспечения режима сопровождения на этапах функционирования, а также меры адаптивности к возникающим неопределенностям. Обобщающая схема синтеза фильтра РЛ сопровождения представлена на рис. 3. Более подробная схема представлена на рис. 4.



Рисунок 3. Схема синтеза фильтра РЛ сопровождения



Рисунок 4. Подробная схема синтеза фильтра РЛ сопровождения

На этой схеме наглядно представлены используемые методы и подходы, используемые при построении фильтра РЛ сопровождения, их взаимосвязи, влияние одних на другие. Из схемы видно, какие блоки являются базовыми, а какие особенными. Представленный структурированный подход позволяет производить синтез фильтров РЛ сопровождения в зависимости от конкретных условий его эксплуатации.

Список литературы:

1. А. Фарина, Ф. Студер. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей // Пер. с англ. Под ред. А.Н. Юрьева. – М.: Радио и связь, 1993, – 322 с.

2. Ю.Г. Сосулин. Теоретические основы радиолокации и радионавигации // Учеб. Пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1992. – 304 с.

 П.А. Бакулев. Радиолокационные системы // Учебник для вузов. – М.: Радиотехника. 2004, – 320 с.

4. G. Binias. Automatic track initiation with phasedarray radar // IEEE International radar conference.
– 1975. Washington DC.–P. 423–428

5. D. Lucas, K. Ekman, F.P. White. The application of fuzzy pointers in multisensor/multitarget environment // IEEE Conf. on Decision and Control. – 1979. San Diego.–P. 1217

6. N.H. Cholson, R.L. Moose. Maneuvering target tracking using adaptive state estimation // IEEE Trans. – 1977. Aerospace & Electronic systems. Vol. AES–13, No. 3.–P. 310–317

УСТРОЙСТВО ОПТИЧЕСКОЙ ИНДИКАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛИРУЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

ЗАРИПОВ Д.К.¹, НАСИБУЛЛИН Р.А.²

¹Казанский государственный энергетический университет

² ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

E-mail: dzaripov@list.ru

Аннотация: В статье рассмотрена возможность использования оптических индикаторов, устанавливаемых на изолирующие конструкции высоковольтных линий и подстанций, для контроля состояния изоляции. Описаны устройство и принцип работы оптического индикатора с «памятью», способного сохранять данные о значительном загрязнении в течение определенного времени и демонстрировать их, когда это может быть обнаружено в ходе периодических осмотров ВЛ или ПС. Показана, экспериментально, осуществимость индикации загрязнения изоляции, при установке индикатора в качестве стационарного прибора на изолирующей конструкции.

Ключевые слова: оптический индикатор, высоковольтная изолирующая конструкция, загрязненная изоляция.

THE OPTICAL INDICATION OF HV ISOLATOR POLLUTION

D.K. ZARIPOV¹, R.A. NASIBULLIN²

¹Kazan State Energy University, Kazan, Russia

²«Krasnogorsk Plant S.A. Zvereva», Krasnogorsk, Russia

E-mail: dzaripov@list.ru

Abstract: The article discusses the possibility of using optical indicators mounted on insulating construction of high voltage lines and substations, for control of insulation condition. We describe the device and operation of an optical indicator of HV isolator pollution with «memory». It shows the feasibility indication infancy insulation defect indicator when installing the device in a stationary, fixed directly on the insulator.

Keywords: optical indicator, HV insulation, insulation pollution.

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование материалов, технологии изготовления изолирующих конструкций воздушных линий электропередачи (ВЛ) и подстанций (ПС) не снимает, однако, проблемы отключения оборудования в следствии перекрытия и повреждения изоляции, вызванных загрязнением и увлажнением поверхности изолирующих конструкций. На сегодняшний день решение данной проблемы является одной из основных для повышения надежности ВЛ и ПС.

Большое количество загрязняющих веществ, происходящих из различные источников, таких как промышленные предприятия, дороги, морская вода, пыль с полей и др., могут оседать на поверхность изоляторов. В сухих условиях, эти загрязняющие вещества не существенно влияют на напряжение перекрытия высоковольтных изоляторов. Однако, при влажности приближающейся к 100%, когда из-за тумана, моросящего дождя или выпадения росы на загрязненный изолятор попадает влага, загрязненный слой становится проводящим, вызывая токи утечки по поверхности диэлектрика. Процесс развития перекрытия керамических (фарфор и стекло) изоляторов в данных условиях хорошо изучен [1]. Появление гидрофобной полимерной изоляции частично решило, но не устранило эту проблему [2]. Накопление загрязнения на поверхности полимерных материалов за длительный срок эксплуатации также уменьшает их диэлектрическую прочность, приводящую к перекрытию изолятора. В дополнение к этому надежность полимерных изолирующих конструкций в целом на сегодняшний день еще уступает аналогичным стеклянным.

Анализ литературы и собственные эксперименты показывают, что надежным диагностическим признаком загрязнения изоляции является рост тока утечки по поверхности изоляторов, сопровождающийся частичными разрядами (ЧР) амплитудой более 1-10 мА. Имеются многочисленные разработки устройств, предназначенных для контроля тока утечки, устанавливаемые на изолирующие конструкции, например [3-5]. Имеются также разработки, где датчик устанавливается, например, на грозозащитном торсе ВЛ и регистрирует интенсивность ЧР [6].

В данной работе рассматривается возможность использования, разработанного авторами ранее, оптического индикатора дефекта высоковольтной изолирующей конструкции [7-9] также для индикации критического уровня загрязнения изоляции при соответствующей его доработке.

Цель работы – доработка схемы оптического индикатора и экспериментальное обоснование возможности его использования для контроля загрязнения изоляции. Поскольку загрязнения изоляторов проявляются практически только в условиях близких к предельной влажности, то устройство должно обладать «памятью» способной сохранять данные о превышении установленных пороговых значений в течение определенного времени и демонстрировать их, когда это может быть обнаружено в ходе периодических осмотров ВЛ или ПС.

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ИНДИКАТОРА

Если расположить индикатор дефекта на основе светодиода вблизи изолирующей конструкции, находящегося под напряжением, то электрическое поле создаст разность потенциалов между двумя его электродами. Величина наведенной на излучателе ЭДС, протекающего через него тока и яркость свечения будут определяться напряженностью электрического поля. Поскольку распределение электрического поля и потенциала вдоль изолирующей конструкции изменяется при нарушении целостности отдельных ее участков, или неравномерного загрязнения и увлажнения поверхности, то состояние изолирующей конструкции может быть обнаружено по интенсивности свечения индикатора, установленного на участке изолирующей конструкции или вблизи на опоре [7].

Устройство работает следующим образом (Рис.1). Когда изоляция находится в исправном состоянии или дефект незначителен, частичные электрические разряды на изоляции отсутствуют. В этом случае, при достижении в процессе заряда конденсатора С1 на нем порогового напряжения (30-50 В) происходит разряд его через светоизлучающий элемент 4 с электронным ключом, вызывая вспышку зеленого света. При этом напряжение на конденсаторе падает до некоторого нижнего порога, электронный ключ прекращает проводить ток и конденсатор С1 начинает заряжаться вновь и далее цикл повторяется. Частота повторения вспышек света носит периодический характер и зависит от ЭДС на электродах, которая в свою очередь определяется распределением потенциала вдоль изолирующей конструкции. Элементы схемы R1 и C2 (Фиг. 1) подобраны таким образом, что низкочастотные колебания сети не проникают на второй излучающий элемент 5. Кроме того, из-за падения напряжения на вентиле 6, пороговое напряжение включения второго излучающего элемента 5 всегда выше и светится только первый излучающий элемент 4.

При условиях, когда изоляция значительно повреждена или загрязнена, интенсивность частичных электрических разрядов высока и созданы условия для пробоя или перекрытия изолирующей конструкции. Частичные разряды создают импульсы напряженности электрического поля длительностью на несколько порядков меньше периода напряжения промышленной частоты. При определенной величине этих импульсов напряжение на входе второго излучающего элемента 5 с электронным ключом (рис. 1), благодаря малому сопротивлению конденсатора С2 высокочастотным импульсам, может превысить напряжение на излучающем элементе 4 и тогда он включится и будет светиться первым. При высокой интенсивности электрических разрядов будет светиться только второй излучающий элемент 5 красного цвета. Характер свечения не периодический, переходящий в непрерывный. Благодаря наличию вентиля 6, импульсы, вызванные разрядами, не будут влиять на работу первого излучающего элемента.

В случае средней степени повреждения изоляции, когда интенсивность электрических разрядов мала, будет характеризоваться случайным появлением вспышек второго излучающего элемента 5 на фоне первого 4. Порог и частота появления вспышек второго излучающего элемента будет определяться постоянной времени цепи второго конденсатора C2 (рис. 1) и данного излучающего элемента (5), образующих вместе высокочастотный фильтр.

Описанная выше схема индикатора была доработана с целью сохранения в памяти устройства состояния, при котором загорались красные светодиоды, сигнализирующие об имевшем место увлажнении сильно загрязненных изоляторов. Красные излучатели должны мигать несколько дней, после чего переходить в обычный режим работы. В ходе разработки также необходимо было сохранить важную характеристику устройства - отсутствие необходимости отдельных источников питания.

Для реализации данной функции в вышеописанный индикатор введён микроконтроллер (МК) см. рис. 2, который сохраняет в памяти факт появления ЧР на изоляторе и индицирует миганием красных светодиодов в течение заданного пользователем количества времени (порядка нескольких



Рисунок 1. Блок-схема оптического индикатора



Рисунок 2. Блок-схема индикатора с элементом запоминания аварийного состояния

дней). По истечении заданного времени, индикатор переходит в режим нормальной работы.

Измерительная и индицирующая часть работает также, как и описанный выше индикатор. При появлении ЧР срабатывает электронный ключ второго излучающего элемента- светодиода VD2. Через светодиод проходит импульс тока, который создаёт падение напряжения на светодиоде около 1,8 В, что соответствует уровню логической единицы для МК. Таким образом, импульс, сформированный при появлении ЧР на индикаторе, фиксируется микроконтроллером по выводу RA2. Далее МК формирует сигнал логического нуля на выводе RA5. Этот сигнал закрывает транзистор VT1 на время, заданное таймером микроконтроллера. В данном случае на 2 дня. Закрытый транзистор VT1 не позволяет срабатывать электронному ключу первого излучающего элемента VD1. По этой причине напряжение на С2 будет подниматься пока не достигнет порога срабатывания электронного ключа второго светодиода. Ключ канала регистрации ЧР срабатывает, разряжая конденсатор С1 через второй светодиод. Таким образом цикл заряда и разряда С1 с зажиганием второго светодиода продолжается, даже если сами ЧР отсутствуют.

Далее МК формирует сигнал логического нуля на выводе RA5. Этот сигнал закрывает транзистор VT1 на время, заданное таймером микроконтроллера. В данном случае на 2 дня. Закрытый транзистор VT1 не позволяет срабатывать электронному ключу первого излучающего элемента VD1. По этой причине напряжение на C2 будет подниматься пока не достигнет порога срабатывания электронного ключа второго светодиода. Ключ канала регистрации ЧР срабатывает, разряжая конденсатор C1 через второй светодиод. Таким образом цикл заряда и разряда C1 с зажиганием второго светодиода продолжается, даже если сами ЧР отсутствуют.

По истечению заданного времени мигания второго светодиода, МК формирует сигнал на открытие транзистора VT1. При этом электрическая цепь первого светодиода замыкается и индикатор начинает работать в обычном режиме, пока не появится ЧР на изоляторе.

Особенностью данной схемы является её автономность. В качестве элемента памяти выбран наномощный микроконтроллер PIC12LF1571. МК большую часть времени находится в «спящем режиме» и потребляет при этом ток не более 10нА. Ток МК настолько мал, что может питаться от электричества, накопленного на конденсаторе C2, без ущерба для работы всей остальной схемы. Питание МК осуществляется от стабилизатора напряжения. В качестве входного напряжения, стабилизатор использует плавающее напряжение с конденсатора C1. Благодаря использованному ноу-хау стабилизатор потребляет ток не более 150нА.



Рисунок 3. Внешний вид оптического индикатора с «памятью»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.

По описанной выше схеме были изготовлены экспериментальные образцы индикаторов с «памятью», которые прошли испытания в высоковольтной лаборатории Казанского государственного энергетического университета. Индикатор устанавливался на оконцевателе со стороны заземления подвесного полимерного изолятора ЛК70/110. На изолятор подавалось напряжение от 40 до 75 кВ. Измерения тока утечки производились с помощью осциллографа TDS2000 подключенного к резистору 1 кОм, установленному в рассечку между изолятором и заземлением. Одновременно с измерением токов утечки с помощью секундомера измерялся период мигания светодиодов индикатора. Всего было проведено три серии экспериментов:

- на сухом изоляторе;

на изоляторе, смоченном водопроводной водой;
 на изоляторе, загрязненный соляным раствором в пропорции 20 мг/л (удельная проводимость 40 мкСм/см для средней степени загрязнения).

Нанесение воды и раствора на изолятор осуществлялось путем распыления. Выбор концентрации раствора, метода нанесения и измерений был подобен описанному ранее в работе [10], посвященной исследованию разрядных процессов на подвесном полимерном изоляторе при смачивании водным раствором, для возможности сопоставления полученных результатов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты измерений токов утечки и периода мигания светодиодов индикатора для различных серий экспериментов приведены на рис. 4 и рис. 5 соответственно.

На рис. 6 приведен вид загрязненного соляным раствором изолятора с установленным на нем индакатором при напряжении 65 кВ.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.

Полученные результаты количественно и качественно согласуются с подобными экспериментами с подвесным полимерным изолятором, но без индикатора, описанными в работе [10]. Токи утечки (рис.4) после опрыскивании поверхности соляным раствором удельной проводимостью около 40 мкСм/см возрастают примерно на два порядка по сравнению с сухой поверхностью или смоченной обычной водой, что вызвано появлением в результирующем токе значительной активной составляющей.

Характер разрядной деятельности на поверхности изолятора (рис. 6), в виде коротких дуг между каплями воды, соответствует представлениям о развитии разряда вдоль смоченной гидрофобной поверхности [2].



Рисунок 4. Графики токов утечки сухого, смоченного водой и загрязненного соляным раствором изолятора



Рисунок 5. Графики периода мигания зеленых светодиодов для сухого и смоченного водой изолятора, а также зеленых и красных светодиодов для загрязненного соляным раствором изолятора

Изменение периода (частоты) мигания светодиодов индикатора (рис. 5) наглядно показывает влияние загрязнения на изменение распределение электрического поля вдоль изолятора. Появление на незагрязненной поверхности капель воды практически не изменят напряженность поля в области индикатора. В тоже время, диффузия воды в загрязняющий слой приводит к образованию проводящих дорожек с образование множества перемежающихся коротких дуг, соединяющих отдельные капли, и приводящих к заметному возрастанию средней величины напряженности поля в области индикатора, а также появлению импульсов, вызванных отдельными разрядами. В среднем период мигания зеленых светодиодов уменьшался примерно в 2,5 раза. Кроме того, если для чистой поверхности красные (предупреждающие) светодиоды не загорались при напряжении, значительно превышающем фазное (65 кВ), то при загрязненной поверхности вспышки наблюдались, начиная 60 кВ. В соответствии с разработанной схемой, благодаря памяти, свечение красных светодиодов сохранялось даже при значительном снижении напряжения. Проверить длительность сохранения памяти устройства (несколько дней) в лабораторных условиях не представлялось возможным.

выводы

В целом исследования показали возможность использования предложенного устройства оптической индикации для контроля загрязнения изоляции. Цели разработки достигнуты. Данные индикаторы могут помочь при плановых осмотрах и обслуживании ОРУ и ВЛ. При разработке промышленных образцов индикаторов также должны быть решены проблемы устойчивости их к загрязнениям и неблагоприятным погодным условиям, грозовым и коммутационным перенапряжениям.



Рисунок 6. Каритина разрядной деятельности на изоляторе в лаборатории при загрязнении

Список литературы:

1. Александров Г.Н. и др. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции. «Энергия» Л., 1969.

2. Insulators for Icing and Polluted Environments. M. Farzaneh and W.A. Chisholm, Wiley, ISBN 978-0-470-28234-2, Piscataway, NJ IEEE Press 2009.

3. *G. Montoya, I. Ramirez, and J. I. Montoya,* "Correlation among ESDD, NSDD and leakage current in distribution insulators". Proc. Inst. Elect. Eng.—Gener., Transmiss. Distrib., vol. 151, no. 3, pp. 334–340, May 2004.

4. *E. Fontana, S. C. Oliveira, F. J. M. M. Cavalcanti, R. B. Lima, J. F.* Martins-Filho, and E. Meneses-Pacheco. "Novel system for leakage current detection on insulator strings of overhead transmission lines". IEEE Trans. Power Del., vol. 21, no. 4, pp. 2064– 2070, Oct. 2006

5. Пат. 2392679 Российская Федерация, МПК Н01В17/00. Индикатор состояния высоковольтной изоляции / Старцев В. В., Любимов В. А., Соловьев Э. П., Солодков Ю.А. ; заявитель и патентообладатель закрытое акционерное общество «Арматурно-изоляторный завод». - № 2009122250/28; заявл. 10.06.09; опубл. 20.06.2010. – 12 с.

6. *A. Levinzon, D. Kottick, Dr. Roman Knijnik, Liron Frenkel,* "On-Line Wireless PD Monitoring System for Contamination Detection on High Voltage Overhead Transmission Lines Insulators", B2-205, CIGRE 2012.

7. Пат. 2517776 Российская Федерация, МПК G01R31/08. Способ оптической дистанционной диагностики изолирующей конструкции/ Зарипов Д.К.; заявитель и патентообладатель Зарипов Д.К. - № 2012151785/28; заявл. 03.12.2012; опубл. 27.05.2014 – 6 с.

8. Зарипов Д.К., Балобанов Р.Н. Индикатор дефекта высоковольтной изолирующей конструкции / Д.К. Зарипов // Электротехника. – 2016. - № 6. - С. 16-21.

9. Балобанов Р.Н., Зарипов Д.К., Насибуллин Р.А., Маргулис С.М. Устройство оптической индикации дефекта высоковольтной изолирующей конструкции / Р.Н. Балобанов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. - № 3-4. - С. 119-125.

10. Hoch D.A., MAhatho N., Bolonga F., «Water

Induced Discharges on Transmission Voltage Silicone Rubber Insulators.» https://www.researchgate.net/ publication/, 2006.

References:

1. *Alexandrov G.N.* Electrical strength of external high-voltage insulation. «Energy» L., 1969.

2. Insulators for Icing and Polluted Environments M. Farzaneh and W.A. Chisholm, Wiley, ISBN 978-0-470-28234-2 Piscataway, NJ IEEE Press 2009.

3. *G. Montoya, I. Ramirez, and J. I. Montoya*, "Correlation among ESDD, NSDD and leakage current in distribution insulators," Proc. Inst. Elect. Eng.—Gener., Transmiss. Distrib., vol. 151, no. 3, pp. 334–340, May 2009.

4. *E. Fontana, S. C. Oliveira, F. J. M. M. Cavalcanti, R. B. Lima, J. F. Martins-Filho, and E. Meneses-Pacheco,* "Novel system for leakage current detection on insulator strings of overhead transmission lines," IEEE Trans. Power Del., vol. 21, no. 4, pp. 2064– 2070, Oct. 2009

5. Pat. 2392679 Russian Federation, IPC H01B17 / 00. Status LED high-voltage insulation / Elders V.V., Lyubimov V.A., Soloviev E.P., licorice Yu; the applicant and the patentee Closed Joint-Stock Company «Insulators and Fittings Plant». - № 2009122250/28; appl. 10.06.09; publ. 20.06.2010. - 12 p.

6. *A. Levinzon, D. Kottick, Dr. Roman Knijnik, Liron Frenkel*, "On-Line Wireless PD Monitoring System for Contamination Detection on High Voltage Overhead Transmission Lines Insulators", B2-205, CIGRE 2012.

7. US Pat. 2517776 Russian Federation, G01R31 / 08 IPC. An optical remote diagnostics of insulating systems / Zaripov D.K. ; the applicant and the patentee Zaripov D.K. - № 2012151785/28; appl. 03.12.2012; publ. 05/27/2014 – 6

8. Zaripov D.K., Balobanov R.N. Defect indicator of high-voltage insulator / D.K. Zaripov // Electrotechnika. - 2016. - № 6. - S. 16-21.

9. Balabanov R.N, Zaripov D.K, Nasibullin R.A, Margulis S.M. "Device for optical indication of a defect in a high-voltage insulating structure" / R.N. Balabanov // News of higher educational institutions. Problems of energy. - 2017. - No. 3-4. - pp. 119-125.

10. *Hoch D.A., MAhatho N., Bolonga F.*, «Water Induced Discharges on Transmission Voltage Silicone Rubber Insulators.» https://www.researchgate.net/ publication/, 2006.

УНИКАЛЬНЫЕ КРУГЛОШЛИФОВАЛЬНЫЕ СТАНКИ ВСЗ «ТЕХНИКА»

ПЕРЕВОЗЧИКОВ Д.Н.

ООО «Владимирский станкостроительный завод «Техника», г. Владимир

E-mail: info@vzfs.ru, vzfs@yandex.ru

Аннотация: Представлены разработки ООО ВСЗ «Техника», в том числе универсальные круглошлифовальные станки, с УЧПУ, универсальные, а также прецизионный круглошлифовальный станок с УЧПУ.

Ключевые слова: круглошлифовальный станок, внутришлифовальный станок, резьбошлифовальный станок, УЧПУ.

История Владимирского станкостроительного завода «Техника» берет свое начало с 1935 года. На протяжении многих лет завод специализировался на проектировании и производстве различного прецизионного технологического оборудования среднего типоразмера для предприятий авиационной промышленности.

В настоящее время предприятие осуществляет проектирование и серийное производство различных круглошлифовальных станков, в том числе с УЧПУ, особо высокой точности с параметрами обработки до 0,2 мкм (мастерстанки класса точности «С»).

ООО ВСЗ «Техника» является единственным в России производителем станков с такими параметрами, что обеспечивает импортозамещение прецизионных круглошлифовальных станков марки Studer (Швейцария).

Предприятие имеет собственное конструкторское бюро, способное решать сложные задачи проектицования самых современных станков соответствующих мировому техническому уровню и обладающее НОУ-ХАУ в достижении прецизионной точности.

Преимуществом предприятия является возможность решения наукоёмких инновационных проблем в комплексе – от постановки задач потребительским рынком, до изготовления оборудования и отладки технологии.

За последние пять лет предприятием выполнено более 50 проектов по изготовлению новых образцов металлообрабатывающего оборудования.

В настоящее время в серийном производстве освоен ряд прецизионных универсальных круглошлифовальных станков с командоконтроллером и УЧПУ серии КШ в 2-х; 3-х; 4-х координатном исполнении (рис. 1, 2).

Рабочее пространство продукционной линейки этого шлифовального оборудования объединяет размерные группы деталей типа тел вращения: валов, втулок, фланцев и гильз с диаметром наружных поверхностей 1,5... 200 мм (в перспективе до 450 мм), длиной 400, 600 и 1000 мм (в перспективе 1600 мм), диаметром внутренних отверстий 3...100 мм (в перспективе 350 мм) и длиной от 2 до 5 диаметров обрабатываемого отверстия.



Рисунок 1. Универсальный круглошлифовальный станок с командоконтроллером



Рисунок 2. Универсальный круглошлифовальный станок с УЧПУ

Линейка шлифовального оборудования обеспечивает широкий спектр технологических возможностей - от традиционных универсальных технологий, до инновационных высоко технологических наукоемких технологических решений.

Одной из первоочередных причин, обуславливающих необходимость использования специализированных станков, являются проблемы, возникающие при освоении обработки необычных (по сравнению с широко применяемыми сталями и сплавами) материалов.

Например, на BC3 «Техника» неоднократно обращались заказчики с проблемами, связанными с обработкой деталей из неметаллических материалов – стекло, ситталы (стеклокерамика), карбид кремния.

Особое место в данной нише занимают станки для обработки уплотнительных колец из карбида кремния (рис. 3).

Материал заготовок обусловил применение алмазных шлифовальных кругов. В качестве правящего инструмента было определено применение, как алмазных роликов, так и обычных абразивных кругов.

Практически, в одной машине совмещены несколько станков. Применено несколько отсчетно-измерительных систем, акустические датчики касания детали. Правка и вскрытие алмазных шлифовальных кругов могут осуществляться с помощью абразивных кругов и алмазных роликов, закрепляемых на бабке изделия и правящем устройстве, либо брусками, установленными в съемных держателях. Сами правящие круги возможно править на станках либо алмазными резцами, либо рабочими шлифовальными кругами. При необходимости, при помощи съемного резцедержателя возможно снятие металла с тела шлифовального алмазного круга.

Станки оснащены системой пожаротушения. Концентрация операций, постоянство баз, применение 2-3 шлифовальных кругов на одной инструментальной оправке, возможность одновременного закрепления двух инструментальных оправок в рабочем поворотном шпинделе, переход с быстрых перемещений на рабочую скорость обработки в момент касания детали кругом обеспечивают производительность и точность обработки. Применение станка практически исключило время межоперационного пролеживания заготовок. Алгоритмы доработки детали по результатам их измерения после обработки позволяют получать годные детали при обработке заготовок широким разбросом припусков в партии заготовок, обусловленным процессом спекания.

Многоточечное измерение заготовок и обработанных деталей, шлифовальных и правящих



Рисунок 3. Универсальный круглошлифовальный станок для обработки карбида кремния



Рисунок 4. Внутришлифовальный станок с УЧПУ

кругов, алгоритмы расчетов их размеров, геометрии, и биений относительно осей шпинделей позволяют поддерживать стабильную точность обработки, а оператор полностью владеет процессом обработки. Программирование в параметризованных циклах упрощает работу оператора.

Стоит отметить, что конструкторский отдел совместно с представителем Заказчика в течении трех лет проводил опытные работы на серийно выпускаемых станках по обработке деталей из карбида кремния алмазными кругами разных производителей. Станки получили уникальную оснащенность, вобрали в себя все лучшее, имеющееся на аналогичных станках «ANCA» и «WALTER». И таких примеров множество, проще сказать с какими материалами не приходилось работать BC3 «Техника».

Расширяя номенклатуру специализированных станков под задачи заказчика, на заводе были спроектированы и изготовлены внутри- и резьбошлифовальные станки моделей ВШ-200.3 и ВРШ-300.4 соответственно (рис. 4, 5).

На внутришлифовальных станках было реализовано шлифование внутренних поверхностей с использованием трех управляемых координат, цилиндрических, конических и торцевых поверхностей круглых деталей, требующих особо высокой точности размеров в автоматическом цикле в условиях единичного и мелкосерийного производства с максимальными размерами по диаметру обработки до 150 мм и длины отверстия до 100 мм.

На резьбошлифовальных станках с использованием до четырех управляемых координат реализовано шлифование наружных и внутренних резьбовых поверхностей различных видов (метрических, дюймовых, трапецеидальных, для ШВП и др.), однозаходных и многозаходных, правого и левого направления однониточным кругом в автоматическом цикле с максимальным диаметром наружней шлифовки 100 мм и длиной 300 мм, а по внутренним размерам отверстия - 50 мм по длине и диаметру.

Особо хотелось бы отметить последние разработки ООО ВСЗ «Техника», которые были реализованы на базе станков серии КШ (рис. 6). Данное оборудование обладает следующими особенностями и техническими решениями:

– станина выполнена из высоконаполненного композиционного материала (синтегран) марки СГН-Э-7,5-1-20, что позволяет получить высокие демпфирующие способности и практическое отсутствие температурных деформаций;

 поперечный и продольный суппорты изготавливаются из высококачественного стабилизированного серого чугуна и имеют высокоточные шлифованные V-образные и плоские



Рисунок 5. Станок универсальный резьбошлифовальный



Рисунок 6. Универсальный круглошлифовальный станок

направляющие, расстояние между которыми оптимально согласовано для увеличения общей жесткости станка; по всему диапазону перемещения суппорты полностью лежат на направляющих станины станка; в зону направляющих под давлением от смазочной гидростанции подается специальное антискачковое масло, обеспечивающее разгрузку веса столов, минимальный коэффициент трения в направляющих;

 перемещение по координате «Z» реализовано на разгруженном линейном двигателе, по координате «X» - на прецизионной ШВП от многополюсного кругового синхронного мотора, а по координате «C» - от многополюсного кругового синхронного мотора, выполненного по типу мотор-шпинделя;

 использование абсолютных линейных и круговых преобразователей с дискретой задания перемещений 0,0001 мм и 0,0001 град, соответственно позволяет исключить необходимость выхода в «ноль» координат и реализовать высокую точность позиционирования узлов;

 опционно предлагается широкий перечень вспомогательных устройств под самые разные задачи:

• станции СОЖ (на базе фильтртранспортера, фильтра транспортера с магнитным сепаратором, центрифуги);

• устройства правки кругов (стационарно на стойке за задней бабкой, ротациионная правка

с профильным или острым роликом, подводимое устройство для патронных работ);

• внутришлифовальные шпинделя 24, 48, 60 и 90 тыс. об/мин.;

 устройства удаления паров СОЖ из рабочей зоны.

Универсальный круглошлифовальный станок модели КШ-400.3 ОК

Данный станок был специально оснащен под шлифование золотниковых пар прибором сопряженного шлифования золотников для обеспечения диаметрального зазора 0,004-0,006 мм по гильзам, а так же шлифования внутренних отсечных кромок в гильзах и размерного шлифования отсечных кромок на золотниках с использованием датчика фирмы «Renishaw».

Станок имеет алмазный ролик для 3-сторонней правки основного шлифовального круга, гидрофицированное откидное устройство для правки кругов на оправках внутришлифовальных шпинделей.

Бабка изделия имеет ось «С» и может работать, как с неподвижным центром, так и с вращающимся. Можно вести обработку в 3-кулачковом и цанговом патронах, в том числе с подачей СОЖ через шпиндель.

Трехкоординатный круглошлифовальный станок модели КШ-400.3 с линейными управляемыми координатами «Х» и «Z» и круговой «С» на шпинделе бабки изделия

Данный станок предназначен для наружного шлифования эксцентричных и некруглых деталей, требующих особо высокой точности размеров в ручном и автоматическом циклах в условиях серийного производства.

Шлифование может выполняться: в центрах, в 3-кулачковом или в цанговом патронах.

Примером выполнения работ на данном станке может служить детали типа «Пуансон» (рис. 7).

Продолжая расширять модельный ряд прецизионных станков на ВСЗ «Техника» спроектировали и изготовили круглошлифовальный станок с УЧПУ модели КШ-41 с высотой центров 275 мм и длиной наружной обработки 1600 мм (рис. 8).



Рисунок 7. Чертеж детали типа «Пуансон»

Элементы станка выполнены на современном техническом уровне. Станина изготовлена из синтетического гранита, обладает исключительной жесткостью и повышенными демпфирующими свойствами.

Перемещение по линейным координатам «Х» и «Z» осуществляется высокоточными приводами с двигателями прямого действия.



Рисунок 8. Универсальный круглорезьбошлифовальный станок

Шлифовальные электрошпиндели в количестве 3 штук расположены на револьверной головке (координата В) с прямым приводом, обеспечивающим автоматическую смену шлифовальных кругов и точное позиционирование на произвольный угол. Шпиндель детали выполнен по принципу управляемой координаты «С» и имеет возможность шлифовки наряду с цилиндрическими наружными и внутренними поверхностями различных резьбовых поверхностей. Управление станком осуществляется УЧПУ фирмы Siemens 840DS1.

Накопленный за долгие годы огромный интеллектуальный потенциал, необходимые производственные площади и технологическое оборудование, высокопрофессиональные рабочие и конструкторские кадры – все это позволяет Владимирскому станкостроительному заводу «Техника» решать самые сложные задачи станкостроения, возникающие у заказчиков.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА И МЕТОД КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНОГО АСТРОНОМИЧЕСКОГО АСФЕРИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА– «М2»

ДЕНИСОВ Д.Г., ШКИТИН Г.А., *ПАТРИКЕЕВ В.Е., *CEMEHOB 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 поверхности телескопического вторичного зеркала наземного базирования для телескопа DAG – M2. Подробный чертёж зеркала представлен в приложении А. Особенностью данного зеркала является изготовление асферической поверхности, ключевой в процессе формирования изображения. Были выделены наиболее важные операции технологического процесса такие, как шлифование плоской заготовки, высверливание центрального отверстия, шлифование сферической поверхности, асферизация рабочей поверхности. Рассмотрен аттестационный контроль профиля сферической поверхности в схеме с использованием сферического зеркала Хиндла. Для наиболее точного контроля профиля асферизации предлагается функциональная схема интерферометра ИКАП-2, разработанного по схеме интерферометра Тваймана - Грина, основанного на методе интерференции волнового фронта.

Ключевые слова: оптический материал, технологический процесс, ближайшая сфера сравнения, интерферометрический прибор контроля, эталонная поверхность сравнения.

введение

Научно-технические достижения в области астрономии, космической и лазерной техники в значительной степени стали возможными благодаря появлению новых высококлассных оптических наземных и космических систем. Важнейшей частью орбитального 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. Исходя из этого, возникает необходимость создания конструкции облегченных оптических деталей, максимально уменьшая деформации зеркал и сохраняя оптические свойства, а также усовершенствование технологии формообразования, развивая автоматизированные способы доводки поверхностей до высокого качества.

Целью данной работы является разработка технологического процесса изготовления выпуклого гиперболического зеркала с заданными геометрическими параметрами (рис. 1).

К материалам для астрономических зеркал предъявляются серьезные требования, которые обусловлены жесткими допусками на соответствие поверхности зеркала расчётной форме:

- близкий к нулю коэффициент термического линейного расширения (ТКЛР);

- высокий класс шероховатости;
- малая плотность.

ОСНОВНЫЕ МОМЕНТЫ ТЕХПРОЦЕССА

Для оптического изделия, представленного на рисунке 1, с заданными геометрическими параметрами, рассмотрим наиболее важные технологические этапы его производства.

Шлифование плоской заготовки на станке ШП-1000. Эскиз процесса представлен на рисунке 2.



Рисунок 1. Зеркало M2



Рисунок 2. Эскиз процесса



Рисунок 3. Схема базирования заготовки на станке

На стол станка ШП-1000, в соответствии со схемой базирования, кладётся заготовка, прошедшая предварительное кругление и закрепляется с помощью установочных зажимов. Соответствующая эквивалентная схема базирования представлена на рисунке 3.

Так как стол имеет больший диаметр чем заготовка, то никаких дополнительных установочных элементов не требуется. Обработка происходит таблеточным инструментом, диаметр которого равен 200 мм. При обработке используются шлифпорошки №12, 15 и микропорошок М40. После установки заготовки на стол начинается процесс обработки. Шлифовальный инструмент и станочный стол начинают вращать в одном или в разных направлениях с разной угловой скоростью. Так как шлифовальный инструмент имеет намного меньший диаметр, чем заготовка, то он, помимо вращения вокруг своей оси, также имеет свою траекторию движения, а её проекцию на горизонтальную плоскость называют штрихом. Это нужно для равномерной обработки всей поверхности заготовки.

Штрих может быть:

- центральным, т.е. проходящим через центр вращения нижнего звена;

- центральным симметричным, т.е. проходящим через центр вращения нижнего звена и при этом a = b;

- центральным нессиметричным, т.е. когда а ≠ b;

- нецентральным, т.е. не проходящим через центр вращения нижнего звена.

Пример штриха представлен на рисунке 4.

Для достижения оптимальных характеристик профиля формы оптической поверхности, штрих должен быть центральным симметричным. (*△N* → *RMS*)

Шлифование плоской заготовки производится с двух сторон до толщины .

Представленная операция была выбрана в качестве одной из основных по причине того, что именно на этом этапе формируются установочные базы, как основные, так и вспомогательные, указанные на рисунке 1.

Полученная плоскопараллельная заготовка поступает на операцию высверливания центрального отверстия.


Рисунок 4. Штрих



Рисунок 5. Эскиз процесса



Рисунок 6. Схема базирования заготовки на станке

 Высверливание центрального отверстия на координатно-расточном станке 2Е – 470.
 Эскиз процесса представлен на рисунке 5.

После того как были сформированы установочные базы, появляется возможность высверлить центральное отверстие относительно одной из полученных баз. На стол станка 2E – 470, на одну из установочных баз, в соответствии с эквивалентной схемой базирования, представленной на рисунке 6 устанавливается заготовка.

На данном этапе очень важно правильно произвести центрирование заготовки относительно стола и рабочего инструмента станка, что обеспечивает высокую соосность полученного отверстия с положением стола. Центрирование осуществляется с помощью индикатора биения, который упирается в наружный диаметр зеркала. Зеркало вращают на столе, периодически останавливая и проверяя показания индикатора. Операция повторяется несколько раз для точной установки заготовки по центру. После центрирования, заготовку необходимо плотно закрепить относительно рабочего стола станка. Делается это с помощью специальных зажимов, которые оказывают давление на края заготовки. Это необходимо для того, чтобы минимизировать или полностью устранить биение заготовки, а так же, чтобы сохранять точность позиционирования инструмента относительно центра заготовки.

Обработка производится алмазным сверлом, имеющим диаметр 20 мм с концентрацией алмаза равной 100%. Подробный чертёж данного инструмента представлен на рисунке 7.

Высверливание происходит по диаметру 140 мм на глубину 52,5 мм. Последующее досверливание выполняют по траектории контура «Ромашка», которая представлена на рисунке 8. Операция досверливания необходима для того, чтобы отсверлить контуры неправильной геометрии, оставшиеся после грубого сверления. Остаточные после досверливания выколки промываются с помощью плавиковой кислоты (HF).

После высверливания отверстия берут фасонную фрезу (имеет форму глубокой тарелки) и делают фаски внутри отверстия.



- 1. Твёрдость алмазной коронки HRB 70..90.
- 2. Раковины и трещины, видимые при увеличении 4* не допустимы.
- 3. Концентраци я алмаза 100%.
- 4. Фракция алмаза АВ 80/63.
- 5. Связка М1.



Рисунок 7. Алмазное сверло



Рисунок 8. Контур отсверловки «Ромашка»

Данная операция была выбрана в качестве одной из основных, потому что она является ключевой при присоединении разгрузки зеркала. Эту разгрузку разработала и предоставила фирма-заказчик AMOS (рис. 9).

После грубой обработки детали, можно переходить к более тонким операциям. Одной из важнейших является шлифование сферической поверхности.

3) Шлифование сферической поверхности на станке ПД-1000. Эскиз процесса представлен на рисунке 10.



Рисунок 9. Разгрузка зеркала M2



Рисунок 10. Эскиз процесса

После высверливания центрального отверстия необходимо сформировать сферу с ближайшим $R_{c\phi}$. На первом этапе происходит грубое фрезерование неровной сферической поверхности, профиль которой представлен на рисунке 11.



Рисунок 11. Профиль неровной сферической поверхности

После получения такой поверхности необходимо провести операцию шлифования. На стол станка ПД – 1000, в соответствии с эквивалентной схемой базирования, представленной на рисунке 12, устанавливается заготовка.



Рисунок 12.

Схема базирования заготовки на станке На ней отсутствуют какие-либо крепления, потому что при данной операции для удержания заготовки в нужном положении достаточно её собственного веса.

Сама обработка происходит по тому же принципу, что и при шлифовании плоской заготовки на станке ШП – 1000, который был рассмотрен выше.

В качестве обрабатывающего инструмента используется таблеточный инструмент диаметром 150 мм. При обработке применяют шлифпорошки № 5, 12, М40, М28, М14 и М10. Эталонный радиус сферы равен 2755 ± 1 мм.

Радиус самой получаемой сферы равен 2749 ± 1 мм. Допустимые отступления радиуса от эталонного на базе сферометра 121 мм от 1,23 мкм до 1,72 мкм.

Эта операция была выбрана в качестве одной из основных, потому что именно на этой стадии формируется опорная сфера, относительно которой будет производиться асферизация.

4) Асферизация рабочей поверхности шлифованием на станке СПА – 1500. Эскиз процесса представлен на рисунке 13.



Рисунок 13. Эскиз процесса

После создания самой сферы формируется асферическая поверхность. На стол станка СПА – 1500, в соответствии со схемой базирования, представленной на рисунке 14, устанавливается заготовка.

Прежде чем выполнять асферизацию, необходимо рассчитать профиль асферизации. Для измерения профиля высокоточных асферических поверхностей крупногабаритных оптических деталей, в частности, зеркал телескопов,



Рисунок 14. Схема базирования заготовки на станке

используется линейный трёхточечный сферометр с двумя агатовыми ножками на концах и индикаторной головкой, цена деления которых равна 0,1 мкм, установленной посередине, база сферометра равна "а" – расстоянию между двумя крайними агатовыми ножками сферометра. С помощью такого сферометра измеряют стрелки прогиба вдоль диаметрального направления или по хорде, касательной к центральному отверстию на детали (для деталей с центральным отверстием). Схема установки ножек сферометра приведена на рисунке 15.

Сферометр последовательно смещается на расстояние а/2 таким образом, чтобы одна крайняя ножка сферометра перемещалась в положение центральной ножки, центральная в положение второй крайней ножки, а вторая крайняя ножка в новое положение. Таким образом, проходится весь диаметральный отрезок или хорда с шагом в половину базы сферометра. При этом радиус детали (диаметр, хорда) разбивается на отдельные промежутки "а", укладывающиеся на полном радиусе детали. Результаты сравниваются с расчётными значениями стрелок прогиба при каждом положении сферометра и по данным измерений строится относительный профиль отклонений от ближайшей асферической поверхности для выполнения последующего шлифования. Дис-



Рисунок 15. Схема установки ножек сферометра на поверхности

кретность построенного профиля составляет половину базы сферометра, уменьшение его базы приводит к увеличению погрешности определения профиля. Для более точного построения профиля поверхности можно использовать сферометр с двумя, тремя и более индикаторными головками. Он представлен на рисунке 16. [5]



Рисунок 16. Сферометр для контроля профиля асферической поверхности

После расчёта асферической поверхности можно построить сам профиль, или, проще говоря, количество и местоположение на сфере материала, который был снят. Этот профиль представлен на рисунке 17. Также можно построить топографическую карту траектории движения малоразмерного инструмента по обрабатываемой поверхности. Эта карта представлена на рисунке 18.



Рисунок 18. Топографическая карта

В зависимости от режима работы станка, будь то ручной или автоматический, полученную топографическую карту либо переносят на специальное бумажное лекало, либо переносят программно в станок.

После расчётов асферической поверхности на стол станка СПА – 1500, в соответствии со схемой базирования, представленной на рисунке 19, устанавливается заготовка.

Асферизация производится малоразмерным сплошным инструментом диаметром 150 мм по такому же принципу, что и при шлифовании плоской заготовки на станке ШП – 1000, который был рассмотрен выше, за тем лишь исключением, что штрих будет строго соответствовать рассчитанной топографической карте. В данном зеркале необходимо добиться значения асферичности равному 55,94 мкм, в соответствии с требованиями, представленными на рисунке 1.

После изготовления асферической поверхности её необходимо проконтролировать с помощью специальной схемы контроля.

4) Контроль формы поверхности в схеме Хиндла. Схема системы контроля представлена на рисунке 20.

Данная схема состоит из контролируемого зеркала M2, сферического зеркала Хиндла, представленного на рисунке 21, и интерферометра.

В качестве интерферометра используется ИКАП-2, разработанный по схеме Тваймана -Грина, основанного на методе интерференции волнового фронта. Его особенность – светоделительный куб, который делит волновые фронты на два и «ломает» оптическую ось, что позволяет уменьшить габариты системы контроля. Схема этого интерферометра представлена на рисунке 22.

С подробной схемой контроля поверхности и всеми её составляющими можно ознакомиться в приложении Е.

Принцип работы этой схемы заключается в том, что интерферометр формирует волновой фронт, который отражается от контролируемого зеркала на сферу Хиндла и обратно. Исходя



Схема базирования заготовки на станке



Рисунок 20. Схема контроля Хиндла



Рисунок 21. Сферическое зеркало Хиндла



Рисунок 22. Схема интерферометра ИКАП-2

из вернувшегося фронта можно определить качество поверхности зеркала. Форма волнового фронта связана с формой поверхности через набег фаз, который появляется из-за отражения от зеркала М2. Из-за того, что луч отражается два раза от зеркала, RMS зависит от волнового фронта в четыре раза.

$$RMS = \frac{W(x, y)}{4},$$
$$\phi = k * h * n = \frac{2 * \pi}{\lambda} * 2h,$$

В данной схеме ключевым моментом является сопряжение фокусов контролируемого зеркала М2 и эталонного зеркала Хиндла для достижения автоколлимации луча.

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, рассмотрена и проанализирована функциональная схема стенда контроля основных параметров волнового фронта в соответствии с чертежом исследуемой оптической детали.

Список литературы:

1. Окатов М.А., Справочник технолога оптика – СПб: Политехника, 2004 г.

2. *Малакара Д.,* Оптический производственный контроль – М.: Машиностроение, 1985 г.

3. *Кирилловский В.К.*, Оптические измерения – Санкт-Петербург, 2006 г.

4. Полещук А.Г., Лазерный интерференционный измерительный комплекс – Новосибирск, 2012 г.

5. Семёнов А.П., Патрикеев В.Е., Технологические особенности изготовления главных зеркал телескопов – ЛЗОС, 2013 г.

6. *Быков Б.З., Перов В.А.*, Обработка оптических деталей алмазным инструментом – МГТУ им. Баумана, 2004 г.

СТАНОК С ЧПУ ДЛЯ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ПЛОСКИХ И СФЕРИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ДИАМЕТРОМ от 80 мм до 350 мм

ВАЛЕЙСКИЙ Д.В., ДОРОШКЕВИЧ А.Г., ДЕМИДОВИЧ Т.И., КАСИНСКИЙ Н.К., КРАСОВСКИЙ С.Н., МИТКЕВИЧ И.Н., ШУШКАНОВА Т.Г.

Открытое акционерное общество «Оптическое станкостроение и вакуумная техника» (ОАО «ОС и ВТ») г. Минск, Беларусь

E-mail: os_vt@mail.belpak.by

Аннотация: В статье приведено описание станка с ЧПУ для алмазного шлифования плоских и сферических оптических деталей диаметром от 80 мм до 350 мм, позволяющего за одну установку выполнить девять заготовительных операций. Станок разработан и изготовлен Открытым акционерным обществом «Оптическое станкостроение и вакуумная техника» Республики Беларусь.

Ключевые слова: *станок, оптические заготовки, кругление, сферошлифование, сверление, огабаричивание, нанесение фасок.*

Оптические детали диаметром до 350 мм широко используются в различных оптико-механических и оптико-электронных приборах. Открытым акционерным обществом «Оптическое станкостроение и вакуумная техника» разработан и изготовлен заготовительный станок модели АСШ-350, представленный на рисунке 1, который, за одну установку оптической заготовки диаметром от 80 мм до 350 мм, обеспечивает выполнение девяти операций:

- огабаричивание по высоте;
- огабаричивание по диаметру;
- сферошлифование рабочей поверхности;
- нанесение конструкционных фасок;
- нанесение технологических фасок;
- сверление центрального отверстия;
- расшлифовка центрального отверстия;
- фрезерование пазов;
- центрирование оптической детали.

Переход с выполнения одной операции на другую осуществляется за счет автоматической переналадки станка и, в случае необходимости, замены одного алмазного инструмента на другой. Переналадка занимать не более 3-4 минут и выполняет её оператор, обслуживающий станок.

В состав станка входят следующие основные узлы и вспомогательные механизмы:

- станина;
- колонна;

- привод вращения шпинделя инструмента;

- привод вращения шпинделя изделия;

- привод вертикального перемещения бабки изделия;

- привод продольного перемещения бабки шлифовальной от соосного расположения шпинделей;

 привод разворота бабки шлифовальной на заданный угол относительно вертикали;

- питатель СОЖ;
- защитное ограждение рабочей зоны;

- электрошкаф и пульт управления.

Компоновка станка – вертикальная. Оси вращения шпинделя изделия и шпинделя инструмента расположены вертикально. Исходное положение осей – соосное.

Конструкция станка обеспечивает:

- надёжное крепление инструмента в шпинделе инструмента;

 надёжное крепление заготовок на наклеечном приспособлении;

- вращение шпинделя инструмента с бесступенчатым регулированием частоты вращения;

- вращение шпинделя изделия с бесступенчатым регулированием частоты вращения;

- настроечный разворот и позиционирование на заданный угол α бабки шлифовальной (координата X);

- перемещение и позиционирование бабки шлифовальной с бесступенчатым регулированием скорости перемещения (координата У);



Рисунок 1. Станок модели АСШ-350

- перемещение и позиционирование бабки изделия в вертикальной плоскости с бесступенчатым регулированием скорости перемещения (координата Z);

- защиту узлов станка и пространство перед станком от брызг СОЖ, а также других предметов (при аварийной ситуации);

- подачу СОЖ от питателя непрерывно на наружную и (или) внутреннюю часть режущей кромки алмазного инструмента с индивидуальным регулированием по расходу;

 отсос аэрозолей СОЖ из зоны обработки и очистка её от мелкодисперсных частиц стекла;

- охлаждение электрошпинделя инструмента до температуры не выше 60° С.

Система управления станком построена на базе компьютерного оборудования и комплектации корпорации FAGOR.

Станок оснащён промышленным компьютером, современными сервоприводами, считывающими линейками, что позволяет все операции по переналадке станка выполнять без участия наладчика. Вместо квалифицированного наладчика и оптика станок может обслуживать оператор.

Широкий диапазон частот вращении шпинделя инструмента и шпинделя изделия, а также линейных скоростей перемещения рабочих органов станка позволяют технологу задавать оптимальные режимы обработки для любой конструкции обрабатываемой детали из широкой номенклатуры оптических стекол и кристаллов.

Встроенная в конструкцию станка система отсоса и очистки аэрозоли от мелкодисперсных экологически опасных частиц, образующейся в процессе алмазной обработки стекла, обеспечивает экологическую защиту окружающей среды. Показатели основных параметров станка представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры станка

Наименование показателя	Величина показателя
1. Величина перемещения бабки изделия в вертикальной плоскости, мм	от 0 до 175
2. Величина перемещения бабки шлифовальной от соосного расположения шпинделей, мм	от + 250 до - 85
3. Угол установочного наклона бабки шлифовальной от вертикального положения (в сторону большего перемещения), угловой градус	от 0 до 47
4. Скорость перемещения бабки изделия и бабки шлифовальной, м/с (мм/мин)	от 1,6610 ⁻⁷ до 30·10 ⁻³ (от 0,01 до 1800)
5. Частота вращения шпинделя инструмента, с ⁻¹ (об/мин)	от 33 до 100 (от 2000 до 6000)
6. Частота вращения шпинделя изделия, с ⁻¹ (об/мин)	от 0,33 до 3,3 (от 20 до 200)
7. Радиальное перемещение шпинделей изделия и инструмента при нагружающей силе 250 H, мм, не более	0,05
8. Осевое перемещение шпинделей изделия и инструмента при нагружающей силе 500 H, мм, не более	0,07
9. Вместимость рабочего бака питателя СОЖ, л, не менее	65
10. Объёмный расход СОЖ, л/мин, не менее	10

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ПРОМЫВКИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПЕРЕД НАНЕСЕНИЕМ ПОКРЫТИЙ В ВАКУУМЕ

ВАЛЕЙСКИЙ Д.В., ДОРОШКЕВИЧ А.Г., КАСИНСКИЙ Н.К., КРАСОВСКИЙ С.Н., МЕЛЬНИКОВ А.А., НАКОНЕЧНЫЙ В.П., ШУШКАНОВА Т.Г.

Открытое акционерное общество «Оптическое станкостроение и вакуумная техника» (ОАО «ОС и ВТ») г. Минск, Беларусь

E-mail: os_vt@mail.belpak.by

Аннотация: В статье приведено описание автоматизированного комплекса промывки АКП-3 для финишной промывки крупногабаритных оптических деталей из кварцевого стекла перед нанесением покрытий в вакууме. Приведены технические характеристики комплекса.

Ключевые слова: Комплекс промывки, водоподготовка, циркуляция-фильтрация, рейтинг фильтрации, кассета, кассетоноситель, автооператор, фильтромодуль, ламинарный поток, ультразвуковой генератор, система управления.

Открытое акционерное общество «Оптическое станкостроение и вакуумная техника» специализируется на разработке и изготовлении оптического оборудования

За последние пятнадцать лет сотрудниками акционерного общества разработано 23 модели современного оборудования. Управление этим оборудо-ванием в основном осуществляется промышленными компьютерами или программируемыми контроллерами. Автоматизированный комплекс про-мывки АКП-3 (далее комплекс) является представителем нового поколе-ния оборудования. Он объединил в своей конструкции лучшие решения, используемые в серийных установках промывки моделей КП-1, КП-2, комплексе РТКП-1 и других, а также ряд принципиально новых. Комплекс предназначен для финишной промывки оптических деталей из кварцевого стекла с максимальным размером 760х440х80 мм с использованием водных моющих растворов перед нанесением покрытий в вакууме.

Комплекс состоит из:

- установки промывки;

- станции водоподготовки;

- установок циркуляции - фильтрации для каждой промывочной ванны;

- узла фильтрации воздуха.

В состав установки промывки входят:

- четыре промывочные ванны и ванна сушки;

- автооператор;

- кассетоноситель и кассета;

- стол загрузки (камера нагрева) и стол выгрузки кассетоносителя с кассетой и деталью (далее кассетоноситель);

 ограждение защитное рабочей зоны установки;

- электрошкаф;

- пульт управления.

Ванны, столы загрузки и выгрузки смонтированы в едином каркасе. Четыре первые ванны установки предназначены для промывки детали в моющих растворах и в воде. Каждая из ванн имеет переливное отверстие для слива жидкости в соответствующий узел циркуляциифильтрации и распределительные карманы с патрубками для подачи очищенной жидко-сти обратно в ванны. Ванны имеют бортовые отсосы для удаления паров моющих растворов и воды, снабжены датчиками уровня. В днищах ванн имеются сливные патрубки со штуцерами.

Как правило, процесс промывки интенсифицируется:

- нагревом растворов и воды в ваннах;

- наложением УЗ колебаний на моющие растворы;

- возвратно-поступательным перемещением кассетоносителя в ваннах в вертикальной плоскости, поэтому на внешней стороне днищ ванн установлены электронагревательные элементы, а ванны снабжены датчиками температуры. Все ванны имеют термоизоляцию.



Рисунок 1. Автоматизированный комплекс промывки АКП-3

Первая и третья ванны оснащены ультразвуковыми (УЗ) излучателями с пьезокерамическими преобразователями, которые смонтированы на внешних боковых стенках ванн. УЗ генераторы обеспечивают в ваннах частоту УЗ колебаний 40 кГц. Мощность УЗ генераторов регулируется.

Четвертая ванна имеет устройство медленного подъема кассетоносителя из ванны с целью полного удаления воды с поверхности детали.

Промываемая деталь устанавливается в кассету. Кассета с деталью помещается в кассетоноситель. Кассетоноситель имеет ролики для удобства загрузки и выгрузки его в установку. Кассетоноситель вручную устанавливается на стол загрузки, который одновременно является и камерой нагрева. Деталь прогревается до температуры моющих растворов с целью исключения ее повреждения из-за резких температурных перепадов при переносе ее из помещения в ванны с моющим раствором. Нагрев детали осуществляется инфракрасными (ИК) излучателями. Контроль температуры осуществляется датчиками, установленными в корпусе излучателей. Камера термоизолирована.

Перенос кассетоносителя со стола загрузки в ванны и на стол выгрузки осуществляет автооператор в автоматическом режиме согласно заданной программе. Автооператор обеспечивает надежный захват кассетоносителя, плавное поднятие со стола загрузки и из ванн, перемещение и опускание его на захватывающие устройства механизма качания в ваннах и на стол выгрузки. Положение кассетоносителя на каждой позиции фиксируется датчиками положения. Для эффективного удаления загрязнений с поверхности детали используется механизм качания, с помощью которого кассетоноситель совершает возвратно - поступательные движения в вертикальной плоскости.

После промывки в четырех ваннах деталь переносится в ванну сушки, где с ее поверхности полностью удаляются остатки влаги. В ванне установлены ИК излучатели. Контроль температуры осуществляется датчиками, установленными в корпусе излучателей. Ванна термоизолирована.

Стол выгрузки является последней позицией в процессе промывки детали. Выгрузка кассетоносителя со стола выгрузки производится вручную или с помощью подручных средств.

Качество промывки детали, помимо интенсификации процесса, достигается, в том числе, и за счет использования специально подготовленной воды.

Станция водоподготовки обеспечивает необходимые параметры воды по химическому составу и по размерам примесей. Водопроводная вода проходит через ряд фильтров – фильтр грубой очистки, фильтр умягчитель и фильтры тонкой очистки. После фильтров тонкой очистки вода подается во вторую ванну.

Вода для первой и третьей ванн дополнительно очищается, проходя через мембрану обратного осмоса, блок деионизации на смешанных смолах, установку обеззараживания, через дополнительный фильтр тонкой очистки и используется для приготовления моющих растворов. Вода для четвертой ванны дополнительно проходит через стерилизующий фильтр и капсюльный фильтр 0,2 мкм.

Установки циркуляции – фильтрации ванн предназначены для поддержания заданной степени чистоты растворов и воды в ваннах за счет использования фильтров с заданным рейтингом фильтрации, а также для экономии воды за счет ее повторного использования. Основными составляющими установок циркуляции – фильтрации являются: циркуляционные насосы, накопительные емкости, фильтры, трубопроводы, манометры.

Установка циркуляции – фильтрации для четвертой ванны содержит дополнительный фильтр, обеспечивающий более тонкую очистку, смешан-ный ионообменник и ультрафиолетовую лампу. Температура жидкостей в промывочных ваннах может устанавливаться от 30 до 70°С, поэтому корпуса фильтров, насосы и трубопроводы ком-плекса изготовлены из термостойкого пластика или из нержавеющей стали

Узел фильтрации воздуха предназначен для предотвращения попадания загрязнений и пыли в финишную зону очистки и создания ламинарного потока очищенного воздуха. Узел фильтрации состоит из четырех серийных фильтромодулей, соединенных в единую систему и расположен на верхней части каркаса над промывочными ваннами, ванной сушки и столом выгрузки. Класс чистоты воздуха, подаваемого в рабочую зону установки, обеспечивается за счет его принудительной циркуляции через фильтр грубой очистки и НЕРА фильтр. Ламинарный поток воздуха создается при прохождении его через ламинарную пленку, установленную в каждом фильтромодуле.

Ограждение защитное установки промывки обеспечивает безопасность работы установки, исключение попадания загрязнений и пыли в рабочую зону промывки детали. Каркас установки собран из алюминиевого профиля. Ванны, столешницы, столы загрузки и выгрузки, обшивка каркаса и другие детали, соприкасающиеся прямо или косвенно с моющими жидкостями, изготовлены из нержавеющей стали.

Установка в верхней и нижней части по периметру наглухо закрыта щитами и съемными крышками, в средней части установлены раздвижные стекла для визуального наблюдения за работой автооператора. На позициях загрузки и выгрузки кассетоносителя имеются раздвижные двери.

Система управления комплексом и УЗ генераторы смонтированы в электрошкафу.

Система управления выполнена на основе универсального промышленного программируемого контроллера серии NJ, в котором сочетаются функции логического управления и управление движением.

Основные технические характеристики комплекса АКП-3 приведены в таблице 1.

Разработанный автоматизированный комплекс промывки поставлен на оптическое производство ФГУП «НИИ НПО «Луч».

N⁰	Национарания намаратана	Величина
п/п	паименование показателя	показателей
1	Максимальный размер очищаемых оптических деталей, мм	760x440x80
2	Количество ванн-позиций в установке, шт., из них:	5
	 ультразвуковых (для моющих растворов) 	2
	- для проточной воды	2
	- для сушки	1
3	Вместимость одной ванны, л, не менее	210
4	Диапазон регулирования температуры в ваннах, °С:	от 30 до 70
	Диапазон регулирования температуры воздуха	
5	- в камере нагрева ОД на столе загрузки, °С	от 30 до 70
	- в ванне сушки, °С	от 30 до 70
6	Мощность ультразвукового генератора, кВт, не менее	1,0
	с регулировкой	от 10 до 100%
7	Количество УЗ генераторов на одну ванну, шт.	2
	Рейтинг фильтрации от механических примесей:	
 моющих растворов, мк воды очищенной без механических примесей, мк воды деионизованной, мк 	- моющих растворов, мк	1
	- воды очищенной без механических примесей, мк	0,5
	- воды деионизованной, мк	0,2
9	Степень фильтрации воздуха:	
	- в зоне над ваннами и столом выгрузки - согласно классу чистоты	5150
	помещения по ГОСТ Р ИСО 14644-1-2000	5150
10	Габаритные размеры ванны (внутренние), мм, ДхШхВ	950x300x780
	Габаритные размеры установки промывки , мм, ДхШхВ	5070x2285x3080
	Габаритные размеры установки водоподготовки, мм, ДхШхВ	800x1400x1800
	Габаритные размеры установки циркуляции - фильтрации, мм, ДхШхВ	870x660x750

Таблица 1. Основные технические характеристики комплекса АКП-3

КОНТУРНО-ШЛИФОВАЛЬНЫЙ СТАНОК МОДЕЛИ «ПРИЗМА 150» ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРИЗМ С РАЗМЕРОМ ГРАНИ до 150 мм ИЗ ОПТИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК С ОПИСАННЫМ ДИАМЕТРОМ СЕЧЕНИЯ до 215 мм И ВЫСОТОЙ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ЗАГОТОВОК до 250 мм

ВАЛЕЙСКИЙ Д.В., ДОРОШКЕВИЧ А.Г., ДЕМИДОВИЧ Т.И., КАСИНСКИЙ Н.К., КРАСОВСКИЙ С.Н., МИТКЕВИЧ И.Н., ШУШКАНОВА Т.Г.

Открытое акционерное общество «Оптическое станкостроение и вакуумная техника» (ОАО «ОС и ВТ») г. Минск, Беларусь

E-mail: os_vt@mail.belpak.by

Аннотация: В статье приведено описание станка модели «Призма 150» для изготовления призм с размером грани до 150 мм из оптических заготовок с описанным диаметром сечения до 215 мм и высотой обрабатываемых заготовок до 250 мм. Приведены технические характеристики комплекса.

Станок разработан и изготовлен ОАО «ОС и ВТ», г. Минск, Республика Беларусь.

Ключевые слова: *станок, призма, грань, описанный диаметр, предварительное шлифование, тонкое шлифование.*

Расширение номенклатуры производимых оптических деталей, как в массовом, так и в серийном производстве, требует создания специального технологического оборудования для их производства. К таким деталям относятся и призмы, изготовление которых на операциях шлифования и полирования является весьма трудоемким процессом.

Станки для производства призм не разрабатывались и не производились. Из-за отсутствия специализированного оборудования изготовление призм из оптических материалов выполняется на шлифовально-обдирочных, или плоскошлифовальных станках. Как следствие, требуются большие временные и финансовые затраты, что обусловлено:

- необходимостью производить многократное блокирование и разблокирование заготовок для обработки каждой грани;

- необходимостью изготовления специализированной технологической оснастки под каждый типоразмер призмы и для каждой грани этого типоразмера, что влечет за собой увеличение расхода вспомогательных материалов (материалов для изготовления наклеечников, наклеечных смол, СОЖ и др.). Кроме того, необходимо производить переналадку станка и смену инструмента при переходе с одной операции на другую, а работа на механизированном оборудовании требует постоянного отслеживания оптиком процесса обработки.

ОАО «ОС и ВТ» разработан станок модели «Призма 150» для предварительного и тонкого шлифования заготовок призм, что позволяет автоматизировать операцию шлифования заготовок призм из оптического стекла с размером грани от 20 мм до 150 мм.

Станок состоит из:

- станины;
- бабки шлифовальной со шпинделем инструмента;
- стола;
- привода вращения шпинделя инструмента;
- привода поворота стола на заданный угол;

- привода продольного перемещения шпинделя инструмента в горизонтальной плоскости;

 привода поперечного перемещения шпинделя инструмента в горизонтальной плоскости;

- питателя СОЖ;

- ограждения защитного рабочей зоны;
- электрошкафа и пульта управления.

Компоновка станка – горизонтальная.

Бабка шлифовальная со шпинделем инструмента перемещается в поперечном и продольном направлениях по рельсовым направляющим с бесступенчатым регулированием скорости перемещения. Комбинированный абразивный инструмент надежно крепится в шпинделе инструмента и обеспечивает выполнение двух операций: предварительное шлифование и тонкое шлифование. Один из инструментов является подвижным. Выдвижение и отвод инструмента осуществляется с помощью пневмокамеры.

Шпиндель инструмента расположен горизонтально, то есть перпендикулярно обрабатываемой грани призмы. Шпиндель инструмента вращается с бесступенчатым регулированием частоты вращения.

Стол с элементами крепления заготовки имеет шпиндель, на конце которого закреплена насадка. На насадку устанавливается заготовка или несколько заготовок, скреплённых вертикально, для обработки их групповым методом в один размер.

Заготовка (группа заготовок) сверху прижимается пневматическим механизмом прижима заготовки, который имеет возможность регулировки по высоте. Стол имеет настроечный поворот и позиционирование на заданный угол.

Бабка шлифовальная со шпинделем инструмента и стол с элементами крепления заготовки имеют защитное ограждение, которое препятствует попаданию стекольного шлама на детали станка, тем самым продлевая их срок службы.

Защитное ограждение рабочей зоны станка оборудовано смотровым окном с автоматически открывающейся и закрывающейся шторкой. Станок имеет блокировку, при которой автоматическое включение цикла работы возможно только при закрытой шторке.

В процессе работы СОЖ непрерывно подается от питателя на наружную режущую кромку алмазного инструмента с индивидуальным регулированием по расходу.

Очистка СОЖ от стекольного шлама осуществляется методом центрифугирования.

Станок имеет отсос аэрозолей СОЖ из зоны

обработки и очистку её от мелкодисперсных частиц, что обеспечивает защиту окружающей среды.

Станок оснащен промышленным компьютером, сервоприводами, датчиками.

Система управления (СУ) обеспечивает управление по программе в соответствии с технологическими операциями. Станок работает в режиме «Наладка» и в режиме «Автомат».

В режиме «Наладка» оператор устанавливает угол поворота стола таким образом, чтобы первая предполагаемая грань заготовки была расположена по нормали к оси вращения инструмента, определяет и указывает в пользовательском окне координаты точки касания инструмента и грани заготовки и необходимый съем стекла при обработке грани заготовки. Указываются также параметры предварительного и тонкого шлифования, угол (углы) поворота стола для обработки граней призмы.

В режиме «Автомат» при закрытой шторке, включении подачи СОЖ и отсоса аэрозоли происходит предварительное шлифование грани заготовки призмы на заданную величину съема стекла и при заданной скорости врезания. По окончании процесса предварительного шлифования и выхаживания в течение заданного времени происходит смена инструмента для предварительного шлифования на инструмент для тонкого шлифования. По окончании процесса тонкого шлифования при заданной скорости врезания на заданную величину съема стекла и выхаживания в течение заданного времени инструмент отводится в исходное положение, а стол с заготовкой (или группой заготовок) поворачивается на заданный угол. Процесс обработки повторяется для следующей грани. По окончании обработки всех граней инструмент отводится в исходное положении, отключаются подача СОЖ, отсос аэрозоли, вращение инструмента. Шторка открывается

Таким образом, станок модели «Призма 150» обеспечивает:

- групповую обработку призм;

- обработку в автоматическом режиме всех граней призм за её одну установку;

- быструю переналадку с одного типа размера заготовки на другой типоразмер;

 выполнение операций предварительного и тонкого шлифования одним комбинированным инструментом;

- бесступенчатое регулирование перемещения исполнительных механизмов и при этом обеспечивает безопасные условия труда за счет удаления из зоны обработки аэрозоли и очистки её от мелкодисперсных частиц.

Внедрение станка модели «Призма 150» сможет удовлетворить заявки потенциальных потребителей на оборудование для групповой обработки всех граней призм за одну установку на операциях предварительного и тонкого шлифования комбинированным алмазным инструментом, что позволит предприятиям:

- снизить трудоемкость при изготовлении призм;

- использовать труд операторов вместо оптиков высокой квалификации;

- снизить затраты на производственные площади, электроэнергию, обслуживание станков;

- сократить труд вспомогательного персонала.

Технические характеристики станка приведены в таблице 1.

Наименование показателя	Величина показателя	
Максимальная высота одновременно обрабатываемых заготовок, мм	250	
Наибольший описанный диаметр сечения заготовки, мм	215	
Наибольший размер грани, мм	150	
Инструмент комбинированный, состоящий из двух алмазных колец		
с различной зернистостью для выполнения предварительного и		
тонкого шлифования		
Диаметр алмазного кольца для тонкого шлифования, мм	200	
Диаметр алмазного кольца для предварительного шлифования, мм	176	
Величина перемещения алмазного кольцевого инструмента для		
предварительного шлифования относительно алмазного кольцевого	10	
инструмента для тонкого шлифования в комбинированном		
инструменте, мм		
Величина продольного перемещения шпинделя инструмента (рабочий ход) в горизонтальной плоскости, мм	450	
Величина поперечного перемещения шпинделя инструмента	110	
(подача инструмента в зону съёма) в горизонтальной плоскости, мм	110	
Поворот стола с группой заготовок, градус (угловой)	от 0 до 360	
$H_{compare product of the second $	от 16 до 100	
частота вращения шпинделя инструмента, с (00/мин)	(от 1000 до 6000)	
Диаметр посадочной поверхности стола, мм	60	
Дискретность задания перемещения инструмента, мм	0,001; 0,01; 0,1; 1; 10	
Дискретность задания угла поворота стола, градусов (угловых)	0,001; 0,01; 0,1; 1, 10	
Масса станка, кг, не более:	1 500	

Таблица 1.

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СВЕТОВОДА ДЛЯ УСТРОЙСТВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

БОБЕ А.С.

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

E-mail: alexandrabobe@gmail.com

Аннотация: В статье рассмотрен технологический процесс изготовления световода с нанесенными на его поверхность голографическими дифракционными решетками. Подобная деталь может применяться в системах дополненной реальности, в которых необходимая информация накладывается на изображение реальной сцены. Приведены требования к показателям качества материала и изготовления детали. Описана методика контроля рабочих параметров полученной детали (размеров выходного зрачка, рабочего углового поля зрения и разрешающей способности).

Ключевые слова: голограммный оптический элемент, технологический процесс, световод, дифракционные решетки, разрешающая способность.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время получили активное развитие голографические изображающие устройства и дисплеи, позволяющие представлять информацию в виде визуальных образов, наложенных на объекты реального мира в режиме реального времени. Такие системы находят широкое применение в различных сферах: в военной технике (индикация на лобовом стекле самолетов или на шлеме пилота), медицинской технике, мобильных технологиях (приложениях для мобильных устройств и очках дополненной реальности). На данный момент разработано множество технических решений, использующихся, например, в устройствах компаний Google, Sony и Microsoft. Названные системы разработаны по различным схемам, и в них используются разные способы передачи информации пользователю: системы призм и зеркал, светоделители, free-form поверхности [1], световоды [2-3]. Для изображающих систем в устройствах дополненной реальности основными оптическими характеристиками являются размер выходного зрачка и рабочее угловое поле зрения.

Однако увеличение этих параметров приводит к увеличению размеров самих устройств. В настоящее время одной из самых перспективных технологий является использование голографических световодов, которые позволяют увеличить выходной зрачок без значительного увеличения габаритов оптической системы [2-3].

В работе рассмотрен световод, на который нанесены три голографические дифракционные решетки (рис. 1). Принцип его действия основан на распространении излучения внутри пластинки под углом, большим угла полного внутреннего отражения (ПВО).



Рисунок 1. Голографический оптический элемент

Излучение (изображение с дисплея) вводится в световод через дифракционную решетку 1, преломляется и распространяется к дифракционной решетке 2 под углом большим угла ПВО.

Вторая решетка увеличивает область распространения излучения по одной из осей. Так как штрихи второй решётки нанесены под углом 45° к штрихам первой решётки [2], излучение направляется к дифракционной решетке 3, увеличивающей по второй оси область распространения излучения, которое затем выводится из пластинки. В результате, световод увеличивает изображение в k раз, где k - отношение размеров 3-й и 1-й решетки по каждой из осей.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛИ

Проведенный анализ существующих оптических сред для создания световодов показал, что в качестве материала подложки возможно использовать любую марку бесцветного оптического стекла. В рассмотренном в статье варианте используется стекло К8. Показатели качества материала и изготовления детали приведены в табл.1.

Так как принцип действия световода основан на распространении излучения внутри стекла, вследствие большой длины хода лучей, высокие требования предъявляются к пузырности и однородности [4]. Для показателя однородности требуется категория 2, т.е. отношение ϕ/ϕ_0 должно быть не более 1.0, где ϕ – угол разрешения детали, ϕ_0 – теоретический предел разрешения. Пузыри в материале приводят к рассеянию света и искажению изображения.

Δn_e	3A
$\Delta(n'_F - n'_C)$	3B
Однородн.	2
Дв. Лучепрел.	3
Ослабл.	3
Бессвильн.	1Б
Пузырн.	2Б
Ν	2
ΔΝ	0.2
PI	II
P _{II}	IV

Таблица	1
---------	---

Диаметр наибольшего пузыря в заготовке не должен превышать 0,1 мм.

На требования по двойному лучепреломлению и бессвильности, которые характеризуют стабильность значения показателя преломления, назначают такие же категории, как и на показатель преломления. Ошибки и дефекты поверхности могут привести к неравномерности нанесения фоторезистивного материала и ухудшению качества получаемого изображения. Так как толщина слоя фоторезиста задается в пределах 0.5 - 1.0 мкм, допуски к форме N, Δ N и классу оптической чистоты P в световой зоне задаются достаточно жесткие (N=2, Δ N=0.2 P=II).

На основании приведенных выше требований составляется технологический процесс изготовления и контроля оптической детали. Заготовка рассчитывается в виде прямоугольной плитки стекла, из которой выпиливаются 4 детали. Размеры рассчитываются с учетом припуска на операции технологического процесса [5].

Технологический процесс изготовления детали состоит из получения плоскопараллельной пластинки (подложки) с заданными параметрами и записи голографических решеток.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОДЛОЖКИ

Распил заготовки производится на отрезном станке. Грубое шлифование поверхностей необходимо для удаления основной части припуска на механическую обработку и получения заданной формы детали. Тонкое шлифование производится для придания детали окончательных размеров и достижения необходимой шероховатости нерабочих граней. Операция полирования предназначена для уменьшения микронеровностей, оставшихся после шлифования и получения заданных параметров исполнительных поверхностей (R_z=0.05, N=2, Δ N=0.2).

После проведения формообразующих операций и подготовки подложки световода следуют этапы получения дифракционных решеток на ее поверхности. Особенности этапов описаны ниже.



Рисунок 3. Центрифуга Delta-80

ПОЛУЧЕНИЕ ГОЛОГРАММ

Для записи дифракционной решетки используется фоточувствительный материал – фоторезист, который наносится на подложку. В этом технологическом процессе используется позитивный фоторезист Shipley S-1811. Слой фоторезиста наносят на подложки в обеспыленной среде методом центрифугирования (рис. 3).

Пластина 2 устанавливается на столике 3 центрифуги и удерживается на нем вакуумным присосом. Фоторезист подается капельницейдозатором 1. Когда столик приводится во вращение, фоторезист растекается тонким слоем



MICROPOSIT S1800 PHOTO RESIST UNDYED SERIES

Рисунок 4. Зависимость толщины пленки от типа фоторезиста и частоты вращения столика центрифуги

по поверхности подложки, а его излишки сбрасываются с нее и стекают по кожуху 4. Толщина нанесенного слоя зависит от вязкости п фоторезиста и частоты вращения столика центрифуги ω (рис 4).

Нанесение фоторезиста осуществляется в помещении при неактиничном освещении.

Затем проводится этап экспонирования, т.е. процесс облучения светочувствительного материала. Экспонирование происходит под действием двух плоских волновых фронтов, интерферирующих на поверхности фоторезиста. Интерференционная картина пучков - параллельные полосы, которые образуют дифракционную решетку с периодом 0.48 мкм для 1 и 3 решетки, 0.3 мкм для 2 решетки [2,3,6]. Для получения таких решеток в слое фоторезиста использеутся газовый гелий-кадмиевый лазер с длиной волны 441.6 нм. Углы схемы получения при данных параметрах равняются 56° и 84° соответственно. При этом решетка для ввода излучения должна обладать максимальной дифракционной эффективностью для уменьшения потерь излучения на вводе в световод, а промежуточная и выводная решетки должны обладать переменной дифракционной эффективностью для обеспечения равномерной яркости изображения в пределах области выходного зрачка.

Для изготовления таких решеток используется схема, описанная в работе [6], где реализуется позонная запись. В данной схеме различная дифракционная эффективность обеспечивается изменением экспозиции в каждой зоне, на которые по всей длине разбивается решетка.

Используя специально разработанное программное обеспечение по управлению затвором лазера и двухкоординатной системой перемещения детали, возможно вести запись с требуемым распределением экспозиций по зонам.

Формула для определения дифракционной эффективности решетки в каждой зоне п. имеет вид:

$$\eta_i = \frac{\eta_1}{1 - (i - 1)\eta_1},\tag{1}$$

где і - номер зоны, η_1 - дифракционная эффективность первой зоны [2,6].

Проявление заключается в удалении экспонированных областей, в результате чего на поверхности подложки остается фоторезистивная маска требуемой конфигурации.

СХЕМА КОНТРОЛЯ

В ходе работы была разработана методика контроля основных рабочих параметров световода: размеров выходного зрачка, рабочего углового поля зрения 2ω, разрешающей способности. Разрешающая способность световода определяется по критерию Фуко. Используется тест-объект (мира Фуко), расположенный в фокусе коллиматора. Мира состоит из чернобелых штрихов разной толщины (рис. 5). Поскольку разрешающая способность оптической системы может зависеть от направления штрихов, в мире Фуко линии располагаются по четырем разным направлениям.



Рисунок 5. Штриховая мира

Все измерения проводятся на стенде, представленном на рис. 6.

Компоненты установки крепятся на направляющую 5 при помощи зажимов. Излучение от лазерного модуля 9, закрепленного в оправе на стойке 8, проходит через коллиматор 7. Коллиматор состоит из двух объективов с совмещенным фокусным расстоянием, в фокусе находится мира с нанесенными штрихами. Коллиматор закреплен в двух центрирующих кольцах 6. На выходе коллиматора параллельный пучок лучей проходит на входную дифрак-



Схема стенда

ционную решетку (входной зрачок) световода.

При помощи зажима пластинка крепится на стойку 3, которая привинчивается к платформе линейного транслятора 12, перемещающегося перпендикулярно направляющей 5.

Напротив выходного зрачка находится цифровая камера 2, которая регистрирует выходное излучение. Камера установлена на сборную систему из 3-х линейных трансляторов 1, которые обеспечивают перемещение камеры вдоль трех осей при помощи микрометрических винтов и вращение камеры вокруг вертикальной оси. Движение платформ трансляторов может осуществляется как вручную, так и автоматизировано. Компоненты юстируются по высоте при помощи стоек. Позиционирование компонентов вдоль оси х на нужные расстояния осуществляется зажимами, свободно перемещающимися вдоль направляющей.

На стенде возможно измерить все основные выходные характеристики полученного элемента. Размеры выходного зрачка определяются максимальным смещением камеры вдоль оси, при котором еще наблюдается изображение миры, расположенной в фокальной плоскости. Поле зрения вычисляется аналогично, как предельный угол поворота камеры. Отсчеты снимаются при помощи шкал на ведущих винтах платформ трансляторов. Разрешающая способность определяется как максимальная пространственная частота миры, в изображении которого еще различимы штрихи. Для предоставленных выше технологических операций и выбранной оптической среды минимально различимым является элемент 21 миры №4 (разрешение 20 штрихов на мм)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен технологический процесс изготовления подложки световода и нанесения голографических дифракционных решеток. При этом, обеспечиваются все показатели качества, необходимые для оптимальной работы детали в составе изображающих устройств. Разработана методика контроля рабочих параметров световода: размеров выходного зрачка, углового поля зрения и разрешающей способности по мире №4.

Список литературы:

1. *Bernard Kress*. «Diffractive and holographic optics as combiners in Head Mounted Displays»

2. Leon Eisen, Michael Meyklyar, Michael Golub, Asher A. Friesem, Ioseph Gurwich, and Victor Weiss. «Planar configuration for image projection»

3. *Ioseph Gurwicha, Victor Weissa, Leon Eisenb, Michael Meyklyarb and Asher. A. Friesemb.* «Design and experiments of planar optical light guides for virtual image displays; The Weizmann Institute of Science, Physics of Complex Systems, Rehovot

4. Быков Б.З., Перов В.А. «Оформление рабочих чертежей оптических деталей и выбор допусков на оптические детали.» Учебное пособие, МГТУ, 2003.

5. *Окатов М.А.* "Справочник технолога-оптика». СПб: Политехника, 2004.

6. Одиноков С.Б., Маркин В.В., Лушников Д.С., Кузнецов А.С., Соломашенко А.Б., Дроздова Е.А. «Оптическая схема получения голографического индикатора для отображения знаково-символьной информации».

7. Ефремов А.А., Сальников Ю.В. «Изготовление и контроль оптических деталей.» М. Высшая школа, 1983.

Замечание

В журнале «Контенант» №3 за 2018 год в статье «Статистические аспекты принятия решений при распознавании цели по нескольким спектральным каналам» указан один из авторов Калинин А.В. Следует читать Калинин А.М.