

КОНТЕНАНТ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 13, № 4, 2014

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

СОДЕРЖАНИЕ

| Памяти А.И.Гоева | 3 |
|---|----|
| НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПТИКЕ | |
| Сеник Б.Н. Оптико- электронные -электронные комплексы наземного и космического базирования | 6 |
| Барышников Н.В., Животовский И.В., Денисов Д.Г., Гладышева Я.В., Абдулкадыров М.А, Патрикеев В.Е. Исследование алгоритма восстановления профиля оптической поверхности методом двух плоскостей | 7 |
| Немтинов В.Б., Сериков В.Ю. Структурно-графовая методология в задачах анализа и синтеза оптико-электронных систем | 12 |
| РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ | |
| Тарасов А.П., Архипов С.А., Донцов Г.А. Космическая аппаратура ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева». Опыт создания и перспективы развития | 27 |
| Насыров А.Р., Штейнфельд В.О., Муслимов Э.Р., Персев И.В., Щербаков М.А. Разработка оптических блоков гиперспектрометра для ближней ИК-области спектра | 41 |
| Бакланов А.И., Стратилатов Н.Р., Понин О.В., Клюшников М.В., Забиякин А.С., Афонин А.Н., Блинов В.Д., Шаров А.А. КШМСА – комплекс широкозахватной мультиспектральной съёмочной аппаратуры космического аппарата «Ресурс-П» | 47 |
| ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ | |
| Абдулкадыров М.А., Патрикеев В.Е., Семенов А.П. Метод определения профиля шлифованной асферической поверхности крупногабаритных астрономических зеркал | 54 |
| Семенов А.П., Абдулкадыров М.А., Белоусов С.П., Патрикеев В.Е., Придня В.В. Методы изготовления и контроля универсальных крупногабаритных астрономических и космиче- ских зеркал телескопов в ОАО ЛЗОС | 61 |



КОНТЕНАНТ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

СОДЕРЖАНИЕ

(продолжение)

| Кузнецова О.В., Азербаев А.А., Абдулкадыров М.А. Нанесение широкополосного просветляющего покрытия методом золь-геля на защитные стекла ламповых кассет лазерной установки УФЛ-2М | 74 |
|---|-----|
| Семенов А.П. Метод определения децентрировки асферической поверхности астрономического зеркала | 78 |
| Понин О.В., Шаров А.А., Домнин А.В., Галявов И.Р. Опыт производства крупногабаритных линзовых и зеркально-линзовых оптических систем для аппа- ратуры космического базирования и комплексов слежения | 87 |
| Абдулкадыров М.А., Патрикеев В.Е., Судариков И.Н., Шаров Ю.А. Интерференционный метод контроля оптических параметров и фокальных отрезков крупногабаритных линз | 93 |
| Аодулкадыров М.А., Азероаев А.А, Доориков Н.С., Куракина Е.В., Патрикеев В.Е., Семенов А.П., Судариков И.Н., Шаров Ю.А. Особенности изготовления крупногабаритных дисковых активных элементов лазеров и мощных высокоэнергетических усилителей из- лучения | 97 |
| ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ | |
| Фирсова Ю.А., Гулюкин М.Н., Могильная Л.Г., Игнатов А.Н. Особенности варки промышленных цветных оптических стекол, окрашенных наночастицами CdS·CdSe Игнатов А.Н., Поздняков А.Е., Суркова В.Ф., Евсеева Т.О., Кошков С.В. Создание малотоннажной технологии производ- ства высокотемпературного электровакуумного стекла марки С 48-3 | 101 |
| стекла марки С 40-5 | 100 |

ПАМЯТИ А.И. ГОЕВА



8 ноября 2014 года на 68-м году жизни после тяжелой и продолжительной болезни скончался Александр Иванович Гоев - с 1986 по 2006 годы генеральный директор производственного объединения, а затем открытого акционерного общества «Красногорский завод им. С.А. Зверева», почетный гражданин Красногорского муниципального района Московской области.

Александр Иванович родился в 1947 году в Славгороде Могилёвской области. По сути, он сделал себя сам. Рано остался без отца, и ему пришлось шагать по жизни одному, самостоятельно прокладывать себе дорогу. Трудовую деятельность начал в 1970 году после окончания с отличием Могилёвского машиностроительного института. На Загорском оптико-механическом заводе работал инженером-технологом, мастером, старшим инженером-технологом, начальником техбюро. Прошел все звенья технологического передела и за короткое время освоил специальность технолога.

Волевой, целеустремленный, решительный, интересный внешне, он пришелся в коллективе «ко двору». Его избрали секретарем комсомольской организации цеха и Александр Иванович умело совмещал общественную деятельность с работой технолога. В коллектив Александр Иванович влился стремительно, будто всю жизнь в нем работал. Он многому научился на ЗОМЗе.

В 1976 году решением Министерства оборонной промышленности А.И. Гоев направлен заместителем главного инженера в город Сморгонь Белорусской ССР на завод оптического станкостроения, где впоследствии стал заместителем директора по производству, затем – директором завода. Он уехал туда с немалым багажом знаний и практического опыта.

На Сморгонском заводе, будучи еще совсем молодым директором, Гоев уделял много времени работе с людьми, проводил тщательную кадровую политику, лично знакомился с каждым специалистом. В то же время он умел проявлять незаурядную настойчивость.

В 1986 году приказом Министра оборонной промышленности СССР в возрасте 39 лет Александр Иванович был назначен генеральным директором производственного объединения «Красногорский завод».

Обладая государственным умом, он всегда умел четко поставить сложнейшую задачу перед каждым представителем своей команды, специалистами и рабочими. Это позволяло гарантировать ее исполнение на самом высоком качественном уровне.

Ему всегда были нужны новейшие технологии, современные разработки, новые изделия, убедительные победы и перспективы.

Управление таким гигантом, как КМЗ, не могло всегда проходить гладко. Бывали сложные ситуации, возникали спорные вопросы. Александр Иванович принимал решения, внимательно выслушав все мнения. И если кто-то не мог доказать свою правоту, значит плохо подготавливал доказательства.

Особой его заслугой является сохранение в период формирования новых рыночных экономических отношений научно-технического, производственного и кадрового потенциала одного из ведущих предприятий ОПК страны - «Красногорского завода им. С.А. Зверева». Во время руководства Александра Ивановича завод стал акционерным обществом.

Доверие заводского коллектива своему директору наглядно было доказано итогами первых в истории КМЗ выборов руководителя предприятия в конце 1994 года. Отдавая голоса за кандидатуру А. Гоева, заводчане оценили его как технически эрудированного специалиста, талантливого организатора.

В этот период были возведены новые цеха, реконструирована часть действующих, организован целый ряд самостоятельных подразделений: «Зенит-спецтехни-ка», «Зенит-стройсервис», «Зенит-техсервис», внешнеторговая фирма «Зенит».

При непосредственном участии генерального директора освоены в производстве новые изделия по направлениям: приборы ночного видения, медицинская техника, лазерные микроанализаторы, система управления пассажирским лифтом, бинокулярные лупы. Успешно завершились работы по созданию комплекса контроля околоземного космического пространства.

Активный поиск свободных ниш на международном и внутреннем рынках, разработка новых направлений и видов деятельности, способных дать ощутимую прибыль, характеризует Александра Ивановича Гоева как руководителя современного склада.

В 1995 году он получил почетный Международный приз за коммерческий престиж Золотой «Факел Бирмингема». А с ним его получил и ОАО КМЗ. Что означает эта награда для завода? В первую очередь, международное признание, потому что «Факел Бирмингема», учрежденный Институтом международных финансов и экономического партнерства, Международной академией лидеров бизнеса, является весьма престижной наградой в деловых кругах бизнеса и предпринимательства.

В 2005 году он вошел в список ста наиболее выдающихся представителей российской промышленности (ТОП-100) по версии «Промышленного еженедельника».

Несмотря на напряженную работу в должности генерального директора, А.И. Гоев находил время заниматься научно-техническими исследованиями и разработками. Александр Иванович в 1987 году без отрыва от производства окончил Академию народного хозяйства СССР, в 1994 году, защитив диссертацию, стал кандидатом технических наук, а в 2003 году доктором технических наук.

А.И. Гоев был доцентом кафедры «Лазерные оптико-электронные приборы и системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, председателем государственной аттестационной комиссии МИРЭА, вице-президентом Международной академии «Контенант», членом Академии инженерных наук РФ, член-корреспондентом Российской академии ракетных и артиллерийских наук, академиком Международной Платоновской

академии наук и искусств по отделению высокоточных технологий, почетным академиком Академии космонавтики, членом ученого совета, заведующим кафедрой «Инновационные технологии» Академии развития персонала.

Александр Иванович является автором нескольких десятков научных работ, 8 изобретений, книг и учебных пособий. Научные знания и богатый производственный опыт Александра Ивановича были направлены на безусловное и качественное выполнение государственного оборонного заказа, сохранение и развитие материальной и производственной базы, создание устойчивого финансового положения предприятия.

Александра Ивановича Гоева отличало особое, бережное отношение к заводским кадрам. Несмотря на все трудности, испытываемые предприятием в период кардинальных перемен в политической и экономической жизни России, ни один человек от рабочего до руководителя высшего звена не был уволен по инициативе генерального директора. А ведь немало других руководителей предпочло в те годы решать проблемы нехватки средств за счет жесткой, если не сказать жестокой, кадровой политики.

«На улице» тогда оказались десятки тысяч высококвалифицированных рабочих, инженеров и ученых. Гоев, наоборот, коллектив берег, прекрасно понимая, что «разбазарить» имеющийся потенциал можно в одночасье, а вот на восстановление уйдут десятилетия. Предвидел, что рано или поздно необходимость в профессионалах обязательно появится и, как показало время, был абсолютно прав.

Насколько это вообще было возможно, Александр Иванович старался находить средства и для поддержания и развития социальной сферы. И в перестроечные времена заводские санатории-профилактории продолжали принимать работников с семьями на отдых и лечение, реконструировались общежития, оснащалось современным оборудованием медико-санитарное управление. В 1991 году был сдан в эксплуатацию новый физкультурно-оздоровительный комплекс, позже на его базе организован центр здоровья «Зенит-спортсервис».

И, конечно, ничто человеческое ему не было чуждо, он был такой же земной человек. Очень любил землю. Его садовый участок – был один из образцовых, славился богатым урожаем овощей, фруктов и прекрасными цветами. Работала там вся семья, и крепкая мужская рука чувствовалась не меньше заботливых женских рук.

Вся жизнь Александра Ивановича была посвящена развитию предприятий оптико-электронного приборостроения.

С мая 2006 года Александр Иванович Гоев был назначен постоянным членом Военно-промышленной комиссии при Правительстве Российской Федерации.

За свой беззаветный труд он был награжден орденами «Знак Почета», «За заслуги перед Отечеством» IV и III степеней, многочисленными государственными и ведомственными наградами, государственными премиями Российской Федерации и Белорусской ССР, званием Заслуженного машиностроителя Российской Федерации.

«Мы все — одна команда», — не раз говорил Александр Иванович. И то, что корабль под названием «Красногорский завод» выдержал все штормы девяностых и по-прежнему на плаву, — главная заслуга капитана, которым 20 трудных лет был А.И.Гоев.

Александр Иванович Гоев был похоронен 11 ноября 2014 года на Троекуровском кладбище г. Москвы.

Президиум академии «Контенант»

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ НАЗЕМНОГО И КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

25-26 сентября 2014 года на предприятии ОАО «ЛЗОС», г. Лыткарино, состоялась научно-практическая конференция «Оптико-электронные комплексы наземного и космического базирования», посвященная 75-летию предприятия.

Конференция организована общественной академией «Контенант» и ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла», активно поддержана холдингом «Швабе», ведущими оптическими предприятиями страны, профильными институтами РАН, университетами Министерства образования (МГТУ им. Н.Э. Баумана, МХТУ им. Д. И. Менделеева).

8 работе конференции приняли участие 162 участника, из них 2 члена-корреспондента РАН, 49 кандидатов и докторов наук, представители европейских фирм и институтов, активно сотрудничающих с ОАО «ЛЗОС».

За время работы конференции заслушано 97 докладов, из них 14 пленарных.

В пленарных докладах отмечено современное состояние отечественных и зарубежных астрономических обсерваторий, необходимость их модернизации с использованием самых современных оптико-электронных комплексов наземного базирования, проблемные вопросы.

Проанализированы современные тенденции с разработкой и изготовлением прецизионных крупногабаритных оптических элементов, электронных компонентов для оптико-электронных комплексов космической и авиационной техники.

Одним из серьезных недостатков в настоящее время является отсутствие в РФ технологических возможностей изготовления крупногабаритных заготовок для производства зеркал телескопов из карбида кремния. Есть уверенность, что после выполнения всех этапов работ недавно открытой НИОКР по этой теме специалистами ОАО «ЛЗОС» эта проблема будет решена.

На секционных слушаниях рассматривались перспективные конструкции оптико-электронных приборов и комплексов, материалы для изготовления прецизионных оптических элементов, технологии изготовления, сборки, юстировки и испытаний оптико-электронных комплексов.

Особый интерес представляют автоматизированные технологии изготовления крупногабаритной осевой, внеосевой асферической оптики, прецизионные методы контроля качества асферических поверхностей с максимально предельной точностью.

Цель проводимых конференций заключается в активизации взаимодействия фундаментальной, прикладной науки с профильными промышленными предприятиями, ускоренном внедрении инновационных технических решений в производство, а также максимальном привлечении молодых специалистов и ученых к решению приоритетных задач в области оптико-электронного приборостроения.

Необходимо отметить активное участие молодых ученых и специалистов промышленных предприятий в работе конференции, предложении новых технических решений. Особую активность проявили аспиранты, студенты и преподаватели МГТУ им. Н.Э. Баумана. Многие научно-исследовательские работы, совместные с ОАО «ЛЗОС» и ОАО КМЗ, являются очень перспективными и в недалеком будущем изменят технические подходы к разработке конструкций и изготовлению оптико-электронных приборов и комплексов.

В заключение хочется отметить прекрасную организацию конференции и гостеприимство ОАО «ЛЗОС», отлично созданный музей предприятия.

Богдан Сеник

25-26 СЕНТЯБРЯ 2014 ГОДА НА ПРЕДПРИЯТИИ ОАО «ЛЗОС» СОСТОЯЛАСЬ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ НАЗЕМНОГО И КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ», ПОСВЯЩЕННАЯ 75-ЛЕТИЮ ПРЕДПРИЯТИЯ

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПТИКЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ ДВУХ ПЛОСКОСТЕЙ

БАРЫШНИКОВ Н.В., ЖИВОТОВСКИЙ И.В., ДЕНИСОВ Д.Г., ГЛАДЫШЕВА Я.В., АБДУЛКАДЫРОВ М.А, ПАТРИКЕЕВ В.Е.

МГТУ им. Н.Э. Баумана

ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: yanagladysheva@gmail.com

Контроль качества изображения и способы его получения. Рассмотрены параметры качества изображения и его способы. Использованы методы разложения поверхности на полиномы Цернике и метод разложения профиля на четные и нечетные функции. Исследован метод двух плоскостей и границы его применения.

Ключевые слова: качество изображения, контроль качества поверхностей, методы восстановления профиля оптической поверхности, критерии, численное моделирование.

В настоящее время большой интерес вызывают задачи, связанные с определением и контролем параметров качества оптических поверхностей. Это связано с появлением ряда современных технических систем, в состав которых входят крупногабаритные высокоточные оптические детали, в том числе с плоскими рабочими поверхностями. Требования к качеству поверхностей таких деталей очень высоки, так как определяют качество функционирования оптической системы в целом.

На сегодняшний день технология изготовления оптических поверхностей позволяет получить изделия различной конфигурации с требуемыми характеристиками. При этом необходимы методы измерения с высокой точностью параметров качества рабочих поверхностей изготовляемых деталей процессе производства. Требования к качеству подобных оптических деталей в последнее время определяются пространственно-частотными диапазонами, связанными с пространственным масштабом неоднородностей, например с пространственным масштабом неоднородностей: 450 - 33мм, 33 - 2,5мм, 2,5 - 0,12мм, 0,12 - 0,01мм [1]. Для каждого диапазона устанавливаются свои требования к размеру неоднородностей формы рабочей поверхности детали. Границы диапазонов определяются в основном возможностями приемной системы интерферометра.

Для контроля параметров качества поверхности в каждом диапазоне используются интерферометрические методы восстановления профиля оптической поверхности на основе интерферометра Физо. Однако для получения необходимой точности измерений при использовании интерферометрических методов необходимо проведение калибровки эталонной поверхности, входящей в схему интерферометра. Так как качество измеряемой детали сравнимо с качеством эталонной поверхности, то для получения объективных результатов требуется исключить ошибки поверхности эталона из результатов измерений. Для этой задачи в большинстве случаев используется метод трех плоскостей [2-3]. Классический метод трех плоскостей заключается в попарном измерении трех поверхностей А, В, и С, где А – эталонная поверхность, а В и С – две поверхности плоскопараллельные пластины.

Эти измерения $W_1(x, y)...W_3(x, y)$ представлены как:

$$\begin{cases} W_1(x, y) = A(-x, y) + B(x, y) \\ W_2(x, y) = A(-x, y) + C(x, y) \\ W_3(x, y) = B(-x, y) + C(x, y) \end{cases}$$
(1)

где B(-x, y) симметрично B(x, y) относительно вертикальной оси и это означает, что плоскость используется как пластина на проход.

Однако эта система из трех уравнений имеет четыре неизвестные, что не позволяет вычислить профили поверхностей отдельно. Для нахождения недостающей неизвестной используются дополнительные измерения, например, поворот измеряемой поверхности вокруг оптической оси на 180° или зеркальный переворот поверхности. Но так как поверхность не является симметричной относительно оси поворота, то восстановить можно только одномерный профиль поверхности.

Одним из методов определения двумерного профиля исследуемой поверхности при четырех измерениях является метод с использованием разложения поверхности на полиномы Цернике, предложенный в Бернардом Фрицом в 1984 году [4]. Но метод позволяет найти решение, только для каждого полинома отдельно, поэтому метод подходит, только для исследования низкочастотных неоднородностей, таких как астигматизм, отклонение формы.

В последствие данный метод был расширен и позволял восстанавливать профиль поверхности с разложением до 36 полиномов Цернике [5-6], однако этого недостаточно для восстановления неоднородностей субнанометрового уровня.

Другим методом восстановления двумерного профиля, предложенный Ai и Wyant в 1992 году, является метод разложения профиля на четные и нечетные функции [7-9]. Уравнения в системе (1) можно переписать через сумму четных и нечетных функций. Комбинации четно-нечетных и нечетно-четных функций вычисляются первыми, затем вычисляются четно-четные выражения при



Рисунок 1.

Четыре конфигурации метода двух плоскостей. Исследуемая поверхность (сплошная линия) перемещается относительно эталонной (пунктирная линия) вдоль горизонтальной оси на T/2 влево (т₁(x,y)) и на T/2 вправо (т₂(x,y)), вдоль вертикальной оси вверх на T/2 (т₃(x,y)) и вниз на T/2 (т₄(x,y)) помощи дополнительной операции поворота. Нечетно-нечетные части вычисляются при помощи разложения в синусоидальный ряд Фурье. Метод с разложением измеряемого профиля на четные и нечетные функции является сложным в вычислении и использует в измерениях поворот плоскостей вокруг оптической оси, который приводит к «перетеканию материала» и изменению в этом случае толщины детали, к тому же для вычисления нечетно-нечетной части применяется разложение на полиномы, что снижает точность восстановления профиля.

Отдельно представлен ряд примеров, применения метода трех плоскостей при горизонтальном расположении измеряемых деталей. Но при измерении крупногабаритных деталей с диаметром апертуры до 1 м подобное расположение приводит к ошибке прогиба поверхности связанного с влиянием гравитации.

Авторами был исследован метод двух плоскостей, который был использован в проекте Laser Megajoule во Франции [10]. Путем перемещения при измерениях вспомогательной плоской пластины относительно эталонной пластины в плоскости перпендикулярной оптической оси (рис. 1).

Этот метод двух плоскостей дает возможность получить информацию о форме эталонной поверхности, отделив ее от формы поверхности вспомогательной пластины.

В схеме измерения участвуют только эталонная и исследуемая плоскости. Эталонная поверхность остается во время всех измерений неподвижной, а исследуемая поверхность перемещается при каждом измерении последовательно влево, вправо, вверх и вниз:



Рисунок 2. Модуляционная передаточная функция для различных значений перемещений Т, мм

| $\begin{bmatrix} m_1(x,y) \\ m_2(x,y) \\ m_3(x,y) \\ m_4(x,y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ \end{bmatrix}$ | 1 1 1 0 1 0 1 0 | 0 1 0 0 | 0 0 1 0 | $\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ | $h_{reference}(-x, y)$ $h_{test}(x + \frac{T}{2}, y)$ $h_{test}(x - \frac{T}{2}, y)$ $h_{test}(x, y + \frac{T}{2})$ $h_{test}(x, y - \frac{T}{2})$ | (2) |
|---|--------------------------|------------------|------------------|--|--|-----|
| | | | | | $h_{test}(x, y - \frac{1}{2})$ | |

где h_{reference} и h_{test} - распределение высот на поверхностях эталонной и исследуемой поверхностях.

Восстановление распределения высот неоднородностей на исследуемой поверхности вычисляется при помощи Фурье анализа:

где FT- прямое Фурье преобразование относительно пространственных частот v, и v,.

Однако точность этого метода ограничена из-за наличия в системе подвижек поверхности на расстояние Т. Это приводит к фильтрации диапазона восстанавливаемых пространственных частот. На рис. 2 представлена

$$h_{test}(x,y) = \\ = \iint \left(\frac{1}{2i\pi (v_x^2 + v_y^2)} \begin{pmatrix} v_x FT \left[\iint 2i\pi v_x FT(h_{test}(v_x,v_y))e^{2i\pi (v_x x + v_y y)}dv_x dv_y \right] + \\ + v_y FT \left[\iint 2i\pi v_y FT(h_{test}(v_x,v_y))e^{2i\pi (v_x x + v_y y)}dv_x dv_y \right] \end{pmatrix} \right) e^{2i\pi (v_x x + v_y y)}dv_x dv_y]$$
(3)

Модуляционно Передаточная Функция (МПФ), возникающая при данной фильтрации, для различных значений перемещений. Можно увидеть, что чем меньше перемещения, тем больший диапазон пространственных частот можно восстановить. Однако понятно, что при малых перемещения шум, присутствующий при измерениях будет снижать точность восстановления. С другой стороны большие перемещения будут уменьшать диапазон восстанавливаемых пространственных частот. Таким образом, данный метод имеет свои ограничения и их необходимо определить.

В качестве проверки и определения границ применимости метода двух плоскостей был разработан алгоритм на основе этого метода.

Для определения точности работы алгоритма рассматривались поверхности, заданные в виде набора двумерных синусоид.

Исследуемая поверхность задавалась в виде набора двумерных гармоник, синусоидальных функций, апертура поверхности задавалась в соответствии с анализируемым пространственно-частотным диапазоном. Затем эта поверхность восстанавливалась в соответствии с описанным алгоритмом, при различных значениях перемещений Т, мм. Критерием восстановления исследуемой поверхности являлся расчет ошибки:

$$E = \frac{\text{RMS}_{test} - \text{RMS}_{retrieved_test}}{\text{RMS}_{test}}$$
(4)

Значение этой ошибки не должно было превышать 5%.

Это исследование показало, что для диапа-



Рисунок 3. Исходная топография поверхности



Рисунок 4. Исходная топография поверхности с фильтрацией на диапазоне пространственных частот 1.67x10⁻³ – 3.0x10⁻² мм⁻¹

зона гармоник I пространственно-частотного диапазона применение метода возможно, при минимальном перемещении 4,8 мм (табл. 1). Во II диапазоне восстановление возможно, только лишь для его части при минимальном перемещении T=1,2мм.

| Пространственно- | Диапазон | Перемещение, Т | Ошибка |
|--------------------|----------|----------------|---------------------|
| частотный диапазон | гармоник | (мм) | восстановления, (%) |
| Region I | 1-18 | 48-4,8 | 4.95 |
| Region II | 18-87 | 4.8-1.2 | 5 |
| Region II | 240 | 1.2 | 33.88 |

Таблица 1. Результаты численного моделирования

| Результаты | численного м | юделирования | на реальной | исследуемой | поверхности |
|---------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 csystomamoi | Auchennoco M | юнслирования | па реалонои | исслебуетой | поверлности |

| Пространственно- | Перемещение, Т | Ошибка |
|--------------------|----------------|---------------------|
| частотный диапазон | (мм) | восстановления, (%) |
| Диапазон I | 0.21 | 5.3805 |
| Диапазон I | 0.43 | 5.4184 |
| Диапазон I | 0.87 | 5.507 |

Дальнейшее моделирование методом двух плоскостей стало восстановление реальной поверхности. Топография поверхности был получена при измерении оптической пластины с апертурой 100 мм в диаметре и точностью поверхности около $\lambda/40$ с использованием интерферометра H2000 Intellium. Исходная топография поверхности исследуемой детали (Рисунок 3) была отфильтрована на диапазоне пространственных частот от $1,67 \times 10^{-3}$ до $3,0 \times 10^{-2}$ мм⁻¹ (рис. 4).

Исходная фильтрованная поверхность была восстановлена по методу двух плоскостей и оценка точности восстановления вычислялась в соответствии с уравнением (4).

Ошибка восстановления и Значения перемещения Т представлены в табл. 2.

В этой статье мы проанализировали применимость метода абсолютной калибровки двух плоскостей для восстановления топографии поверхности оптических поверхностей в широком диапазоне пространственных частот.

Результаты моделирования показали, что значение перемещения Т для восстановления пространственных частот $1,67 \times 10^{-3}$ - $3,0 \times 10^{-2}$ мм⁻¹ должно быть 4,8мм и 1,2 мм для диапазона $3,0 \times 10^{-2}$ - 4×10^{-1} мм⁻¹. Результаты восстановления реальной поверхности, полученные с помощью экспериментальной установки с интерферометром Intellium H2000, показали точное восстановление топографии поверхности для области частот пространственного диапазона $1,67 \times 10^{-3}$ - $3,0 \times 10^{-2}$ мм⁻¹ со значением величины перемещения T более 0,2 мм.

Список литературы:

1. *Campbell J.H.* NIF optical materials and fabrication technologies: An overview // Proceedings of SPIE. 2004. Vol. 5341.

2. *G. Schulz and J. Schwider*. "Precise measurement of planeness," Appl. Opt. 6, 1077–1084 (1967).

3. *G. Schulz and J. Schwider*. "Establishing an optical flatness," Appl. Opt. 10, 929–934 (1971).

4. *B. S. Fritz.* "Absolute calibration of an optical flat," Opt. Eng. 23, 379–383 (1984).

5. *C. J. Evans and R. N. Kestner.* "Test optics error removal," Appl. Opt. 35, 1015–1021 (1996).

6. *Dongqi Su,Erlong Miao, Yongxin Sui, and Huaijiang Yang.* «Absolute surface figure testing by shift-rotation method using Zernike polynomials» OPTICS LETTERS / Vol. 37, No. 15 / August 1, 2012

7. *Chiayu Ai and James C*. Wyant Absolute testing of flats decomposed to even and odd functions. 5PIE Vol. 1776 Interferometry: Surface Characterization and Testing (1992)/ 7313.

8. *C.Ai and J. C. Wyant.* "Absolute testing of flats by using even and odd functions," Appl. Opt. 32, 4698–4705 (1993).

9. C.Ai, J. C. Wyant, L.-Z. Shao, and R. E. Parks. "Method and apparatus for absolute measurement of entire surfaces of flats," U.S. patent 5,502,566 (26 March 1996).

10. *Franck Morin, Stéphane Bouillet*. Absolute interferometric measurement of flatness: application of different methods to test a 600 mm diameter reference flat. Proc. of SPIE Vol. 6616 66164G-1.

11

СТРУКТУРНО-ГРАФОВАЯ МЕТОДОЛОГИЯ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

НЕМТИНОВ В.Б.¹, СЕРИКОВ В.Ю.²

¹МГТУ им. Н.Э.Баумана

²ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: vbnemtinov@bmstu.ru; vnemtinov@mail.ru; omp-21@lzos.ru

Рассмотрено использование структурно-графовой методологии для анализа и синтеза оптико-электронных систем с целью создания научных основ разра-ботки и апробации оптико-электронных комплексов. Идентифицирован двух-фазисный этапно-модельный синтез связной, холистичной и эмерджентной системы в виде композиции модельного и этапного графовых фазисов (стадий). Показано, что в основе синтеза лежат инженерно-технические законы, постулируемые с помощью графовых целевых функций. Построены каскадно-этап¬ные орциклы анализа и синтеза. В виде практического применения создан графовый портрет-образ процесса проектирования фурье-толщиномера для контроля крупногабаритных линз и проведено его математическое моделиро-вание.

Ключевые слова: оптико-электронная система, двухфазисный этапно-модельный синтез, каскадно-этапный графовый фазис, графовая целевая функция, проектирование фурье-толщиномера, математическая модель.

введение

В настоящее время научные основы разработки (проектирование и изготовление) и апробации (эксперимент, эксплуатация и прогностическая ликвидация) оптико-электронных приборов и комплексов в целом практически не сформированы. В рамках структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем (ОиЛзЭлнС), созданной В.Б.Немтиновым, в основе построения концепции научных основ современного технического приборостроения лежит их факторизация (разложение) на ряд определяющих (остовных) областей и фазисов (стадий) нового знания – факторов [1-3]. Проектирование – это искусство, а проектное искусство - это зеркальный образ научно-технической инженерии. Последняя формируется в результате идентификации инженерно-технических законов структурно-поведенческой связности этапов и моделей в рамках этапно-модельного синтеза системы с помощью графовых целевых функций, или графовых маршрутизаторов (графовых целевых факторов).

В рамках классического проектирования новых приборов целевая функция, или функция цели, - это название числовой оптимизируемой функции в задачах математического программирования. В структурной теории в основе создаваемого расширенного объектно-технического проектирования лежит графовый языковый фактор в виде композиции графовых целевых функций разработки и апробации оптико-электронных приборов и комплексов, как физических предметных моделей системы. Иначе говоря, любой граф в этом случае следует рассматривать как графовую целевую функцию при заданных начальной и конечной вершинных компонентах, которая описывает путь моделирования и идентифицирует целевую вершину синтеза. Как следствие, факторно-графовые модельные представления выражают сложные процессы разработки и апробации в сжатой форме на наглядном графовом языке. Иначе говоря, структурно-графовый факторный язык методологии анализа и синтеза оптикоэлектронных систем лежит в основе общего системно-модельного подхода к построению графовых маршрутизаторов, описывающих, объясняющих и прогнозирующих этапы разработки и апробации приборов и комплексов [1-3]. В рамках такого подхода систему идентифицируют с помощью модели, что даёт возможность разработчику «подняться» над прообразами существующих изделий и посмотреть на создание перспективных, например тепловизионных приборов, с единой общей точки зрения.

Ядром структурной теории является двухфазисный этапно-модельный синтез связной, холистичной (целой, неразрывной) и эмерджентной (обладающей новыми свойствами, отсутствующими в исходных элементах) оптико-электронной системы. Синтез системы представляет собой композицию модельного и этапного графовых фазисов, которые идентифицируют факторизацию научных основ на модели и этапы соответственно. В основе синтеза лежат инженерно-технические законы, которые постулируются с помощью графовых целевых функций, формируемых при построении фазисов синтеза в виде различных графовых каскадов, как внутри фазисов, так и между ними. В работе исследуются графовые маршрутизаторы каскадно-этапного фазиса, содержащие графовые этапные компоненты в виде разделов, шагов и пунктов. Графовые компоненты модельного фазиса в статье не рассматриваются.

Таким образом, физико-технический смысл двухфазисного этапно-модельного анализа и синтеза оптико-электронных систем состоит в открытии факторно-графовых инженернотехнических законов структурно-поведенческой связности этапов и моделей, визуализируемых в виде маршрутных графовых целевых функций.

Формируемые графовые маршрутизаторы, лежащие в основе языкового фактора каскадно-этапного фазиса, определяют этапные пути построения и применения изготовленных изделий, начиная от когнитивного замысла нового изделия и заканчивая созданием и эксплуатацией работающего оптикоэлектронного комплекса с последующей прогностической ликвидацией. Накопленный опыт разработки и апробации приборов и комплексов показывает, что графовые маршрутизаторы каскадно-этапного фазиса базируются на идентификации установленной экспериментальным путём композиционной научно-производственной ориентированной цепи (орцепи) «Постановка задачи – наука – технологии – производство – прогностическая ликвидация». Орцепь нуждается в дальнейшей детализации, которая проводится в работе.

С одной стороны, в рамках графового каскадно-этапного фазиса происходит наполнение этапных вершин определёнными видами рабочих моделей за счёт введения соответствующих прямых (модель – этап) модельноэтапных связей графовых вершин модельного фазиса с графовыми вершинами каскадноэтапного фазиса. С другой стороны, обратные (этап – модель) этапно-модельные рёберные связи показывают, какие модельные вершины необходимо находить и строить внутри модельного фазиса.

Таким образом, на основе последовательно-параллельного перебора этапов и моделей осуществляются переходы от этапного фазиса синтеза системы к модельному фазису и обратно [2,3]. В результате с единых структурно-графовых методологических позиций можно идентифицировать, систематизировать, формализовать и автоматизировать все этапы расширенного объектно-технического проектирования. При этом с помощью создаваемых графовых факторов этапно-модельного синтеза, прежде всего, простейших 2-факторов, осуществляется переход к построению композиции каскадно-этапных научных основ современного технического приборостроения.

КАСКАДНО-ЭТАПНЫЕ ОРЦИКЛЫ, ФОРМИ-РУЕМЫЕ НА ОСНОВЕ ГЛОБАЛЬНОГО ДУО-ДЕЦИМАРНОГО ЭТАПНОГО ОРГРАФОВОГО ФАЗИСА В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Создание новых оптико-электронных приборов и комплексов и анализ их свойств являются весьма трудоёмкими задачами. Опыт построения таких технических объектов показывает, что в основе их создания лежит каскадно-этапный фазис из 12 этапов в виде исходной канонической простой орцепи разработки и апробации произвольного прибора или комплекса. Она является детализацией упомянутой выше композиционной научнопроизводственной орцепи.

Канонический дуодецимарный (арности 12) каскадно-этапный фазис GK12 ^{ЭМС} синтеза оптико-электронной системы задаётся глобальной двенадцатиэтапной орграфовой целевой функцией (12 «» 1) синтеза. С помощью моста обратной связи М₁₂₋₁ целевая функция трансформируется в каскадно-этапный орцикл ЦК₁₂ Эмс расширенного объектно-технического проектирования, создаваемого в структурной теории ОиЛзЭлнС. Графовый орцикл (см. рис. 1) представляет собой упорядоченный циклический маршрутизатор (ЦИКЛ-ПРООБРАЗ ЦК 3МС) в виде концептуально-орграфового синтезпрообраза. Он задаёт внутренние этапные связи каскадно-этапного фазиса, описывающие процессы проектирования, производства и апробации приборов и комплексов с целью их использования и прогностической ликвидации. Кроме того, графовый орцикл используется в дальнейшем для идентификации внешних прямых и обратных этапно-модельных рёберных связей с графовыми вершинами модельного фазиса.

В процессе выработки структурно-графовой методологии каскадного объектно-технического проектирования инженерно-технические законы визуализируются с помощью графовых этапных компонент в виде разделпрообразов разработки и апробации каскадно-этапного фазиса [4].

С этой целью каскадно-этапный фазис синтеза оптико-электронной системы разбивают на отдельные раздел-прообразы, содержащие наборы графовых этапных компонент связности (этапных разделов) двенадцатиэтапной орграфовой целевой функции (12 «» 1). В результате строятся рабочие раздельные каскадно-этапные орциклы **ЦК**_{*mn*} ^{ЭМС}, которые формируются в результате идентификации специфических графовых целевых маршрутизаторов (*m* «» *n*). Маршрутизаторы задают раздельно этапную факторизацию научных основ.

У художника – должно быть чувство колорита, у музыканта – слух, у учёного – точная терминология. А.С.Пушкин говорил: «Чем богаче язык выражениями и оборотами, тем лучше для искусного писателя». В рамках структурной теории модельными выражениями и оборотами служат, прежде всего, рабочие раздельные каскадно-этапные орциклы (см. рис. 1 – 6).

В работе [4] в результате выделения в исходном орцикле $\amalg K_{12}^{\ {\rm 3MC}}$ двух раздел-прообразов в виде графовых компонент связности ${\rm GI}_7^{\ {\rm 3MC}}$ и ${\rm GII}_5^{\ {\rm 3MC}}$, соединённых мостом $M_{7.8}$, построен двураздельный орцикл-прообраз $\amalg K_{75}^{\ {\rm 3MC}}$ (см. рис. 2). Введённый орцикл $\amalg K_{75}^{\ {\rm 3MC}}$ имеет вид концептуально-орграфового модельного синтез-прообраза процесса проектирования (первый септарный проектный раздел ${\rm GI}_7^{\ {\rm 3MC}}$) и процесса изготовления и апробации прибора (второй квинтарный раздел ${\rm GII}_5^{\ {\rm 3MC}}$).

Бинарная двураздельная орцепь (GI₇^{ЭМС}, GII₅^{ЭМС}) задаёт дуодецимарную орграфовую целевую функцию (7 «» 5) синтеза системы. Она трансформируется в двураздельный циклический маршрутизтор (ЦИКЛ-ПРООБРАЗ ЦК₇₅^{ЭМС}) с помощью моста M₁₂₋₁. Построенный орцикл ЦК₇₅^{ЭМС} имеет вид концептуально-орграфового модельного синтез-прообраза процесса проектирования (первый семиэтапный, или септарный, проектный раздел GI₇^{ЭМС}) и процесса производства и апробации прибора (второй пятиэтапный, или квинтарный, раздел GII₅^{ЭМС}).

На рис. З построен второй двураздельный орцикл-прообраз \amalg_{57}^{9MC} в результате выделения в каноническом орцикле \amalg_{12}^{9MC} графовых компонент связности GI_5^{9MC} и GII_7^{9MC} , соединённых мостом M_{5-7} . Орцикл \amalg_{57}^{9MC} формируется на основе бинарной двураздельной орцепи (GI_5^{9MC} , GII_7^{9MC}), которая задаёт дуодецимарную орграфовую целевую функцию (5 «» 7) каскадно-этапного фазиса синтеза системы.



Рисунок 1. Канонический дуодецимарный каскадно-этапный орцикл ЦК₁₂^{ЭМС}



Рисунок 2. Выделение в дуодецимарном каскадно-этапном орцикле Ц K_{75}^{-9MC} двух разделов G I_7^{-9MC} , G II_5^{-9MC} , соединнных мостом $M_{7.8}$

Первый раздел GI₅^{ЭМС} имеет вид пятиэтапной (квинтарной) инженерно-графовой схемно-математической расчётной методики теоретических исследований системы с итоговой компьютерной обработкой. Второй раздел GII₇^{MC} является семиэтапной (септарной) инженерно-графовой методикой изготовления, апробации и прогностической ликвидации приборов с предварительной конструкторско-технологической проработкой.

Особый интерес представляет выделение двух графовых компонент связности $GI_9^{\ 9MC}$ и $GII_3^{\ 9MC}$ в каноническом орцикле $\amalg K_{12}^{\ 9MC}$. Третий двураздельный орцикл $\amalg K_{93}^{\ 9MC}$ (см. рис. 4) построен на основе бинарной двураздельной орцепи ($GI_9^{\ 9MC}$, $GII_3^{\ 9MC}$), которая задаёт дуодецимарную орграфовую целевую функцию (9 «» 3) синтеза системы. Последняя трансформируется в двураздельный циклический маршрутизатор ($\amalg UKJ$ -ПРООБРАЗ $\amalg K_{93}^{\ 9MC}$), как концептуально-орграфовый модельный синтез-прообраз разработки прибора и последующей апробации с целью его использования и прогностической ликвидации.

Первый раздел GI_9^{3MC} имеет вид девятиэтапной инженерно-графовой методики разработки (проектирование и производство) приборов и комплексов в рамках проектноизготовительной нонарной реализации каскадно-этапного фазиса синтеза системы. Второй раздел GII_3^{3MC} является трёхэтапной инженерно-графовой методикой апробации (эксперимент, эксплуатация и прогностическая ликвидация) приборов и комплексов, как вторая тернарная реализация каскадноэтапного фазиса синтеза системы.

В рамках дальнейшей детализации каскадно-этапного фазиса синтеза оптико-электронной системы в каноническом орцикле \amalg_{12}^{9MC} выделяют три графовые компоненты связности GI_5^{9MC} , GII_4^{9MC} и $GIII_3^{9MC}$ (см. рис. 5). Формируемый каскадно-этапный орцикл \amalg_{543}^{9MC} состоит из трёх разделов, соединённых мостами M_{5-6} и M_{9-10} . Он строится на основе тернарной орцепи (GI_5^{9MC} , GII_4^{9MC} , $GIII_3^{9MC}$), которая задаёт дуодецимарную орграфовую целевую функцию (5 «» 4 «» 3) синтеза системы. Последняя трансформируется в трёхраздельный циклический маршрутизатор (ЦИКЛ-ПРООБРАЗ ЦК₅₄₃^{ЭМС}), как концептуально-орграфовый модельный синтез-прообраз математической и компьютерной обработки документации для производства и апробации прибора.

Первый раздел GI_5^{3MC} синтез-прообраза задаёт пятиэтапную (квинтарную) методику схемно-математического исследования с итоговой компьютерной обработкой в рамках расчётной реализации каскадно-этапного фазиса синтеза системы. Второй раздел GII_4^{3MC} описывает четырёхэтапную (квартарную) методику изготовления с предварительной конструкторско-технологической проработкой. Третий раздел $GIII_3^{3MC}$ определяет трёхэтапную (тернарную) методику апробации и прогностической ликвидации приборов и комплексов с целью их последующей модернизации и использования.

С целью углублённой детализации каскадно-этапного фазиса синтеза оптико-электронной системы в каноническом орцикле $UK_{12}^{\ 9MC}$ выделяют четыре графовые компоненты связности $GI_2^{\ 9MC}$, $GII_3^{\ 9MC}$, $GIII_4^{\ 9MC}$, $GIV_3^{\ 9MC}$ (см. рис. 6). Каскадно-этапный орцикл $UK_{2343}^{\ 9MC}$ состоит из четырёх разделов, соединённых мостами M_{2-3} , M_{5-6} и M_{9-10} . Формируемый орцикл строится на основе квартарной орцепи ($GI_2^{\ 9MC}$, $GII_3^{\ 9MC}$, $GIII_4^{\ 9MC}$, $GIV_3^{\ 9MC}$), задающей дуодецимарную орграфовую целевую функцию (2 «» 3 «» 4 «» 3) каскадно-этапного фазиса синтеза системы.

Целевая функция трансформируется в четырёхраздельный циклический маршрутизатор (ЦИКЛ-ПРООБРАЗ ЦК₂₃₄₃^{ЭМС}), как концептуально-орграфовый модельный синтез-прообраз теоретических исследований и компьютерной обработки для изготовления и апробации прибора.

Первый раздел GI₂^{ЭМС} синтез-прообраза задаёт двухэтапную (бинарную) постановочно-схемную методику теоретического исследования в рамках исходной реализации каскадно-этапного фазиса синтеза системы. Второй раздел GII₃^{ЭМС} описывает трёхэтапную (тернарную) методику математического моделирования с компьютерной обработкой.



Рисунок 3. Выделение в дуодецимарном каскадно-этапном орцикле ЦК $_{57}^{590C}$ двух разделов GI $_{5}^{590C}$, GII $_{7}^{590C}$, соединнных мостом М $_{5-6}$



Рисунок 4. Выделение в дуодецимарном каскадно-этапном орцикле ЦК₉₃^{ЭМС} двух разделов GI₉^{ЭМС}, GII₃^{ЭМС}, соединнных мостом M₉₋₁₀

19

Третий раздел GIII₄^{ЭМС} определяет четырёхэтапную (квартарную) методику производства на основе созданной конструкторско-технологической документации. Четвёртый раздел GIV₃^{ЭМС} идентифицирует трёхэтапную (тернарную) методику апробации приборов и комплексов с целью их использования и прогностической ликвидации.

СТРУКТУРНО-ПОВЕДЕНЧЕСКАЯ СВЯЗНОСТЬ МОДЕЛЕЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМА-ЦИОННЫХ СИСТЕМ И ЭТАПОВ ПРОЕКТНОГО РАЗДЕЛА ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ И АПРОБАЦИИ ДИФРАКЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ТОЛЩИНЫ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛИНЗ

С целью этапной детализации проектного РАЗДЕЛ-ПРООБРАЗА GI7ЭМС (см. рис. 2), визуализирующего инженерно-технический закон проектирования оптико-электронных приборов и комплексов, маршрутизатор трансформируется в графовый портрет-прообраз в результате наполнения этапов шаговыми гиперрёбрами (подэтапами). Иначе говоря, внутри каждого каскадного этапа выделяют рабочие подмножества смежных вершин-шагов, так что синтез-прообраз теперь называют графовым портретом, ибо он содержит полный исходный прообраз научнотехнической документации.

В итоге раздел-прообраз в виде семиэтапной графовой компоненты связности фактически представляет собой документно-теоретический ПРОЕКТ-ПРООБРАЗ несуществующего технического объекта (см. рис. 7), визуализируемый в виде графового портрета из этапно-шаговых гиперрёбер. Он имеет вид простой проектной септарной орцепи, каждая этапная вершина которой имеет вид шагового гиперребра. Гиперребро может состоять из любого набора подвершин, которые называются шагами. Роль гиперребра состоит в наглядном выделении подмножества смежных модельных шагов, используемых в дальнейшем при формировании доку-ментного ПРОЕКТ-ОБРАЗА (GI, ЭМС) ' на создаваемый прибор.

В качестве практического применения структурно-графовой методологии анали-

за и синтеза оптико-электронных систем на рис. 8 построен раздел-образ (GI₇^{ЭМС})' в виде септарной орцепи, задающей графовый портрет-образ из шаговых гиперрёбер для дифракционной лазерно-электронной системы измерения толщины крупногабаритных линз. Семь этапных вершин раздел-образа GI₇^{F-T} идентифицируют синтез измерительной системы и постулируют инженерно-технический закон проектирования дифракционного лазерно-электронного измерителя в виде фурье(F)-толщиномера, или F-T, как физической предметной модели системы. Закон визуализируется в виде построенного графового документного ПРОЕКТ-ОБРАЗА GI_7^{F-T} на толщиномер, состоящего из шаговых гиперрёбер, которые задают подмно-жества реализуемых смежных модельных вершин-шагов. В итоге ПРОЕКТ-ОБРАЗ GI₇ F-T представляет собой полный комплект научно-технической документации на фурье-толщиномер.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФУРЬЕ-ТОЛЩИНОМЕРА

На современном уровне разработки и апробации приборов проектирование фурье-толщиномера на практике целесообразно осуществлять с помощью программных средств, используемых в автоматизированных информационных системах (АИС) [5].

Математические модели АИС, применяемые при формировании септарного документного ПРОЕКТ-ОБРАЗА GI7 F-T ЭМС приведены на рис. 9. В результате идентификации моделей, применяемых на 312, 412 и 512 этапах синтеза (см. рис. 8), устанавливается связь этих этапов с автоматизированными информационными системами (АИС). Как следует из рис. 9, ММ АИС используются при моделировании процесса проектирования лазерно-электронного фурье-толщиномера с целью осуществления этапных шагов. Иначе говоря, прямые и обратные связи программных средств и гиперрёберных шагов лежат в основе автоматизированного проектирования.

Автоматизация этапов проектного раздела



Рисунок 5. Выделение в дуодецимарном каскадно-этапном орцикле ЦК₅₄₃^{ЭМС} трех разделов, соединных мостами М₅₋₆, М₉₋₁₀

21



Рисунок 6. Выделение в дуодецимарном каскадно-этапном орцикле ЦК₂₃₄₃^{ЭМС} четырех разделов, соединнных мостами М₂₋₃, М₅₋₆, М₉₋₁₀

Первые семь вершин-этапов двураздельного графового орцикла ЦК₇₅^{ЭМС}, в основе которого лежит дуодецимарный кас-кадно-этапный фазис GK₁₂^{ЭМС} синтеза ОиЛзЭлнС. Раздел-прообраз GI 7 фазиса постулирует закон проектирования.

| \sim | 1 ₁₂ . <u>Документно-постановочный этап</u> |
|------------------------------|---|
| | Описание, объяснение и прогнозирование процесса проектирования прибора с помощью графовых инженерно- технических законов, задающих структурно-поведенческую связность синтезируемых этапов и моделей. Законы по- стулируют и визуализируют с помощью реализуемых графовых целевых функций. Синтез начинают с идентифика- |
| (1.2.) (1.3.) | ции каскадной рабочей графовой целевой функции, которая будет основой методологии ЭМС конкретной системы. Идентификация естественно научных законов, лежащих в основе принципа действия синтезируемой ОиЛзЭлнС. Формулировка ТЗ на проектируемый технический объект, исходя из его когнитивного замысла (мысленного прооб- |
| (1.4.) | <i>раза)</i> в виде концептуально-знаковой модели, задающей технические требования (TT). Выбор стадии разработки: НИР; техническое предложение (TП-е); эскизный проект (ЭП-т); технический проект (ТП-т); ОКР; рабочая КД. Идентификация цели предметно-модельного синтеза в виде класса предметных моделей, содержащего стендовую, |
| 15 | приборную, машинную кардинальную когорты; натурный, полунатурный, конструктурско-статический главный порядки; де-факторное и подобно-факторное основные масштабные семейства. Описание объекта проектирования – режимов работы и эксплуатации, миженерных коммуникаций: возлухо, энерго и |
| 1.6. | описание объекта проектирования, режимов работы и эксплуатации, инженерных коммуникации. воздухо, энерго и водоснабжение, вакуумирование, вентилирование. Рабочие параметры и характеристики проектируемого прибора, физико-технические условия работы и возможные |
| 1.7 | ограничения. Вид (визуальный, документный и т.п.) представления результатов в аналоговой или цифровой форме. Оценка воздействий внешних факторов на выходные характеристики (разрешающую способность точность) |
| 1.9. | чувствительность, надёжность, вероятностные оценки). Особенности размещения и использования проектируемого прибора, как физической предметной модели системы. |
| (1.10.) (1.11.) (1.12) | Разработка задания и требований по ресурсосбережению изделий производственно-технического назначения. Поиск аналогов, прототипирование и маркетинговые исследования. Инжиниринг - коммерческие услуги по полготовке и обеспечению процесса произволства и реализации пролукции. |
| • | 2 ₁₂ Документно-схемный этап |
| (2.1) (2.2) | Построение парадигмы структурных, функциональных и принципиальных схем синтезируемой оптико- и лазерно- электронной системы. Задание структурно-функциональной схемы, описывающей принцип действия системы. Банк функционально-преобразующих, регистрирующих и комплектующих элементов. |
| 2.3. | Подэтапы (шаги) функционирования и соответствующие им амплитудные сигнальные параметры и энергетические (интенсивностные) структуры. |
| 2.4.) | способы регистрации результатов измерении, а также телеметрические, регистрирующие и обрабатывающие рабочую (измерительную) информацию преобразующие элементы. Схемы методов калибровки (эталонирования) проектируемого прибора и коррекции результатов. |
| 2.6. | Идентификация возможных причин отказов и неисправностей. |
| | 3 ₁₂ . <u>Структурно-поведенческий математический этап</u> |
| 3.1. | Анализ связности математических моделей (ММ). Полная тернарная структурно-поведенческая ММ на основе мате- матической структуры MSt Бурбаки-Колмогорова, содержащая множества, отношения, операторы. Расчётно-фор- мульная и операторно-вычислительная вариации MSt. Бинарные подмодели MSt: графовая модель — множества, отношения: классификационная категория — множества, операторы: тип сигнала — отношения, операторы. |
| (3.2.) (3.3.) (3.4.) | Идентификация структурных ММ (графовых, топологических, факторизованно-групповых, геометрических и др.). Построение ММ поведения (алгоритмических, аналитических, транспарантных, геометрооптических и др.). Идентификация шаговых ММ в автоматизированных информационных системах (АИС): микро ММ на основе |
| | уравнении в частных производных, макро мм на основе системы обыкновенных дифференциальных уравнении, функционально-логические MM; транзактальные и сетевые MM. |
| Ŧ | 4., Компьютерно-прелметный этап |
| (4.1.) (4.2.) | Формирование в рамках главной графовой компьютерно-предметной целевой функции материальной базы для проведения предварительного и окончательного вычислительного (компьютерного) эксперимента. Согласование возможностей ЭВМ с имеющимся программным обеспечением. |
| | 5 ₁₂ . Компьютерно-математический этап |
| 5.2. | Формирование компьютерно-математического образа системы на основе построенных ММ. Алгоритмизация и построение расчётной компьютерной ММ для проведения светоэнергетического, габаритного, аберрационного, точностного и других расчётов. |
| (5.3.) | Получение численных результатов в рамках предварительного компьютерного эксперимента, на основе созданных документных концептуально-знаковых и структурно-поведенческих моделей. |
| 6.1.) | Разработка конструкции в рамках выбранной стадии разработки (НИР, ТП-е, ЭП-т, ТП-т, ОКР и рабочая КД), которая |
| | определяет взаимное расположение частей и элементов прибора. |
| 6.2 6.3 6.4 | Задание способов их соединения в единое целое в виде блочного комплекса, опираясь на принцип построения. Анализ взаимодействия составляющих узлов прибора. Леталировка. Выбор материалов, из которых изготавливаются оптические и механические летали прибора. |
| Ţ | 7 |
| (7.1) | Идентификация технологических свойств материалов. |
| (7.2.) (7.3.) | Проработка технологии изготовления деталей и корректировка выбранных материалов, оснастки и оборудования. Создание технологии изготовления одной из пяти стандартизуемых вариаций макетного образца, включая разработку технологической оснастки |
| 7.4. | Организация заданного типа выпуска изделия (единичного, серийного, массового). Анализ возможности выпуска. |

Рисунок 7.

Графовый портрет из шаговых гиперрёбер в виде документно-теоретического ПОЕКТ-ПРООБРАЗА произвольного прибора

Том 13,

Септарная орцепь каскадно-этапного орцикла ЦК^{ЭМС}, задающая проектный раздел-образ GI ^{ЭМС} / этапномодельного синтеза (ЭМС) дифракционной лазерно-электронной системы (ДфрЛзЭлнС) для измерения толщины линз

| | 1 ₁₂ . <u>Документно-постановочный этап</u> |
|----------------------------------|---|
| (1.1) (1.2) | Идентификация принципа действия ЛзЭлнС на основе законов дифракции на 3-м композиционном объекте "Измртл Нож-Линза" с целью измерения параметров модельного пространственно-частотного спектра (ПЧС) объекта. Формулировка ТЗ на <i>F-T</i> , исходя из его <i>когнитивного замысла</i> (<i>мысленного прообраза</i>) в виде концептуально- знаковой молели. залающей технические требования (ТТ), и выбор сталии разработки — технический проект. |
| 1.3. | Задание цели предметно-модельного синтеза в виде проектируемого <i>Г-Толщиномера</i> как дефакторной натурной |
| (1.4.) (1.5.) | приоорнои модели дфрлзэлнС для измерения толщины линз. Измеряемые характеристики и параметры: модельный пространственно-частотный спектр (ПЧС), толщина круп- ногабаритной линзы диаметром 100-500 мм. Диапазон толщин линзы вдоль оптической оси — 50200мм. Измерение погрешностей ОФП на длине волны 632,8 мм. Анализ влияния внешних факторов в цеховом исполнении <i>Я-T</i> на разрешение, точность и чувствительность. Относительная погрешность измерения толщины — 0,01%. |
| 1.0 | преобразователь и регистратор лазерного измерительного поля; устройство обработки ПЧС. Представление результатов в аналоговой и цифровой форме: графический ПЧС; электронная база данных; техническая локументация. |
| 1.8. 1.9. | Нормальные условия работы <i>F-T:</i> температура 21 ± 1°, влажность 50 ± 5%, давление 750 ± 5 мм. рт. ст. Особенности размещения и использования <i>F-T.</i> |
| | Ј Маркетинговые исследования создаваемого <i>β-T</i> . Сформулированы требования по ресурсосбережению. 2 ₁₂ . Докуметно-схемный этап |
| 2.1 2.2 2.3 2.4 | Создана парадигма из композиционных родов структурных (Стр) и функциональных (Фнкц) схем ДфрЛзЭлнС арности 5 для измерения толщины линз, детализирующая схемные модельные прообразы <i>F-T</i> . Построены Стр и Фнкц схемы, задающие основные этапы процесса преобразования сигналов, а также процессы получения, регистрации и обработки ПЧС. Идентифицирован состав измерительной системы. Разработана оптическая схема ДфрЛзЭлнС для измерения толщины линз. На основании Стр, Фнкц и ОптчСхем построен банк элементов <i>F-T</i> : лазер, оптическая система, формирователь двух пучков, 3-м объект "ИзмртлНож-Линза", фурье-преобразующий объектив, фотоаппарат, ПЗС-линейка. |
| Ļ | 3 ₁₂ . Структурно-поведенческий математический этап |
| (3.1) (3.2) (3.3) (3.4) | Построена орграфовая модель ветвления 2-кнл ДфрЛзЭлнС для измерения толщины линз. Задано модельное представление системы в виде 1-кнл внешней структурной модели (СМ). Построен цветной связный орграф внутренней СМ системы, идентифицирующий поведенческую структуру проектируемого <i>F-T</i> в рамках квинтарной парадигмы геометрооптических моделей слоёв пространства. Разработаны модели поведения системы: 2-м алгоритмическая модель 1-кнл ДфрЛзЭлнС и две квадратичные |
| Ŧ | 4 ₁₂ . <u>Компьютерно-предметный этап</u> |
| (4.1.) (4.2.) | Выбрана цифровая электронная компьютерно-предметная модельи (ЦфрЭлнКПМ). Согласованы возможности выбранной вычислительной машины с имеющимся программным обеспечением с целью оптимальной имитации поведения ДфрЛзЭлнС для измерения толщины линз. |
| | 5 ₁₂ . <u>Компьютерно-математический этап</u> |
| (5.1.) (5.2.) (5.3) | Построена компьютерная поведенческая модель ДфрЛзЭлнС для измерения толщины линз. На основе программ ZEMAX, MathCAD идентифицирована расчётная компьютерная (РсчтКмптр) ММ и с её помощью выполнены габаритный и аберрационный расчёты. В рамках РсчтКмптрММ найдены теоретические распределения интенсивности в плоскости двумерной щели "Измятя Ноха Линза" и в защей фогациюй плоскости фурме преобразующего объектива |
| Т | б Локументно-конструкторский этап |
| 6.1. | Разработан чертёж общего вида <i>F-Толщиномера</i> , содержащий данные, определяющие конструкцию изделия, взаимное расположение составных частей и их взаимодействие. |
| 6.2. | Разработан габаритный чертёж <i>F-Толщиномера</i> , содержащий контурное упрощённое изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами. |
| (6.3) (6.4) | Созданы сборочные чертежи, содержащие сборочные единицы (узлы) и другие данные, необходимые для сборки, обработки в собранном виде и контроля. На основе банка преобразующих элементов сформирован банк комплектующих изделий: графопостроитель, видеомонитор, микрофотометр, персональная ЭВМ. 7 Локументно-технологический этап |
| (7.1) | Дана оценка основных требований для провеления этапов юстировки оптических компонентов <i>Я-Толициомера</i> |
| (7.2) (7.3) (7.4) | Предложены методики и созданы операционные эскизы техпроцесса изготовления, сборки и юстировки ОптчС. Разработана схема сборочного состава формирующей оптической системы (ОптчС). Создана технология изготовления экспериментального макетного образца, используя технологическую оснастку. |

Рисунок 8.

Графовый портрет из шаговых гиперрёбер в виде документно-теоретического ПОЕКТ-ОБРАЗА GI₇^{F-T} на *F-Толщинометр*

N<u>∘</u> 4,



Рисунок 9. Математические модели автоматизированных информационных систем (АИС), применяемые при формировании документного ПРОЕКТ-ОБРАЗА на фурье-толщиномер

GI₇^{F-T} в рамках жизненного цикла промышленной продукции от документно-постановочного 1₁₂ до документно-технологического 7₁₂ этапа осуществляется с помощью ансамбля АИС [5], задаваемого графовыми маршрутизаторами: автоматизированного проектирования (CAECAD); подготовки техпроцесса производства (CAM); управления цепями поставок (SCM); планирования ресурсов предприятия (ERP); управления данными об изделии (PDM); управления взаимоотношениями с клиентами (CRM); планирования потребности в материалах (MRP-2).

В частности, как следует из рис. 9, на первом документно-постановочном этапе 1₁₂ для маркетинговых исследований применяются системы CRM, ERP, SCM, MRP-2, PLM. На четвёртом 4₁₂ и пятом 5₁₂ компьютерных этапах согласуются возможности выбранной ЭВМ с имеющимся программным обеспечением. В частности на первом документнопостановочном этапе 1₁₂ для маркетинговых исследований применяются системы CRM, ERP, SCM, MRP-2, PLM. На четвёртом 4₁₂ и пятом 5₁₂ компьютерных этапах согласованы возможности выбранной ЭВМ с имеющимся программным обеспечением. Идентифицирована расчётная компьютерная математическая модель и выполнены габаритный и аберрационный расчёты с использованием программ ZEMAX и MathCAD.

На документно-конструкторском этапе 6₁₂ для разработки конструкции прибора используется AutoCAD. Результат этой работы – готовый комплект конструкторской документации.

На седьмом документно-технологическом этапе 7₁₂ могут быть использованы системы САМ; PDM; PLM.

Кроме того, для деталей сложной конфигурации, изготавливаемых на ЛЗОСе с использованием пятикординатных обрабатывающих центров с числовым программным управлением, создаётся технология их изготовления с применением программ ADEM, SolidWorks.

Список литературы:

1. *Немтинов В.Б.* Докторская диссертация на тему «Структурная теория и математическое моделирование ОиЛзЭлнС» 2004 // http:// www.dissercat.com/content/strukturnaya-teoriya-imatematicheskoe-modelirovanie-optiko-i-lazernoelektronnykh-sistem#ixzz2stxrYkAa

2. *Немтинов В.Б.* Факторно-графовые модельные представления терагерцовых и инфракрасных оптико-электронных систем // Вестник МГТУ. Приборостроение. Спец. выпуск «Современные проблемы оптотехники». 2011. С. 78–99.

3. Белозёров А.Ф. Оптика России. Очерки истории и развития. – Казань: Центр инновационных технологий, 2013. – Т. 2 – 612с. // Раздел 11.3.6. Структурная теория оптико- и лазерно-электронных систем, созданная В.Б.Немтиновым: научные основы современного оптико-электронного приборостроения. С. 515-522.

4. *Немтинов В.Б., В.Ю.Сериков*. Графовая автоматизированная информационно-модельная идентификация проектного раздела жизненного цикла процесса разработки и апробации дифракционного лазерного измерителя толщины крупногабаритных линз.

Межд. конф. «Прикладная оптика 2014»: Сб. Трудов ОптичОбщества на Элн Диске. Секция «Оптическое приборостроение. Компьютерное моделирование». С-Пб., 2014. С. 180–185.

5. *Норенков И.П.* Автоматизированные информационные системы: учеб. пособие / – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011. – 342с.

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

КОСМИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА ОАО «КРАСНОГОРСКИЙ ЗАВОД им. С.А. ЗВЕРЕВА». ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

ТАРАСОВ А.П., АРХИПОВ С.А., ДОНЦОВ Г.А.

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

E-mail: arhipof@zenit-kmz.ru

Красногорский завод является ведущим предприятием России в области оптического приборостроения, которое традиционно специализируется на создании высокоэффективных космических и авиационных комплексов видового наблюдения и дистанционного зондирования Земли (BH и Д33). В статье в историческом контексте раскрыты основные направления развития работ, базовые схемотехнические решения, особенности построения аппаратуры BH и Д33. Более 60-ти лет основным партнером Красногорского завода был и остается Лыткаринский завод оптического стекла (ОАО ЛЗОС). Уникальные объективы, облегченные зеркала, широкая номенклатура оптических стекол ОАО ЛЗОС обеспечили высокое качество и предельные характеристики красногорской аппаратуры BH и Д33.

Ключевые слова: оптико-электронная аппаратура, оптико-фотографическая аппаратура, комплекс, дистанционное зондирование Земли, видовое наблюдение, объектив, облегченное зеркало.

В современном мире использование информации космической съемки – общепринятая составная часть различных научных и социально-экономических проектов практически всех отраслей народного хозяйства от геологии, лесного, сельского, водного хозяйств, до мониторинга чрезвычайных ситуаций и военно-технической разведки. Активно на базе материалов космической съемки развиваются новые направления ГИС-технологий планирования городских территорий, кадастра, экологического мониторинга, проектирования и контроля транспортной инфраструктуры и эффективного землепользования.

ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» более 60-ти лет является ведущим предприятием России в области оптического приборостроения, которое традиционно специализируется на создании высокоэффективных космических и авиационных комплексов видового наблюдения и дистанционного зондирования Земли (ВН и ДЗЗ). Красногорский завод работал практически со всеми головны-

ми ракетно-космическими фирмами создателями космических комплексов, обеспечивая разработку, изготовление и поставку высоконадежной, уникальной оптико-фотографической и оптико-электронной аппаратуры. Однако нашим основным заказчиком было и остается ОАО «РКЦ «Прогресс», которое произвело более 400 успешных запусков космических аппаратов, оснащенных аппаратурой Красногорского завода [1].

За многие десятилетия творческой работы на Красногорском заводе созданы базовые схемы и конструкции аппаратуры по следующим направлениям:

- аппаратура для исследования Луны и планет солнечной системы;

 обзорно-топографическая широкозахватная фотоаппаратура систематического осмотра земной поверхности и информационного наполнения топографических карт;

- фотоаппаратура детального площадного и объектового наблюдения земной поверхности;

| Космические аппараты ОАО «РКЦ «Прогресс» | Годы | Количество пусков | Аппаратура Красногорского завода |
|---|-------------|----------------------|-------------------------------------|
| Зенит-2, Зенит-4 | 1961-1970 | 179 | Фтор-2, Фтор-4, СА-34 |
| Зенит-2М | 1968-1979 | 102 | Фтор-2РЗ |
| Зенит-4М | 1969-1977 | 77 | Фтор-6, Ж-3, Ж-3М, Ж4 |
| Зенит-4МТ | 1971-1982 | 23 | Ж-5 топограф |
| Янтарь-2К | 1974-1983 | 30 | Ж-9, Ж-18 |
| Кобальт | 1984 - н.в | 32 | Бирюза |
| Янтарь-4КС1М | 1982-2000 | 24 | Ж-20, Родонит |
| Янтарь-1КФТ | 1981-2005 | 21 | Топаз, Топаз-М |
| Орлец-1, Орлец-2 | 1989-2006 | 8, 3 | Опал-1, Опал-2 |
| Pecypc-Φ1 | 1979-1999 | 55 | Природа |
| Ресурс-ДК | 2006 - н.в. | 1 | Геотон-Л1 |
| Ресурс-П | 2013- н.в. | 1 | Геотон, ГСА |

Таблица 1. ОАО «РКЦ «Прогресс» - основной заказчик космической аппаратуры

 оптико-электронная аппаратура оперативного крупномасштабного наблюдения и мелкомасштабного широкозахватного обзора Земли;

- фото- и оптико-электронная аппаратура для исследования природных ресурсов Земли.

Оптико-фотографическая съемочная аппаратура обычно состоит из корпусной части, системы управления с обеспечивающими устройствами, объектива и кассетной части, содержащей узел экспонирования и катушки с фотопленкой.

Схемные решения и конструкция кассетной части определяются способом регистрации изображения (кадровая или щелевая съемка). Для кадровой съемки наиболее сложным ме-

ханизмом узла экспонирования является затвор, определяющий время экспозиции. Для щелевой съемки важно с высокой точностью поддерживать скорость движения пленки в зоне щели, что обеспечивается лентопротяжным трактом (ЛПТ).

Для панорамной аппаратуры 17В39 был разработан уникальный ЛПТ, обеспечивающий выравнивание фотопленки, шириной 400 мм, в плоскости щели с погрешностью 3 мкм, при скоростях протяжения фотопленки до 2600 мм/сек. При этом, за счет специального синхронизирующего привода, регулируется скорость вращения сканирующего зеркала, которая обеспечивает совпадение скорости



Рисунок 1. Кадровая оптико-фотографическая аппаратура «Жемчуг-9» – а) Щелевая панорамная оптико-фотографическая аппаратура «Tonaз» – б)

протяжения пленки и скорости движения панорамного изображения с погрешностью не более 0,003%. Все эти оригинальные технические решения позволили получать единовременный кадр изображения земной поверхности, размером 200х600 км с разрешением 1 м в центре кадра и 2-3 м на краях.

В создании составных частей аппаратуры Красногорского завода участвовали ведущие научные организации и предприятия страны.

Информационные возможности съемочной аппаратуры в значительной степени определяются приемником изображения. Уникальные разработки ГосНИИхимфотопроекта широкоформатных фотопленок обеспечили разрешение, достигающее 300 лин/ мм для оптико-фотографических систем. Общий объем выпуска космических фотопленок в 1989 году составил ~ 10 миллионов погонных метров в пересчете на стандартную ширину (35 мм). Широкая номенклатура фотопленок (типы 38Т, 48, 68, 108, СН-10, СН-16 и др.) изготавливалась в 60-70-годы на лавсановой основе, толщиной 70 мкм, и далее, а в 80-90 годы достигнута толщина основы 40 и 25 мкм.

В состав оптико-электронной аппаратуры обычно входят корпусная часть, объектив, система управления с обеспечивающими устройствами, система приема и преобразования информации (СППИ).

В 1981 году Красногорским заводом была создана первая отечественная космическая оптико-электронная аппаратура «Жемчуг-20», обеспечивающая получение цифровой видеоинформации в темпе времени, близком к реальному (информационный поток 240 Мбит/с и угловое разрешение около 2 угл. с). Для этой аппаратуры были созданы первые образцы системы приема и преобразования информации (СППИ) на основе отечественных ФПЗС приемников, работающих в режиме временной задержки и накопления.

За период с 1980 по 1995 годы произведено 24 успешных запуска космических комплексов оперативной съемки «Терилен» («Неман»), оснащенных аппаратурой «Жемчуг-20» («Родонит»).

Совершенствование технологии производства ПЗС-приемников позволило в 80-90-е годы значительно повысить информативность СППИ (уменьшение размера пиксела при увеличении формата микросборки, повышение зарядовой емкости при одновременноми, снижении шумов информационного тракта), приблизив эти регистраторы изображения к лучшим образцам фотопленки. Рисунок 2 иллюстрирует этапы совершенствования СППИ оптико-электронной аппаратуры высокого пространственного разрешения.

Возможности длительной орбитальной эксплуатации оптико-электронной аппара-

| Составная часть аппаратуры | Разработчик | Изготовитель |
|----------------------------|---------------------|-----------------------|
| Корпусная часть | КМЗ, ЦСКБ | ЦСКБ |
| Система управления, КПК | КМЗ, СКБ «Полисвит» | НИИЭМ, СКБ «Полисвит» |
| Фотопленка | ГосНИИхимфотопроект | ТАСМА, Свема |
| Затворы | КМЗ | КМЗ |
| Приводы ЛПТ | НИИЭМ | НИИЭМ |
| Объективы | ГОИ | ЛЗОС, КМЗ |
| СПИИ | ОПТЭКС | ОПТЭКС |
| Сканирующие системы | КМЗ, НИИЭМ | КМЗ, НИИЭМ |
| Облегченные зеркала | КМЗ | ЛЗОС, НИИ КС |
| Светофильтры | ГОИ, ЛХТИ, ГИПО | КМЗ, ГИПО |
| (интерференционные, | | |
| пленочные) | | |

Таблица 2. Кооперация основных предприятий-соисполнителей Красногорского завода



Рисунок 2. Этапы совершенствования СППИ космической оптико-электронной аппаратуры высокого пространственного разрешения

туры, не ограниченной запасом фотопленки, а также обеспечение оперативной передачи съемочной информации по радиолинии, определили безусловное преимущество оптико-электронных средств в сравнении с оптико-фотографическими и «закат» космических оптико-фотографических систем наблюдения.

Важнейшая составная часть оптико-фотографической и оптико-электронной съемочной аппаратуры – объектив, формирующий изображение. Различают три группы оптических систем объективов, используемых для построения аппаратуры ВН и ДЗЗ:

 линзовые светосильные и длиннофокусные апланаты-апохроматы;

2) зеркальные и зеркально-линзовые светосильные

3) зеркальные и зеркально-линзовые длиннофокусные.

Линзовые объективы, в сравнении с зеркальными и зеркально-линзовыми, имеют



Рисунок 3. Линзовые объективы-апланаты-апохроматы космической аппаратуры Красногорского завода

ряд преимуществ (большие полевые углы, отсутствие асферик, меньшие требования к точности, возможность эффективной защиты от паразитных засветок), что и определило их преимущественное использование в космической аппаратуре.

Длиннофокусные светосильные апланатыапохроматы разработаны ГОИ им. С.И. Вавилова, их производство начиналось на Красногорском заводе, а с 1982 года было переведено в ОАО ЛЗОС. С тех пор и по настоящее время в ОАО ЛЗОС успешно функционирует уникальная производственная и стендовая база для полного цикла изготовления крупногабаритной космической оптики – от варки стекол и формообразования до сборки, юстировки и прецизионного, интерферометрического контроля выходных параметров объективов.

Специалистами Красногорского завода были предложены решения по ахроматизации оптических схем линзовых длиннофокусных объективов с учетом актиничного потока (фотопленка, светофильтр, солнечный излучатель), позволившие повысить разрешающую способность аппаратуры.

На рис. 4 отражены этапы совершенствования разрешающей способности линзовых длиннофокусных объективов. Следует отметить, что при дифракционном качестве изображения в длиннофокусных объективах было обеспечено поле зрения более 8°, недостижимое для осевых зеркальных и зеркально линзовых систем, что дало возможность получать детальную съемочную информацию с захватами более 30 км.

В состав уникальных, созданных Красногорским заводом, панорамных, обзорных, высокоразрешающих изделий «Топаз» (КВР-1000) и 17В39, не имеющих мировых аналогов, входят широкоугольные светосильные, практически бездисторсионные объективыапохроматы, разработанные ГОИ им С.И. Вавилова, производство которых было налажено в ОАО ЛЗОС.

Рост габаритов и масс изделий космической техники потребовал создание нового класса оптических элементов – облегченных



Рисунок 4. Этапы совершенствования линзовых длиннофокусных объективов

зеркал. В 80- годы Красногорским заводом совместно с кооперацией созданы облегченные зеркала из кварцевого стекла, ситалла, бериллия для изделий 17В37, 17В39, 17В319. Специалистами Красногорского завода разработаны базовые методики расчета оптимальных облегченных структур зеркал, схем разгрузки облегченных зеркал, методики конечно-элементного анализа напряженнодеформированного состояния узла зеркала, которые вплоть до настоящего времени успешно используются при создании новой космической аппаратуры.

В 1982 году Красногорский завод совместно с ОАО ЛЗОС и НИИ кварцевого стекла создал уникальное, не имеющее мировых аналогов, облегченное кварцевое сканирующее зеркало изделия 17В39, рабочие плоские поверхности которого (передняя и задняя) имеют дифракционное качество в наземных условиях и сохраняют его при переходе к невесомости.

Совместно с разработкой оптики, механики, приемников изображения для информационного тракта аппаратуры создавался ряд служебных подсистем (системы экспонирования, фокусировки, контроля температурного режима, калибровки и др.), работающих по циклограмме системы управления и обеспечивающих автоматическую работу аппаратуры в составе космического комплекса.

Крупные габариты космической аппаратуры, высочайшая точность юстировок и контрольных оптических измерений потребовала строительства специализированных производственных помещений – коллиматорных залов (рис. 6).

Типовые характеристики коллиматорного зала представлены в табл. 4. Их реализация была обеспечена за счет специальных конструкций тройных стен, виброзащищенного фундамента, внешних активных систем терморегулирования воздуха (градирня).

В ходе создания космической техники специалистами Красногорского завода совместно с кооперацией создан теоретический, методический и программно-алгоритмический задел, обеспечивающий математическое моделирование поведения аппаратуры на всех этапах ее жизненного цикла, включающий:

- анализ и синтез оптических и оптикоэлектронных систем,

- моделирование, анализ и оптимизация характеристик информационного тракта оптико-электронных систем,

- аналитические и численные инструменты оценки качества изображения,

- методы контроля волновых фронтов объективов и зеркал,

 методы контроля параметров информационного тракта и характеристик видеоинформации, получаемой оптико-электронными системами,

- расчеты прецизионных датчиков и исполнительных механизмов служебных систем,

- расчеты динамики и напряженно-дефор-

| Объектив | «Апо-Октон 8» | «Апо-Марс-8В» |
|---------------------------|---------------|---------------|
| Светосила | 1:5 | 1:5 |
| Фокус, мм | 1000 | 2200 |
| Угол поля, | 12 | 9 |
| Разрешение, лин/мм | 57 | 82 |
| Остаточная дисторсия, мкм | 2 | 1 |

Таблица 3. Характеристики светосильных линзовых объективов

№ 4, 2014



| Характеристика зеркала | Значение |
|--------------------------------|----------|
| Диаметр, мм | 788 |
| Коэффициент облегчения | 0,5 |
| Масса зеркала, кг | 60 |
| RMS рабочих поверхностей, мкм | 0,03 |
| Плоскостность рабочих | 0,015 |
| поверхностей, мкм | |
| Сохранность формы поверхностей | 0,001 |
| в эксплуатации, мкм | |

Рисунок 5. Сканирующее зеркало изделия17В39 и его характеристики в таблице

мированного состояния оптико-механических конструкций,

- расчеты температурных режимов аппаратуры в условиях эксплуатации,

- расчеты радиационной стойкости аппаратуры к ионизирующим излучениям космического пространства,

- расчеты надежности.

Подводя итог славному историческому пути развития космической аппаратуры Красногорского завода, можно сделать следующий вывод.

Красногорская аппаратура ВН и ДЗЗ достойно участвовала в обеспечении выполнения важнейших государственных задач космической разведки, обеспечила возникновение и развитие геоинформационных технологий всех отраслей народного хозяйства. Созданный огромный научно-технический задел комплексно отразился в различных технических науках, стимулируя их дальнейшее развитие, в том числе:

- в области оптотехники (пленочные и интерференционные фильтры,- высокоточные призменные устройства, облегченные крупногабаритные зеркала, длиннофокусные широкоугольные дифракционно ограниченные объективы-апланаты-апохроматы, широкоугольные дифракционно ограниченные светосильные объективы-апохроматы);

в области систем и устройств прецизионного приборостроения (системы высокоточной фокусировки оптики, методы юстировки высокоточной крупногабаритной оптики, методы контроля качества изображения);



Рисунок 6. Коллиматорный зал ЮСКБ Красногорского завода

Таблица 4. Требования к коллиматорному залу

| Треборацио | Зизпение |
|--|----------|
| преоование | Эпачение |
| Габариты рабочего помещения (длина, ширина, высота), м | 30x15x10 |
| Номинал температуры воздуха в рабочем помещении, °С | 20±0,2 |
| Допустимый градиент температур, °С/м | 0,01 |
| Допустимая скорость изменения температуры, °С/час | 0,2 |
| Амплитуда колебаний фундамента не более, мкм (1-2 Гц) | 0,5 |
| Чистота воздуха, класс по ИСО 14644-1 | VII |
| Относительная влажность, % | 50-70 |

в области электроники и автоматики (методология систем управления автоматическими комплексами, высокоточные системы фокусировки, сканирующие системы, системы приема и преобразования изображения, крупноформатные регистрирующие устройства на базе ФПЗС и алгоритмы обработки видеоинформации, прецизионные приводные устройства);

- в области прикладной химии (технологии изготовления фотоматериалов, технологии изготовления стекол с особым ходом дисперсии, оптические и конструкционные покрытия, нетрадиционные сплавы и материалы).

В настоящее время аппаратура Красногорского завода является основой отечественной орбитальной группировки.

С сентября 2013 года на орбите успешно работает космический аппарат ДЗЗ «Ресурс-П», оснащенный оптико-электронной аппаратурой (ОЭА) высокого пространственного разрешения «Геотон» и гиперспектральной съемочной аппаратурой (ГСА). За время эксплуатации получено более 20 млн. кв. км снимков поверхности Земли.

ОЭА «Геотон» [2] предназначена для:

- регистрации изображений поверхности Земли в панхроматическом (ПХ) и семи мультиспектральных (МС) каналах и их преобразования в цифровой информационный сигнал;

- предварительной обработки и упаковки видеоинформации (целевой информации) и передачи ее в радиолинию.

Основные тактико-технические характеристики аппаратуры «Геотон» представлены в табл. 5. В состав ОЭА «Геотон» входят:

- система приема и преобразования информации (СППИ);

- оптико-механический блок, состоящий из объектива и корпусной части с приборной рамой и иллюминатором;

- блок формирования изображения, состоящий из исполнительного механизма фокусировки, блока светофильтров, блока калибровки;

- блок системы управления и межблочные кабели.

Конструктивно аппаратура интегрирована в космический аппарат и выполнена в виде моноблока. На рисунке 1 представлен общий вид ОЭА «Геотон».

Корпусная часть оптико-механического блока является связующим звеном для остальных узлов и одновременно является конструктивной частью космического аппарата «Ресурс-П». В оболочке корпусной части размещен контур жидкостного термостатирования, замкнутый на систему терморегулирования космического аппарата.

Оптическая схема ОЭА «Геотон» построена на базе линзового телеобъектива-апохромата ОБ- 646 (фокусное расстояние 4000 мм, относительное отверстие 1:8, угол поля зрения 8°, масса 320 кг). Изготовитель объектива – ОАО ЛЗОС.

В состав СППИ входят три оптико-электронных преобразователя – ОЭП-ПХ, ОЭП-МС1, ОЭП-МС2, в которых в качестве приемника изображения используются ФПЗС-ВЗН.

ОЭП-ПХ может работать в в режиме панхроматической (ПХ) съемки в диапазоне

33

Таблица 5. Основные характеристики ОЭА «Геотон»

| Наименование характеристики | Значение |
|---|--------------|
| Полоса захвата (при съемке с высоты 475 км), км | 38,5 |
| Пространственное разрешение, м ПХ канал МС (7) каналы | ≤0,8 ≤2,4 |
| Отношение сигнал/шум | ≥200 |
| Погрешность определения эффективной энергетической яркости на входном зрачке ОЭА, % | 10 |
| Погрешность аттестации элементов внутреннего ориентирования ОЭА, угл. с | 6 |
| Разрядность представления информации, бит/пиксель | 10 |
| Масса, кг | 880 |
| Габаритные размеры аппаратуры, м - длина - максимальный диаметр | 4,9 2,2 |

спектра (580-800) нм или в режиме мультиспектральной съемки (ПХ-МС) в диапазоне спектра (800-900) нм.

ОЭП-МС1 и ОЭП-МС2 работают в режиме мультиспектральной съемки и имеют по три спектральных диапазона съемки каждый.

ОЭА «Геотон» в составе КК «Ресурс-П» обеспечивает различные виды съемки поверхности Земли: объектовую, маршрутную и стереосъемку.

На рис. 8 представлен снимок «Стадион Уэмбли, Лондон», полученный 03 июля 2014 аппаратурой «Геотон» КК «Ресурс-П».

Гиперспектральная съемочная аппаратура (ГСА) [3] предназначена для:

- гиперспектральной съемки поверхности Земли в видимом и ближнем инфракрасном диапазона спектра в режиме «push-broom»;

- аналогово-цифрового преобразования гиперспектральной видеоинформации, её упаковки и передачи ее в радиолинию КА «Ресурс-П».

Основные тактико-технические характеристики ГСА представлены в табл. 6.

Конструктивно аппаратура выполнена в блочном исполнении.



Рисунок . Съемочная оптико-электронная аппаратура «Геотон»



Рисунок 8. Стадион Уэмбли, Лондон

В состав ГСА входят:

- система оптико-механическая, содержащая объектив изображающий и двухканальный спектрометр,

- система приёма и преобразования информации (СППИ), - блоки управления и межблочные кабели связи.

В ОЭП'ах СППИ ГСА используются отечественная высокоскоростная кадровая ФПЗСматрица. Характеристики фотозоны ФПЗС:

- размер фоточувствительных элементов (18 x 18) мкм,

- число элементов в столбце (в направлении движения КА) – 216 элементов,

- число элементов в строке (в направлении захвата ГСА) - 1048 элементов,

- максимальная кадровая частота – 253,3 Гц.

В СППИ ГСА предусмотрена возможность снижения кадровой частоты в 2, 4, 8 раз, что приводит к соответствующему изменению пространственного разрешения в направлении полёта КА.

В пределах фотозоны реализована возможность независимого локального аналогового бинирования строк, что позволяет оптимизи-

ровать спектральное разрешение в каналах. Коэффициенты бинирования строк могут быть различны для разных спектральных каналов и определяются тактовой диаграммой. В ФПЗС также реализована возможность бинирования столбцов, что позволяет изменять пространственное разрешение в направлении захвата в 2 и 4 раза.

Высокая производительность ГСА в составе КА «Ресурс-П», возможность получения подробных «спектральных портретов» подстилающей поверхности обеспечивает решение широкого круга задач в интересах МПР России, МЧС России, Минсельхоза, Росреестра, Росгидромета и других потребителей.

Результаты гиперспектральной съемки могут эффективно использоваться для решения сложных задач обнаружения малоразмерных объектов, идентификации объектов исследуемой поверхности, определения их состояния и динамики, выделения различий между близкими классами практических для всех тематических задач космической съемки в области: сельского и лесного хозяйства, землепользования, климатологии, контроля во-

Таблица 6.

Основные характеристики ГСА

| Наименование характеристики | Значение |
|--|---------------------|
| Полоса захвата, км | 30 |
| Пространственное разрешение (размер проекции пикселя), м | 30 |
| Спектральный диапазон, нм канал ВД1 канал ВД2 | 430÷650 630÷1000 |
| Число спектральных каналов | >100 |
| Спектральное разрешение (среднее значение интервала спектральной выборки), нм канал ВД1 канал ВД2 | 4,5 6,5 |
| Отношение сигнал/шум на верхней границе динамического диапазона входного сигнала | >200 |
| Нелинейность градуировочных характеристик, % | < 1 |
| Неравномерность сигнала, при визировании равнояркой поверхности, % | <2 |
| Коэффициент передачи модуляции на частоте Найквиста | >0,2 |
| Погрешность привязки шкалы длин волн, нм | <1,5 |
| Погрешность привязки информации к бортовой шкале времени, с | 5.10-4 |
| Разрядность квантования сигнала, бит | 14 |
| Динамический диапазон | >3000 |
| Среднеквадратическая погрешность измерения СПЭЯ на верхней границе динамического диапазона входного сигнала, % | <5,0 |
| Информационный поток, Мбит/с | 552 |
| Среднеквадратическая погрешность аттестации параметров внутреннего ориентирования, угл. с | 5,0 |
| Масса, кг | <150 |
| | |

дных ресурсов, поиска полезных ископаемых и энергоносителей, видовой военной разведки, мониторинга чрезвычайных ситуаций.

Совместное использование гиперспектральной информации, получаемой ГСА, и съемочной информации высокого пространственного разрешения, получаемой оптико-электронной аппаратурой «Геотон» КА «Ресурс-П», открывает новые возможности идентификации замаскированных объектов, получения нового качества информации ДЗЗ недоступного в отдельности.

Качество информации ДЗЗ, получаемой современной съемочной аппаратурой в значительной степени определяется корректностью и точностью аттестации ее фотограмметрических и радиометрических характеристик. Эти характеристики выполняют функцию «универсального языка», связывающего информацию ДЗЗ, полученную в различное время или различными КК ДЗЗ, в различных спектральных диапазонах. Аппаратура Красногорского завода проходит обязательную радиометрическую и фотограмметрическую калибровки, по результатам которых заполняются соответствующие формуляры [4].

Важнейшая составляющая гиперспектральной съемочной аппаратуры – наземное программно-методическое обеспечение (ПМО), предназначенное для контроля состояния и оптимальной настройки аппаратуры в процессе эксплуатации, обработки гиперспектральной информации, пополнения базы данных коэффициентов спектральной яркости подстилающей поверхности и базы данных по спектральному пропусканию атмосферы.

Методики и алгоритмы ПМО для ГСА [5] разрабатывались Красногорским заводом совместно со специалистами ВКА им. А.Ф. Можайского и ИФА им. А.М. Обухова РАН. На основе созданных методик и алгоритмов специалисты ОКБ «Спектр» разработали и внедрили в НЦ ОМЗ комплекс ПМО ГСА.

В июле 2014 г. состоялся успешный запуск


Рисунок 9. ГСА на государственном первичном эталоне единиц спектральной плотности энергетической яркости ВНИИОФИ

космического аппарата «Метеор-2» Корпорации «ОАО ВНИИЭМ им. А.Г. Иосифьяна», оснащенного инфракрасным Фурье-радиометром ИКФС-2, разработанным Красногорским заводом совместно с ФГУП «Центр Келдыша» [6].

ИКФС-2 предназначен для регистрации спектров исходящего излучения атмосферы и поверхности Земли. В таблице 7 представлены основные характеристики ИКФС-2.

Общий вид ИКФС-2 представлен на рисунке 10. В состав прибора входят: модуль сканера, модуль интерферометра, модуль электроники и радиационный холодильник. На основе полученного задела создается новый класс ИК Фурье-спектрометров для перспективных космических комплексов «Метеор-3» и «Электро-ГС».

Широкозахватная многоспектральная аппаратура среднего разрешения (ШМАСР) [7] разрабатывается Красногорским заводом по Контракту с Роскосмосом и предназначена для панхроматической и мультиспектральной съемки поверхности Земли в режиме «push broom» и должна обеспечивать получение информации дистанционного зондирования Земли (ИДЗЗ) в составе перспективного космического комплекса.

Выбор оптимальных схемных и схемноконструктивных решений ШМАСР выполнен для базовой орбиты функционирования 700 км. Диапазон изменения настроечных параметров аппаратуры обеспечивает её функционирование в диапазоне высот (450-1000) км и углов визирования до ±15° по крену и тангажу.

В табл. 7 приведены основные характеристики аппаратуры.

В состав ШМАСР входят: система оптикомеханическая (СОМ), система управления; СППИ, звездные датчики; специальное бортовое и наземное программное обеспечение.

СОМ строится на основе зеркально-линзо-

| Наименование характеристики | Значение |
|---|--|
| Рабочий спектральный диапазон | 515 мкм (6672000 см ⁻¹) |
| Спектральное разрешение | 0.4 см ⁻¹ |
| Порог обнаружения (NESR) [Вт·м ⁻² ср ⁻¹ см], не более: λ=6мкм | 3.10-4 |
| $\lambda = 13_{MKM}$ $\lambda = 15_{MKM}$ | $1 \cdot 10^{-4}$ $3 \cdot 10^{-4}$ |
| Погрешность измерения спектр. яркости объекта | 0.5 K |
| Угловой диаметр поля зрения по уровню 0.5 (или пространственное разрешение в надире) | не более 40 мрад |
| Полоса обзора, км | 2500 |
| Шаг сканирования, не более, км | 110 |
| Периодичность получения интерферограмм | 0.6 c |
| Информативность | 600 кбит/с |
| Масса прибора | 55 кг |

Таблица 7. Основные характеристики ИКФС-2



Рисунок 10. ИКФС-2

вой эксцентричной схемы, обеспечивающей общий входной зрачок для всех каналов и более высокую технологичность (все оптические компоненты сферические, за исключением первого зеркала) в сравнении с аналогом – трехзеркальной схемой Кука. В оптической системе использовано спектроделение апертурного пучка и масштабирование фокусного расстояния для КИК канала, что обусловлено необходимостью • согласования заданного в ТЗ соотношения пространственного разрешения в спектральных каналах (5/10/20) м и соотношения размеров элементов дискретизации (9/18/25) мкм приемников изображения.

Для ПХ и МС каналов разрабатываются два типа крупноформатных многоспектральных фотоприемных модулей «Комби», (НПП «ОПТЭКС», ЗАО НПП «Элар») содержащих по 5 фотозон (1ПХ+4МС), что позволяет сформировать в фокальной плоскости две панхроматических фотозоны, с длиной строки 24144 элемента и 8 спектральных фотозон с длиной строки 12072 элемента.

В КИК канале использованы два крупноформатных фотоприемных устройства XLIN-1.7-3000 (Xenics, Бельгия), что позволяет сформировать в фокальной плоскости КИК канала фотозону формата (6020х1) элементов.

На рис. 10 представлен общий вид конструкции СОМ в разрезе.

По контракту с Роскосмосом Красногорский завод выполняет ОКР, цель которой - создание технологии изготовления узла главного зеркала (УГЗ) крупногабаритных космических телескопов сверхвысокого разрешения для наблюдения земной поверхности.

| Наименование характеристики | Значение |
|---|---------------|
| Полоса захвата, км | 120 |
| Проекция пиксела, м | |
| - панхроматический (ПХ) канал | 5 |
| - мультиспектральный (MC) каналы | 10 |
| - коротковолновый ИК (КИК) канал | 20 |
| Рабочие спектральные диапазоны, мкм | |
| - ПХ и MC каналы (8 шт.) | 0,45-0,96 |
| - КИК канал | 1,55-1,70 |
| Отношение сигнал/шум | |
| - ПХ канал | 320 |
| - МС каналы | 450 |
| - КИК канал | 500 |
| Среднеквадратическая погрешность пределения элементов | |
| внешнего ориентирования, угл. с. | 5,0 |
| Среднеквадратическая погрешность аттестации элементов | |
| внутреннего ориентирования, угл. с. | 4,0 |
| Среднеквадратическая погрешность пределения эффективной | |
| интегральной яркости на входном зрачке, % | 5,0 |
| Масса, кг | 180 |
| Габариты, мм | 1000×600×1500 |

Таблица 8. Основные характеристики ШМАСР



Рисунок 11. Общий вид конструкции СОМ в разрезе

В состав УГЗ входят:

- облегченное ситалловое прецизионное главное зеркало диаметром 2,5 м (предприятие изготовитель – ОАО ЛЗОС);

- размеростабильная несущая конструкция из композиционного материала;

- специальное технологическое оснащение для изготовления и контроля УГЗ.

На рис. 11 представлен вариант конечноэлементной модели главного зеркала.

Будущие новые рубежи основных характеристик космической аппаратуры ВН и Д33 представлены в табл. 9. Покорение этих новых рубежей должно иметь следующие характерные особенности:

 обязательность радиометрической и фотограмметрической калибровок аппаратуры, обеспечивающих прослеживаемость к первичным эталонам и, тем самым, возможность формирования единой интеллектуальной, постоянно пополняющейся базы знаний о Земле,

2) возрастание роли адекватного математического моделирования поведения аппаратуры на всех этапах ее жизненного цикла;

3) применение новых нетрадиционных материалов в оптических конструкциях;

 совершенствование фотоприемных устройств, электронной компонентной базы, широкое использование микро электромеханических систем;

5) интеграция и комплексирование сенсоров и информации ВН и ДЗЗ, создание адаптивных съемочных систем,

6) совершенствование и интеллектуализация наземного и бортового программного обеспечения;

 повышение надежности, ресурса и срока службы аппаратуры;

8) сокращение сроков разработки новых образцов.

| Параметр | Значение | Системные решения | Аппаратурные решения |
|--|--|--|---|
| Пространственное разрешение, м | 0,2-0,25 | Повышение точности стабилизация КА | Рост диаметра главного зеркала до 3-4 метров |
| Захваты, км | 120 и более | Увеличение численности группировки КА | Применение эксцентричной пространственной оптики Крупноформатные ФПУ |
| Спектральные диапазоны | УФ, ВД, КИК, БИК, ДИК | Комплексирование аппаратуры | Зеркальная оптика Широкополосные, инфра- красные ФПУ |
| Спектральное разрешение, гипер- спектральность | менее 0,5 см ⁻¹ более 400 каналов | Развитие и пополнение баз КСЯ и модели атмосферы | Новые оптические схемы с дифракционными элементами Фурье-коррелометры Высокочастотные матричные ФПУ |
| Оперативность, вплоть до непрерывного наблюдения, час | менее 0,5 час | Увеличение числен- ности группировки КА Переход на ГСО и эллиптические орбиты | Снижение массы составных частей аппаратуры Рост диаметра главного зер- кала до 30 метров Композиционные материалы |

| | | Таблица 9. | | | |
|-------------|----------|-------------|------------|-----|-----|
| Перспективы | развития | космической | аппаратуры | BHu | Д33 |



Рисунок 12. Конечно-элементная модель главного зеркала

На протяжении 60 лет сменилось более трех поколений создателей аппаратуры ВН и ДЗЗ. Но неизменным для современных разработок остается та высочайшая цель, которая была взятая еще на старте первых ракет в конце 50-х начале 60-х, эпохи пионерских проектов – создание аппаратуры, обеспечивающей получение предельных для текущего технологического уклада характеристик, направленной на открытие человечеству новых возможностей в познании окружающего мира. В этом направлении вот уже более 60 лет активно работает, и далее будет не менее успешно работать коллектив ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева».

Список литературы:

1. Научно-технический центр. Этапы становления и развития. К 60-летию ЦКБ-НТЦ.- М: Спец-Адрес, 2009.

2. Архипов С.А., Бакланов А.И., Герасименко В.В. Многоспектральная оптико-электронная аппаратура «Геотон» космического аппарата «Ресурс-П» // Исследование Земли из космоса, 2014, №2. с.44-54

3. Архипов С.А., Бакланов А.И., Линько В.М. Гиперспектральная съемочная аппаратура для космического аппарата «Ресурс-П» // Исследование Земли из космоса, 2014, №3. с.1-12. 4. Архипов С.А. Радиометрическая калибровка съемочной аппаратуры космических комплексов Д33: текущее состояние и проблемы // Материалы V-й международной конференции «Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Ростов-на-Дону. НИИ механики и прикладной математики им. И.И. Воровича ЮФУ. 2012.- с.313-319.

5. Архипов С.А. Программно-методическое обеспечение настройки гиперспектральной аппаратуры космического аппарата «Ресурс-П» и предварительной обработки гиперспектральной информации // II Международная конференция «Геоинформационные науки и экологическое развитие: новые подходы, методы, технологии», Кипр, 5-9 мая, 2014 г.

6. Завелевич Ф.С., Головин Ю.М. и др. Бортовой инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2: характеристики летного образца // Сб. тезисов докладов научно-технической конференции «Гиперспектральные приборы и технологии». ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева». 2013 г. с. 83-84.

7. Архипов С.А. Схемные решения широкозахватной многоспектральной аппаратуры среднего разрешения для перспективного космического комплекса ДЗЗ // Международная конференция «Геодезия, картография и кадастр - современность и перспективы» МИИГАиК, 2014 г.

РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ БЛОКОВ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ БЛИЖНЕЙ ИК-ОБЛАСТИ СПЕКТРА

НАСЫРОВ А.Р.¹, ШТЕЙНФЕЛЬД В.О.¹, МУСЛИМОВ Э.Р.¹, ПЕРСЕВ И.В.², ЩЕРБАКОВ М.А.²

¹ОАО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань ²ЗАО «Научно-производственное объединение «Лептон», г. Москва

E-mail: gipo@telebit.ru

В статье представлен разработанный и реализованный гиперспектральный прибор космического базирования для диапазонов 0,9-1,7 мкм и 2,0-2,4 мкм. Продемонстрировано достигаемое качество изображения. Рассмотрены вопросы обеспечения точности и термостабильности оптико-механического блока.

Ключевые слова: гиперспектрометр, пространственное разрешение, спектральное разрешение.

введение

В зависимости от числа раздельно регистрируемых спектральных интервалов изображающие оптические системы принято делить на панхроматические, мульти-, ультра- и гиперспектральные. К последним относят системы, позволяющие регистрировать изображение в десятках и сотнях спектральных каналов с относительным спектральным разрешением порядка 0,01 [1]. Гиперспектральный прибор формирует массив данных, называемый кубом, два измерения которого соответствуют пространственным координатам, а третья – спектральной (см. рис. 1).

Одной из первых и, вероятно, наиболее важных областей применения гиперспектральных оптических систем стали приборы авиационного и космического базирования для дистанционного исследовании земной поверхности. В настоящей статье рассматривается разработка принципиальной схемы и конструкции оптических блоков гиперспектрометра с высоким пространственным разрешением для ближнего ИК-диапазона от 0,9 до 2,4 мкм, размещаемого на борту космического аппарата. Данный прибор должен обеспечивать регистрацию изображения в 40 спектральных каналах с пространственным разрешением на местности не менее 60 м при высоте орбиты 500 км. При этом к прибору предъявляются повышенные требования по массогабаритным характеристикам и устойчивости к внешним воздействиям.

1. РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

1.1. Выбор принципиальной схемы.

В зависимости от метода получения пространственной информации гиперспектрометры делятся на 4 типа: «whiskbroom» (сцена сканируется однопиксельным мгновенным полем зрения в двух направлениях); «pushbroom» (построчное сканирование линейным полем зрения); «framing» (покадровая съемка, в процессе которой двуразмерное поле зрения остается фиксированным на объекте) и «windowing» (оконное сканирование, при котором двуразмерное поле зрения непрерывно движется по объекту). По методу получения спектральной информации гиперспектрометры разделяются на 3 класса: фильтровые, дисперсионные и интерференпионные.



Рисунок 1. Принцип работы гиперспектрометра

Анализ приборов рассматриваемого класса [2-5] показывает, что наиболее перспективными для космических гиперспектрометров являются два варианта принципиальной схемы:

Пространственное разрешение обеспечивается за счет построчного сканирования вдоль трека линейным полем зрения (pushbroom), а спектральное – за счет дисперсионных оптических элементов (решеток или призм).

2) Пространственное разрешение обеспечивается съемкой в кадровом режиме (framing), а спектральное – за счет использования перестраиваемого акустооптического фильтра.

Как показали предварительные оценки, к достоинствам первого варианта относятся высокая достоверность данных за счет физического пространственного совмещения спектральных каналов в одном маршруте и более высокая чувствительность. Преимуществами второго варианта являются малый вес прибора, возможность изменять набор длин волн спектральных каналов и высокое спектральное разрешение, а также простота изготовления оптических элементов. В качестве предпочтительного варианта нами выбрана принципиальная схема дифракционного pushbroom-гиперспектрометра.

Оптическая схема гиперспектрометра в этом случае включает два функциональных блока – входной объектив и спектрограф.

Для обеспечения требуемого пространственного разрешения и высокого отношения сигнал/шум входной объектив должен иметь диаметр входного зрачка не менее 120 мм, фокусное расстояние не менее 250 мм, коэффициент экранирования не более 0,5. Угол поля зрения объектива должен составлять не менее 3,5°. Спектральный коэффициент пропускания объектива должен быть также максимизирован. Зеркальный триплет позволяет выполнить все вышеперечисленные требования, поскольку он имеет практически постоянный коэффициент пропускания в широком диапазоне длин волн, свободен от центрального экранирования, устойчив к изменениям температуры, обладает широким (10÷12°) полем зрения при высоком качестве изображения, в т. ч. малой (менее 0,1%) дисторсии [6].

После рассмотрения ряда вариантов построения оптической схемы блока спектрографа в качестве предпочтительной была выбрана схема Оффнера [7]. Главные преимущества такой системы: использование только отражательных оптических элементов, высокая компактность при большом расстоянии между щелью и приемником. Отметим, что схема Оффнера нашла широкое распространение в гиперспектральных приборах с высоким пространственным и умеренным спектральным разрешением [8,9].

Для обеспечения требуемого разрешения



Рисунок 2. Принципиальная оптическая схема гиперспектрометра

в рабочем спектральном диапазоне с учетом свойств атмосферы целесообразно оптическую систему гиперспектрометра конструктивно разделить на два модуля, первый из которых работает в области 0,9-1,7 мкм, а второй – в области 2,0-2,4 мкм. Выбранная принципиальная схема оптического блока позволяет выполнить модули конструктивно идентичными, унифицировать их компоненты и облегчает согласование полей зрения модулей.

Таким образом, гиперспектрометр состоит из двух конструктивно идентичных механически сопряженных модулей, каждый из которых работает в одной спектральной области. Модуль содержит входной объектив 1, узел щели 2, спектрограф 3 и блок приемника 4 (рис. 2.).

Рассмотрим подробнее оптическую схему каждого из модулей и их конструктивную реализацию.

1.2. Разработка и моделирование оптической схемы гиперспектрометра.

Входные объективы обоих модулей гиперспектрометра выполнены идентичными и, как указано выше, представляют собой зеркальные триплеты без центрального экранирования. Каждый объектив состоит из трех асферических зеркал – двух вогнутых и одного выпуклого, вершины поверхностей которых лежат на общей оси. При этом вогнутые зеркала имеют внеосевые апертуры, а ось визирования составляет с осью центрировки объектива угол 14°, что позволяет избежать экранирования, повысив тем самым освещенность изображения. Первое зеркало имеет форму гиперболоида, второе – эллипсоида. Третье зеркало имеет квази-эллиптическую поверхность вращения высшего порядка, образующая которой описывается уравнением:

$$z = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2y^2}} + \sum_{i=1}^8 a_i y^{2i}.$$
 (1)

с – кривизна при вершине, *k* – коническая постоянная, *a* – коэффициенты асферики высших порядков, *y* – радиальная координата точки на поверхности.

Использование асферических зеркал позволяет достичь высоких показателей качества изображения при высокой апертуре и малых габаритах узла входного объектива. Фокусное расстояние объектива составляет 250 мм, относительное отверстие – 1:2,1, поле зрения 3,5°. Геометрические аберрации по всему полю зрения не превосходят 1,9 мкм, что для рассматриваемого спектрального диапазона соответствует дифракционному качеству изображения. Следует отдельно указать, что объектив свободен от астигматизма и дисторсии, проявление которых недопустимо в гиперспектральном приборе.

Оптические схемы блоков спектрографов двух модулей максимально унифицированы: их сферические зеркала идентичны, в обоих модулях используются дифракционные решет-



Концентрация энергии в изображении, формируемом гиперсперкторометором на длине волны 2,2 мкм

ки с частотой штрихов 24 штр/мм, отличающиеся глубиной профиля штриха и радиусом кривизны поверхности. Блок спектрографа работает с единичным увеличением и формирует спектральное изображение формата 15x1,25мм ($y \ge \lambda$) на фотоприемной матрице.

Оптимизация оптической схемы и определение основных показателей качества изображения проводились средствами программы Zemax. В качестве основного критерия качества изображения принималась концентрация энергии в изображении, измеряемая в пределах одного элемента приемника. В качестве примера приведем график концентрации энергии, рассчитанный для длины волны 2,2 мкм (рис. 3, выделенная кривая соответствует дифракционному пределу).

Для диапазона 0,9-1,7 мкм концентрация энергии в изображении в пределах площадки

30х30 мкм варьируются в пределах от 0,92 до 0,97 от дифракционного предела, для диапазона 2,0-2,4 мкм – от 0,96 до 0,99. Таким образом, разработанная оптическая схема обеспечивает целевые показатели разрешения.

Для демонстрации коррекции дисторсии и астигматизма в системе было проведено моделирование изображения сетки точек, покрывающих все поле зрение и весь рабочий спектральный диапазон прибора. На рис.4. приведены результаты моделирования для диапазона 2,0-2,4 мкм. Очевидно, что искажения изображения, способные вызвать перекрытие соседних спектральных каналов, полностью исключены.

Таким образом, разработанная оптическая схема спектрографа обеспечивает высокое качество изображения при заявленных значениях рабочего спектрального диапазона и поля зрения.



Рисунок 4. Дисторсия гиперспектрометра

Таблица 1.

| Параметр | Допустимое отклонение | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------|--|
| | 1-й модуль (0,9-1,7 мкм) | 2-й модуль (2,0-2,4 мкм) | |
| Согласование оптических блоков - по угловой координате, угл. мин. - по линейной координате, мкм | 1,3 50 | 1.3 30 | |
| Среднеквадратическое отклонение формы зеркал объектива, мкм | 0,1 | 0,08 | |
| Позиционирование зеркал объектива - по угловой координате, угл. мин. - по линейной координате, мкм | 1,3 – 4 30-120 | 0,6-2,3 30-150 | |
| Общая ошибка зеркала спектрографа, инт. колец | 4 | 3 | |
| Общая ошибка поверхности диф. решетки, инт. колец | 4 | 4 | |
| Позиционирование элементов спектрографа - по угловой координате, угл. мин. - по линейной координате, мкм | 0,8-1 30-80 | 1,0-1,1 30-80 | |

Требования к точности изготовления гиперспектрометра

2. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА

Для достижения указанных столь высоких функциональных показателей в реальном приборе, конструктивные параметры его оптической системы должны быть выполнены с большой точностью. Расчетные значения максимально допустимых погрешностей изготовления и сборки гиперспектрометра приведены в табл.1.

При эксплуатации гиперспектрометра отсутствует возможность его юстировки, следовательно, допустимые смещения и деформации элементов оптической системы под действием тепловых и механических нагрузок, действующих на прибор, должны быть фактически в несколько раз меньше приведенных выше значений. Для обеспечения высокой устойчивости конструкции каждого из модулей использована известная пара материалов с близкими температурными коэффициентами расширения: оптические детали изготавливались из стекла К8, а основные механические детали - из титана. При этом оптические системы входного объектива и спектрографа монтировались на отдельных титановых кронштейнах 1 и 3 (см. рис. 5). Входная щель и приемник

выполнены в виде отдельных юстируемых узлов (2 и 4 соответственно). Все перечисленные узлы устанавливаются на трех вертикальных шпангоутах 5. Точное взаимное позиционирование шпангоутов, несущих функциональные узлы, осуществляется с помощью продольных титановых лонжеронов 6. Корпус модуля закрывается боковыми панелями 7.

Следует отметить, что к узлу спектральной щели предъявляются жесткие требования: допустимое отклонение ширины щели равно 5 мкм, а допуски прямолинейности и параллельности граней щели составляют 1 мкм при высоте щели 15 мм. Выполнение указанных требований при использовании юстируемых ножей вызывает значительные трудности. Поэтому щель выполнена путем травления в тонкой пленке Сг, нанесенной на подложку из кварцевого стекла КУ. Полученная деталь устанавливается в оправу, имеющую продольную и поперечную подвижки и разворот относительно оси падающего пучка.

Разработанная конструкция изготовлена и испытана в ОАО «НПО ГИПО». Испытания подтвердили соответствие разработанных оптикомеханических модулей гиперспектрометра заявленным техническим характеристикам.



Рисунок 5. Конструкция гиперспектрометра

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований разработана оптическая схема и конструкция гиперспектрометра космического базирования для диапазонов 0,9-1,7 и 2,0-2,4 мкм. Использованные технические решения позволят регистрировать изображения подстилающей земной поверхности в пределах углового поля зрения 3,5° одновременно в 40 спектральных каналах. При этом обеспечивается пространственное разрешение на местности до 60 м (при высоте орбиты 500 км) и спектральное разрешение до 10 нм.

К отличительным особенностям разработанного прибора можно отнести его высокое пространственное разрешение, высокую апертуру, термоустойчивое конструктивное исполнение, а также минимальные массу и габариты.

Успешные испытания первых образцов оптико-механических модулей гиперспектрометра подтверждают правильность использованных конструкторских решений и концепции в целом. Полученный опыт может быть применен при разработке новой гиперспектральной аппаратуры различного назначения.

Список литературы:

1. *Aikio, M.* Hyperspectral prism-grating-prism imaging spectrograph [Text], PhD thesis, def. June 16th, 2001/Aikio Mauri - Linnanmaa, 2001. - 114p.

2. *Stuffler; T.* The Advanced German Hyperspectral Mission EnMAP [Text]/T. Stuffler, H. Kaufmann, S. Hofer et. al./ ," Proceedings of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE) – 2005 – P.524-527.

3. *Lockwood, R.* Advanced responsive tacticallyeffective military imaging spectrometer (ARTEMIS) system overview and objectives [Text]/ Ronald B. Lockwood, Thomas W. Cooley et. al./ Imaging Spectrometry XII, edited by Sylvia S. Shen, Paul E. Lewis, Proc. of SPIE - 2007 - Vol. 6661. – P. 666102-1

4. *Liao, L.* Performance Characterization of the Hyperion Imaging Spectrometer Instrument [Text]/L ushalan Liao, Peter Jarecke, Darrel Gleichauf and Ted Hedman/ Earth Observing Systems V, edited by William L. Barnes, Proceedings of SPIE – 2004 – Vol. 4135 – P.264-275.

5. *Fisher, J.* Comparisom of low-cost spectral sensors [Text]/ John Fisher, Marc Baumback et al./ Proceedings of SPIE – 1998 – Vol. 3438 – P.23-30.

6. *Minott, P.* Design Of A Wide-Angle All Reflective Triplet For An Orbiting Push-Broom Linear Array Scanner [Text]/Peter Minott/Proceedings of SPIE. International Lens Design Conference -1986 - Vol.0554 - P. 164-172.

7. *Lobb, D.* Imaging spectrometers using concentric optics [Text]/ D.R. Lobb/ Proceedings of SPIE – 1996 – Vol. 3118 – P.339-347.

8. *Mouroulis, P.* Low-Distortion Imaging Spectrometer Designs Utilizing Convex Gratings [Text]/ Proceedings of SPIE – 1999 – Vol. 3482 – P.594-601.

9. *Zhiping, H.* Research on method of geometry and spectral calibration of pushbroom dispersive hyperspectral imager [Text]/ Zhiping He ; Rong Shu ; Jianyu Wang/ Proc. SPIE, Multisp., Hypersp., and Ultrasp. Remote Sensing Technology, Techniques and Applications IV – 2012 – Vol. 8527 – P. 85270R.

КШМСА – КОМПЛЕКС ШИРОКОЗАХВАТНОЙ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЁМОЧНОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «РЕСУРС-П»

БАКЛАНОВ А.И.¹, СТРАТИЛАТОВ Н.Р.¹, ПОНИН О.В.², КЛЮШНИКОВ М.В.¹, ЗАБИЯКИН А.С.¹, АФОНИН А.Н.¹, БЛИНОВ В.Д.¹, ШАРОВ А.А.²

¹ – ОАО «Ракетно-Космический Центр - «Прогресс»

² - ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»

Проведен анализ опыта работы аппаратуры ДЗЗ «Ресурс-П» с использованием камер высокого и среднего разрешения в различных диапазонах и получение мультиспектральных изображений. Рассмотрены вопросы управления временем экспозиции по каждому спектральному диапазону с использованием волоконно-оптических линий связи.

Рассмотрены характеристики аппаратуры различных КА ДЗЗ и модернизационные возможности комплекса КШМСА.

Ключевые слова: гиперспектральная съемочная аппаратура, мультиспектральная аппаратура КШМСА, синтез цветного изображения, цифровая информация, качество изображения, модернизация.

Больше года на орбите работает российский космический аппарат дистанционного зондирования Земли «Ресурс-П», разработанный в ОАО «РКЦ «Прогресс» по заказу Федерального космического агентства [1]. Спутник оснащен комплексом из трех оптико-электронных инструментов, предназначенных для исследования природных ресурсов Земли и решения различных прикладных задач в интересах социально-экономического развития нашего государства. В состав полезной нагрузки входят: высокодетальная оптико-электронная аппаратура «Геотон-Л1», гиперспектральная съёмочная аппаратура (ГСА) и комплекс широкозахватной мультиспектральной аппаратуры высокого и среднего диапазона (КШМСА) (рис. 1).

Состав аппаратуры специально подобран таким образом, что обеспечивает получение взаимодополняющих панхроматических, мультиспектральных и гиперспектральных снимков с высокодетальным, высоким и средним разрешением в пределах спектрального диапазона 0,4-1,1 мкм. Соответственно, перечисленные инструменты могут работать как отдельно, так и совместно под управлением служебных систем КА. Комплекс КШМСА располагается на внешней оболочке космического аппарата, установлен на наружные конструкционные элементы ОЭА «Геотон-Л1». Оптические оси инструмента ориентированы параллельно и направлены на Землю.

Аппаратура КШМСА разработана в филиале ОАО «РКЦ «Прогрес» -НПП «ОПТЭКС». Её основное назначение: проведение наблюдений и получение информации о подстилающей поверхности Земли в интересах сельского хозяйства, землепользования, контроля состояния лесных и водных ресурсов, картографирования пахотных земель, составления прогнозов урожайности. Информации КШМСА может быть использована: для инвентаризации и мониторинга природных ресурсов (сельскохозяйственных и лесных угодий, пастбищ, районов промысла морепродуктов); создания земельного кадастра; хозяйственных процессов для контроля обеспечения рациональной деятельности в сельской, лесной, рыбной, водной и других отраслях хозяйства. Кроме того оперативные данные КШМСА окажут незаменимую пользу при мониторинге районов чрезвычайных



Рисунок 1. Внеший вид космического annapama «Ресурс-П» с оптико-электронной annapamypoй и служебными системами

ситуаций с целью выявления стихийных бедствий, аварий, катастроф, а также оценке их последствий; контроле загрязнения и деградации окружающей среды; контроле водоохранных и заповедных районов; оценке ледовой обстановки и др. События лета 2010 года показали важность наличия в отечественной орбитальной группировке спутников ДЗЗ оптико-электронных приборов ДЗЗ, способных оперативно получать и доставлять данные помогающие обнаруживать, контролировать и прогнозировать развитие лесных, степных и торфяных пожаров. Комплекс КШМСА, хотя и не имеет теплового канала, тем не менее, обладает необходимым для этого сочетанием хорошего пространственного разрешения и полосы захвата. Большая полоса захвата съёмочной аппаратуры и высокая динамика КА позволяют достичь даже на низкоорбитальном аппарате высокой периодичности съемки интересующих территорий. Это позволяет, при необходимости, использовать данные КШМСА даже в метеорологии для оценки облачности и состояния снежного покрова.

В соответствии состоявшей перед конструкторами задачами, комплекс широкозахватной мультиспектральной съёмочной аппаратуры - КШМСА, по сути, представляет собой не одно, а два устройства, расположенные на одном основании. Это оптико-электронная камера – съёмочная аппаратура высокого разрешения (ШМСА-ВР) и камера среднего разрешения (ШМСА-СР), работа которых может осуществляться как вместе, так и автономно под контролем единой системы (блока) управления. Электроника камер практически полностью унифицирована. Внешний вид оптико-электронных камер ШМСА-ВР и ШМСА-СР показан на рис. 2.

процессорный Резервированный блок управления принимает полетное задание от БКУ КА и осуществляет управление работой камер. Разворачивает циклограммы работ, включает и выключает в нужные моменты камеры, задает параметры и режимы работы каждой из оптико-электронных камер, принимает, анализирует и транслирует телеметрическую информацию, управляет резервами, формирует и передаёт информацию оперативного контроля. Управление осуществляется по каналу МКО. Две камеры и блок управления установлены на едином основании. В результате образуется монолитная конструкция КШМСА. Внешний вид КШМСА показан на рис. 3. На нем аппаратура снята в момент испытаний с использованием устройств равномерной засветки, которые установлены на оптическом входе объективов.

Каждая камера из камер КШМСА обеспе-



Рисунок 2. Камеры ШМСА-ВР и ШМСА-СР на стенде оптотехнических испытаний

чивает одновременную съёмку в панхроматическом и пяти узких (мультиспектральных) диапазонах: 0,43 - 0,70 мкм (панхром); 0,43 -0,51 мкм (синий); 0,51 - 0,58 мкм (зелёный) 0,60 - 0,70 мкм (красный); 0,70 - 0,90 мкм (ближний ИК1); 0,80 - 0,90 мкм (ближний ИК2). Камера высокого разрешения ШМСА-ВР имеет полосу захвата 96 км при разрешении (проекции пикселя) около 12 метров в панхроматическом канале и 24 метра в мультиспектральных каналах. Камера среднего разрешения ШМСА-СР имеет полосу захвата 480 км при разрешении (проекции пикселя) около 60 метров в панхроматическом канале и 120 метров в мультиспектральных каналах. Такой набор спектральных диапазонов и пространственного разрешения позволяет решать широкий класс задач от простого синтеза цветного изображения на основе данных красного (R), зелёного (G) и синего (В) каналов, до учета влияния атмосферы и изучения процессов вегетации и селекции растительности с использованием данных двух каналов в ближнем инфракрасном диапазоне. Наличие 2-х инфракрасных каналов повышает возможности аппаратуры и расширяет сферу применения получаемых с ее помощью снимков.

Совместная обработка данных панхроматического и мультиспектральных каналов позволяет получить мультиспектральные изображения с разрешающей способностью 12 м (для ШМСА-ВР) и 60 м (для ШМСА-СР).

Камеры ШМСА-ВР и ШМСА-СР осуществляют съёмку в режиме сканирования «pushbroom», использующем движение космического аппарата для обеспечения развертки по одной из координат. Электронная развертка по второй координате обеспечивается применением многоэлементными линейками фотоприемников на ПЗС. Каждая из используемых в камерах линеек в панхроматическом канале содержит около 8000 пикселей, размером 5 микрон. В мультиспектральных каналах размер пикселя 10 мкм, а длина строки линейки ПЗС около 4 тысяч пикселей.

Характеристики аппаратуры КШМСА и её отдельных камер высокого (ШМСА-ВР) и среднего разрешения приведены в табл. 1.

Электроника камер ШМСА-ВР и ШМСА-СР позволяет осуществлять гибкое управление временем экспозиции по каждому спектральному диапазону и частотой строк в широком диапазоне, адаптируясь к изменяющимся условиям освещенности и изменению дальности и скорости сканирования при кренах КА во время съёмки.



Рисунок 3. КШМСА на испытаниях

| Таблица 1. |
|----------------------|
| Характеристики КШМСА |

| Параметр | Значение параметра | | |
|---|---|---------|--|
| | IIIMCA-CP | ШМСА-ВР | |
| Зачетная высота орбиты, км | 475 | | |
| Разрешающая способность (проекция пикселя), м (ПХ / МС) | 60 / 120 | 12 / 24 | |
| Полоса захвата, км | 480 | 96 | |
| Количество элементов в строке (ПХ / MC) | 8000 / 4000 | | |
| Разрядность квантования, бит | 12 | | |
| Спектральные диапазоны, мкм | 0.43-0.70 (ПХ) 0.43-0.51 (В), 0.51-0.58(G), 0.60-0.70 (R), 0.70-0.90 (IR1) 0.80-0.90 (IR2) | | |
| Интерфейс передачи данных | Волоконно-оптический | | |
| Масса, кг | 19,7 | | |
| Габариты, мм | 494 x 260 x 500 | | |
| Энергопотребление, Вт | 41.0 | | |

Частота строк может изменяться в диапазоне 184-800 Гц в панхроматическом канале и 92-400 Гц в мультиспектральных каналах в аппаратуре ШМСА-ВР, и 36,8-160 Гц в панхроматическом канале и 18,4-80 Гц в мультиспектральных каналах в аппаратуре ШМСА-СР. Управление временем экспозиции осуществляется за счет использования электронного затвора в диапазоне 0.007 – 1 периода строки для панхроматического канала и 0.013÷0.05 – 1 периода строки для мультиспектральных каналов.

Характеристики используемых линеек ПЗС обеспечивают большой динамический диапазон выходного сигнала. На выход камер поступает 12-ти разрядная цифровая информация по каждому спектральному каналу. В связи с относительно небольшим выходным потоком видеоданных (по сравнению с ОЭА Геотон-Л1 с СППИ «Сангур-1У») никакое сжатие цифровой видеоинформации не используется. Это позволяет сохранить максимальное качество изображения. С учетом унификации каналов связи с остальной съёмочной аппаратурой КА «Ресурс-П» камеры КШМСА оснащены волоконно-оптическими линиями связи, что обеспечивает гальваническую развязку от другой аппаратуры, исключает её влияние на видеосигнал и позволяет получить максимальное качество изображения.



Рисунок 4. Объектив П-200



Рисунок 5. Объектив П-200

Таблица 2. Сравнение характеристик аппаратуры различных КА ДЗЗ

| КА | Высота | Разрешение, | Полоса | Количество | Разрядность |
|---------------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| | орбиты, км | М | захвата, км | диапазонов | данных |
| ШМСА-ВР (Ресурс-П) | 475 | 12 | 96 | 5 | 12 |
| ШМСА-СР (Ресурс-П) | 475 | 60 | 480 | 5 | 12 |
| ПСА (Монитор-Э | 540 | 8 | 96 | 1 | 10 |
| РДСА (Монитор-Э) | 540 | 20 | 160 | 3 | 10 |
| МСС (Канопус-В) | 510 | 10,5 | 20 | 4 | 8 |
| MSI (RapidEye) | 630 | 5 | 77 | 5 | 12 |
| DMC (малые KA SSTL) | 686 | 32 | 600 | 3 | 8 |
| МСУ-50 (Метеор-М) | 832 | 58 | 464 | 4 | н/д |
| МСУ-100 (Метеор-М) | 832 | 116 | 928 | 4 | н/д |
| (Космос-СХ) | н/д | 50 | н/д | 3 | н/д |

Оптико-электронные камеры состоят из одинаковых электронных блоков и отличаются объективами. В состав камеры ШМСА-ВР входит объектив П-200 (рис. 4) с фокусным расстоянием 200 мм и относительным отверстием 1:3. В состав камеры ШМСА-СР входит телецентрический объектив ТМ-40 (рисунок 5) с фокусным расстоянием 40 мм и относительным отверстием 1:4. Объективы TM-40 и П-200 были разработаны и изготовлены на Лыткаринском заводе оптического стекла (ОАО ЛЗОС) специально для использования в оптико-электронных камерах КШМСА космического аппарата «Ресурс-П». Объектив П-200 имеет следующие характеристики: фокусное расстояние – 200 мм; геометрическое относительное отверстие 1:3; угловое поле зрения 12°; линейное поле в пространстве изображений 46 мм; спектральный диапазон - 0,43-0,9 мкм; коэффициент передачи модуляции на пространственной частоте 100 1/мм не менее 0,3 в спектральном диапазоне 0,43-0,7 мкм; масса около 3,9 кг. Параметры телецентрического объектива ТМ-40: фокусное расстояние - 40 мм; геометрическое относительное отверстие 1:4; угловое поле зрения 56°; линейное поле в пространстве изображений 46 мм; спектральный диапазон – 0,43-0,9 мкм; коэффициент передачи модуляции на пространственной частоте 100 1/мм не менее 0,3 в спектральном диапазоне 0,43-0,7 мкм; масса около 1,1 кг. Наряду с высокой разрешающей способностью объективы П-200 и TM-40 имеют низкую дисторсию и высокую термостабильность. Последнее обеспечивает работу камер ШМСА-ВР и ШМСА-СР в сложных космических условиях без использования устройств полетной фокусировки. Качество изображения во всём диапазоне рабочих температур обеспечивается конструкцией термокомпенсаторов объектива и самих оптико-электронных камер. Примеры (фрагменты) получаемых цветных изображений на основе информации ШМСА-ВР и ШМСА-СР приведены на рисунке 6. Разрешение этих изображений составляет 24 м для ШМСА-ВР (вверху) и 120 м для ШМСА-СР (внизу).

Представляет интерес сравнение аппаратуры камер КШМСА с другими аналогичными приборами, размещенными на космических аппаратах ДЗЗ (табл. 2).

Из данной таблицы видно, что аппаратура КШМСА приблизительно соответствует аппаратуре ПСА и РДСА космического аппарата Монитор-Э, который уже прекратил свою работу. При этом по своим габаритам КШМСА существенно меньше, а демонстрируемые комплексом информационные характеристики несколько выше. Аппаратура МСС КА «Канопус-В», имея сравнимое разрешение, почти в 5 раз уступает КШМСА по полосе захвата. Сравнение с МСУ-50 (100) также в пользу КШМСА, которая превосходит МСУ-50 (100) по количеству спектральных каналов



Рисунок 6. Фрагменты изображений получены камерами ШМСА-ВР (вверху – г. Аба-кан, Хакасия разрешение 24 м) и ШМСА-СР (внизу – Камчатка, разрешение 120 м)



Рисунок 6 а. Фрагмент синтезированного («pan-sharpened») цветного изображения ШМСА-ВР с разрешением 12 м

и по эффективности RGB-цветосинтеза (соответствующие каналы расположены на одном кристалле). Аппаратура DMC по разрешающей способности не дотягивает до параметров КШМСА. Сравнение с аппаратурой MSI (КА RapidEye) показывает, что последняя имеет приблизительно вдвое лучшее пространственное разрешение при приблизительно равной полосе захвата.

Однако КШМСА имеет определённый потенциал для модернизации, в том числе и в сторону повышения разрешающей способности.

Использование единого многоэлементного фотоприемника ПЗС с длиной строки 8000 пикселей обеспечивает бесшовное изображение и высокую геометрическую точность. В процессе синтеза цветного изображения относительно просто решается вопрос совмещения изображений, полученных в панхроматическом и спектральных каналах. Взаимная привязка снимков и коррекция геометрии производится в ходе наземной обработки. В ходе летных испытаний были подтверждены характеристики по пространственному разрешению, полосе захвата. Снимки характеризуются большим динамическим диапазоном и высоким отношением сигнал/шум. Обработанные цветосинтезированные снимки КШМСА отличаются высокой детализацией и реалистичной цветопередачей. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение, позволяющие из комбинации панхроматического изображения с разрешением 12 м и мультиспектральных с разрешением 24 м получать синтезированное цветное изображение с разрешением 12 м (так называемый «pan-sharpened»). Фрагмент такого изображения показан на рис. 6.

В настоящее время аппаратура КШМСА находится в штатной эксплуатации и активно используется, каждый день в полетном задании присутствуют маршруты КШМСА. Качество снимком КШМСА, а так же широкие возможности их



Рисунок 7. Комплекс мультиспектральной широкозахватной аппаратуры КШМСА-2

применения, делают их очень привлекательными для потенциальных потребителей. Изготовлены и поставлены заказчику КШМСА для КА «Ресурс-П» №2 и №3.

КШМСА обладает большими модернизационными возможности. За счет минимальных доработок конструкции можно изменить состав комплекса КШМСА, заменив камеру ШМСА-СР второй камерой ШМСА-ВР. При этом получившаяся аппаратура сохранит все основные характеристика камеры ШМСА- ВР, а полоса захвата достигнет ~ 195 км. На основе разработанных камер ШМСА-ВР возможно построение комплекса, включающего в себя 3-6 таких камер (рис. 7). Это позволит получить высокопроизводительную обзорную аппаратуру с разрешением порядка 12 м и полосой обзора 290-570 км.

Специалистами НПП «ОПТЭКС» и ОАО ЛЗОС проработаны технические аспекты и показана возможность разработки и установки на КШМСА объектива с фокусным расстоянием 400 мм для улучшения разрешающей способности вдвое, а связанное с этим уменьшение полосы захвата компенсировать заменой камеры ШМСА-СР на вторую камеру ШМСА-ВР с таким же объективом. Полученная таким образом аппаратура не будет уступать аппаратуре MSI по всем основным характеристикам.

Список литературы:

1. А.Н. Кирилин, Р.Н.Ахметов, А.И. Бакланов, Н.Р.Стратилатов, В.М.Фёдоров, М.В.Новиков. Космический аппарат «Ресурс-П» // Геоматика (GEOMATICS) №4, 2010 с. 23-26.

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ШЛИФОВАННОЙ АСФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

АБДУЛКАДЫРОВ М.А., ПАТРИКЕЕВ В.Е., СЕМЕНОВ А.П.

ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: lastro@lzos.ru ; lastro-am@lzos.ru

Описан метод определения абсолютного профиля шлифованной асферической поверхности крупногабаритных астрономических зеркал с использованием линейного трехточечного сферометра, последовательного перемещаемого перпендикулярно направлению от центра до края детали. Описан способ определения вершинного радиуса. Приведены примеры успешного использования метода при изготовлении зеркал телескопов VST (VLT Survey Telescope), TNT (Thai National Telescope), VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy), DOT ARIES (Devasthal Optical Telescope for Aryabhatta Research Institute of Observational Sciences) и др.

Ключевые слова: телескопы, астрономические зеркала, контроль асферической шлифованной поверхности зеркала, линейный сферометр.

введение

При шлифовании рабочей поверхности и асферизации шлифованием используются как классические методы обработки, так и асферизация малым инструментом на станках с компьютерным управлением. Для создания управляющей программы обработки необходима информация о форме поверхности, т.е. топографическая карта. Ее можно получить различными способами.

1. С помощью 3-D машины, позволяющей непосредственно измерять форму рабочей поверхности в трехмерном измерении, сравнивать эту форму с требуемой и находить отклонения, т.е. строить карту отклонений от требуемой формы. Например, в ОАО ЛЗОС для деталей диаметром до 1400 мм с успехом используется 6-координатная измерительная машина KIM-1400, российского производ-

ства (Саратов), дающая точность отклонений от требуемой асферической поверхности в 2-3 мкм. Она построена по принципу гексапода с измерительной головкой [1]. Использование такой машины для измерений и построение карты поверхности весьма эффективно для процесса шлифования и особенно для асферизации внеосевых оптических деталей. Такая технология опробована и оправдала себя в конкретном производстве. Данным методом достигаются отклонения от требуемой формы поверхности менее 5-8 мкм.

2. Известны способы определения формы оптической поверхности с измерением отклонений от сферической с использованием механических измерений [2, 3, 4]. В профилометре (*the swing arm profilometer*) измерительную головку, закрепленную на поворотной наклонной штанге, последовательно перемещают механически по большим дугам



Рисунок 1. Профилометр для измерения профиля асферической поверхности

по контролируемой поверхности и с помощью самописца снимают показания индикатора измерительной головки (рис. 1). Профилометр с поворачивающейся рукой измеряет отклонения вдоль дуги на поверхности детали с центром окружности, расположенной на оси, проходящей через центр кривизны ближайшей сферы контролируемой поверхности. Измерения выполняются по нормали к поверхности, и, тем самым, измеряются отклонения асферической поверхности от сферы по дугам, проходящим через вершину асферической поверхности. Однако из соображений жесткости штанги и необходимой точности измерений способ применим для контроля зеркал относительно небольшого диаметра (не более 1 м).

3. Для деталей любых размеров, выпуклых и вогнутых, но осесимметричных, применим метод трехточечного линейного сферометра [1]. В основе методики использовано свойство асферических поверхностей: изменение радиуса на различных зонах поверхности. При установке линейного сферометра на асферическую поверхность между краевыми и центральной ножками измеряется стрелка прогиба, величина которой изменяется при перемещении сферометра.

4. Для деталей произвольной формы на стадии шлифования может быть использован

ИК-интерферометр в сочетании с зеркальным корректором волнового фронта [1]. Зеркальный корректор для ИК-диапазона (λ =10.6 мкм), например, использовался для автоматизированной асферизации главных зеркал проектов VST (VLT *Survey Telescope*) [6] и VISTA (*Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy*) [5, 7].

5. Также для измерения поверхностей любой формы деталей диаметром до 500 мм разработан специальный прибор бесконтактного измерения NANOMEFOS (Nanometer Accuracy Non-contact Measurement of Freeform Optical Surfaces) [8].

Есть и еще ряд новых методов.

Процесс обработки оптики является эффективным, когда используются оптимальные из перечисленных методов для каждого конкретного случая.

Задача поиска эффективного способа получения профиля асферической поверхности для высокоасферических поверхностей, когда ИК-интерферометр еще не представляется возможным использовать, а требуется получить как можно более подробный профиль асферической поверхности для использования программно-управляемой обработки, привели к необходимости модифицировать способ измерения профиля сферометром для крупногабаритных оптических деталей диаметром как до 1 м, так и для деталей диаметром до 6 м.

ТЕОРИЯ МЕТОДА

Для измерения профиля высокоточных асферических поверхностей крупногабаритных оптических деталей, в частности, зеркал телескопов, используется линейный трехточечный сферометр. С помощью трехточечного сферометра с двумя агатовыми ножками на концах и индикаторной головкой с ценой деления 0.1 мкм, установленной посередине, с базой сферометра, равной «а» (расстоянию между двумя крайними агатовыми ножками сферометра), измеряют стрелки прогиба вдоль диаметрального направления или по хорде, касательной к центральному отверстию на детали (для деталей с центральным отверстием). Сферометр последовательно



Рисунок 2. Сферометр для контроля профиля асферической поверхности

смещают на величину 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, проходят весь диаметральный отрезок или хорду с шагом в половину базы сферометра. При этом радиус детали (диаметр, хорду) разбивают на отдельные промежутки «а», укладывающиеся на полном радиусе детали. Сравнивают результаты с расчетными величинами стрелок прогиба для каждого положения сферометра и по данным измерениям строят относительный профиль отклонений от ближайшей асферической поверхности для выполнения процесса шлифования.

Дискретность построенного профиля составляет половину базы сферометра, уменьшение базы сферометра приводит к увеличению погрешности определения профиля. Для более точного построения профиля поверхности можно использовать сферометр с двумя, тремя и более индикаторными головками [9] (рис. 2). Точность измерений сферометра может достигать величины 0.2 мкм при базе сферометра до 1 м с определением профиля в 5-10 мкм (среднеквадратичное) и измерением радиуса кривизны крупногабаритного зеркала с точностью в 10 мм для радиуса в 30 м.

Практическое использование данного метода в реальных измерениях показало, что с увеличением базы сферометра существенно возрастают его собственные деформации, меняющиеся из-за изменения его наклона к горизонтальному положению при перемещении его вдоль диаметрального направления, что приводит к существенным погрешностям в измерениях и, соответственно, к существенным ошибкам в построении профиля.

предлагаемом способе определения В профиля шлифованной асферической поверхности также используется линейный трехточечный сферометр с базой «а» с индикатором посередине. Сферометр помещается в заранее рассчитанные точки. Обычно для устойчивости сферометра на вогнутой или выпуклой поверхности его снабжают хотя бы одной вспомогательной боковой регулируемой ножкой-упором. Эта боковая ножка позволяет регулировать наклон сферометра и устанавливать его по нормали к контролируемой поверхности. Сферометр обнуляется на эталонной поверхности с известным радиусом, близким к интервалу радиусов асферической поверхности. Устанавливают сферометр крайними ножками перпендикулярно диаметральному сечению в краевую зону детали с радиусом Ri (рис. 3), затем перемещают сферометр крайними ножками в зону

с радиусом $R_{i+1} = \sqrt{R_i^2 - (a/2)^2}$, в которой



Рисунок 3. Схема установки ножек сферометра на поверхности и схема для расчета установочных точек



Рисунок 4. Схема расположения индикатора

до этого располагалась центральная ножка с индикатором. Затем на основании геометрических соотношений строят абсолютный профиль отклонений поверхности от заданного (теоретического) профиля с требуемым вершинным радиусом и эксцентриситетом и необходимым допуском на них.

При таком методе измерений существенно увеличивается количество измеренных точек, т.е. мы получаем более подробную информацию о профиле поверхности, чем при продольных измерениях профиля, что важно для анализа профиля поверхности и выполнения процесса асферизации.

Сферометр с базой «а» (A₁ – B₁ на рис. 3), расстоянием «b» до 4-й боковой ножки от центральной (рис. 4), обеспечивающей нормальное к поверхности положение сферометра, помещают на эталонную поверхность, обнуляют, устанавливают крайними ножками на контролируемую деталь перпендику-



Рисунок 5. Схема опорных точек и отрезков

лярно диаметральному сечению и по нормали к поверхности (рис. 4) в первую краевую зону детали (в точи A_1, B_1 рис. 3, рис. 5) с радиусом RA_1 в плоскости XY, в которой отклонение профиля принимается равным $P_1 =$ 0. Снимают показания сферометра Δs_1 ,измер относительно эталонной поверхности в точке T, на зоне с расстоянием от центра

 $R_{A2} = \sqrt{R_{A1}^2 - (a/2)^2}$, в которой теоретическое значение должно быть $\Delta s_{2,\text{теор}}$. Определяется добавка к профилю $\Delta p_2 = \Delta s_{2,\text{измер}} - \Delta s_{2,\text{геор}}$ и отклонение профиля в точке $P_2 = P_1 + \Delta p_2$. Сферометр перемещают крайними ножками на зону, в которой располагалась центральная ножка. Снова выполняют измерения стрелки прогиба и определяют отклонения профиля в точке $P_{i+1} = P_i + \Delta p_i$ и процесс измерений продолжают до центра детали или до центрального отверстия $P_n = P_{n-1} + \Delta p_{n-1}$ и строят абсолютный профиль с отклонениями от поверхности с требуемым вершинным радиусом и эксцентриситетом.

 $\Delta s_{i,reop}$ определяется из уравнения асферической поверхности, которое в общем виде записывается следующим образом:

$$z = \frac{cS^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2S^2}} + A_1S^4 + A_2S^6 + A_3S^8 + A_4S^{10},$$
где $S^2 = x^2 + y^2;$

 $c=1/R_0$ – величина, обратная вершинному радиусу;

 $K=-e^2$, где e – эксцентриситет поверхности; A_1, A_2, A_3, A_4 – коэффициенты асферики для поверхностей более высокого порядка (выше 2-го).

Определяем значения z_{A1}, z_{A2}, z_{T2}, определяем стрелку с вычетом стрелки эталонной поверхности аrrow_{сферы}:

 $\Delta \mathbf{s}_{i,\text{reop}} = (\mathbf{z}_{A1} - \mathbf{z}_{T2} - \operatorname{arrow}_{c\phi e p \omega}) \cdot \cos(\alpha),$

где угол α - угол между вертикалью и нормалью к поверхности в измеряемой точке.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Реализация способа представлена на примере асферизации шлифованием и измерениях сферометром главного зеркала диаметром 3700 мм Devasthal Optical Telescope (DOT) for Aryabhatta Research Institute of Observational Sciences (ARIES) [10] со световым измеряе-

мым диаметром 3670 мм, вершинным радиусом кривизны асферической поверхности, равным 14639,0 мм, конической константой К=1,03296, диаметром отверстия 720 мм. Для измерений использовали линейный трехточечный сферометр с индикаторной головкой посредине с ценой деления 0.1 мкм, с базой «а» (расстояние между крайними ножками сферометра), равной 622 мм и боковой регулируемой по высоте вспомогательной ножкой, закрепленной сбоку индикатора на расстоянии 62 мм. Для обнуления индикатора было изготовлено контрольное эталонное зеркало с радиусом 14727,0 мм, учитывая что радиус ближайшей к асферической поверхности сферы равен 14700,2 мм. Асферичность профиля составляет 106 мкм.

Как уже отмечалось, при измерении сферометром вдоль диаметрального направления или вдоль хорды, с увеличением базы сферометра существенно возрастают его собственные деформации, меняющиеся из-за изменения его наклона к горизонтальному положению, что приводит к существенным погрешностям в измерениях и, соответственно, к существенным ошибкам в построении профиля. В этом способе трудно учесть такие погрешности наклона в двух плоскостях. В описываемом способе при измерениях сферометр устанавливается перпендикулярно радиальному направлению и имеет наклон только в одной плоскости. Изменения показаний сферометра от деформаций при наклоне определялись экспериментально и данная поправка вводилась в расчет. Например, в описываемом случае поправка при наклоне сферометра к вертикальному положению на 10° составляет 5 мкм.



Русунок 6. Результаты расчета профиля асферической поверхности

На рис. 6 приведены результаты расчета отклонений профиля по описанной методике, причем не от ближайшей поверхности, а от поверхности с требуемым вершинным радиусом и эксцентриситетом. $Y_{\rm тр. ноги}, Z_{\rm тр.}$ ноги – координаты третьей, вспомогательной ножки на поверхности детали в мм (начало координат в точке вершины детали, координата У перпендикулярна оптической оси Z). $\Pi C_{\text{теор.}}$ и $\Pi C_{\text{факт.}}$ – теоретические и фактически измеренные отклонения стрелки прогиба от эталонной сферической поверхности в мкм, Y- расстояние от центра детали в мм, $Z_{\text{теор.}}$ и Z_{факт} – теоретическое и фактическое значение координаты Z. Асф. Теор. и Асф.факт. - теоретическое и полученное фактическое значение асферичности от ближайшей сферы (мкм). Дельта асф. – искомые нормальные отклонения асферической поверхности от теоретической (мкм). В последней графе Попр.деф. – поправка в показаниях сферометра (мкм), учитывающая деформации сферометра при наклонном его положении относительно рабочей поверхности. Данная поправка определяется экспериментально для различных углов наклона сферометра а (рис. 4) относительно вертикального положения. Учет данной деформационной поправки



Рисунок 7. Интерферограмма волнового фронта после предварительной полировки поверхности зеркала

значительно повышает точность измерений.

Для снижения погрешности измерений:

 измерения выполняются от эталонной сферической поверхности с измеренным радиусом кривизны;

- измерения повторяются несколько раз в каждом положении и усредняются;

- измерения выполняются в нескольких диаметральных сечениях на поверхности детали;

- измерения выполняются набором сферометров с разной базой;

- все измерения выполняются с учетом поправки за счет деформаций сферометра при наклонном расположении на поверхности измеряемой детали. Без учета данной погрешности ошибка в описываемом случае может достигать 50 мкм (!)

Суммарная погрешность определения профиля определяется суммой погрешностей каждого измерения. Если каждое измерение выполнено с точностью 1 мкм, то в рассматриваемом случае (18 стоянок) суммарная максимальная и наименее вероятная погрешность будет составлять 18 мкм, если погрешность измерений 0.2 мкм, то суммарная погрешность определения профиля меньше 4 мкм.

На рис. 6 приведен усредненный профиль и отклонения составляют около 6 мкм. Отклонения фактические включают астигматизм, асимметрию и другие остаточные ошибки. Поэтому после предварительной полировки поверхности был выполнен интерферометрический контроль с СGH – корректором и получены подтверждающие результаты.

Фактические измерения вершинного радиуса поверхности дали величину $R_0 = 14639 \pm 5$ мм (требуемое значение ± 7 мм), что составляет величину отклонения от заданного значения 0,03 %. Ошибка формы поверхности составила 16 мкм. Интерферограмма волнового фронта после предварительной полировки поверхности зеркала представлена на рис. 7.

Следует особо отметить, что после контроля сферометром и предварительной полировки контроль осуществлен и ИК-

интерферометром с корректором и CGHкорректором в видимом диапазоне [11]. И ИК-корректор, фактически, не понадобился. Таким же образом выполнялась асферизация зеркала проекта TNT (Thai National telescope, Australia – Thailand) диаметром 2400 мм с асферичностью в 160 мкм, а также ряд других крупных проектов изготовления главных и вторичных зеркал.

Результаты, приведенные на рис. 6 и 7, показывают высокую эффективность и надежность предложенного метода измерения профиля шлифованной асферической поверхности и практически подтверждают достижение технического результата: построение абсолютного профиля отклонений формы асферической поверхности оптической детали от требуемой теоретической с необходимой точностью (отклонение вершинного радиуса от заданного менее 0,03-0,05 %) и достижение данного значения вершинного радиуса в процессе формообразования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предложенном методе измерения профиля асферической поверхности при перпендикулярном его расположении диаметральному сечению и последовательном перемещении его от центра к краю удается получить подробный профиль абсолютных отклонений асферической поверхности от требуемой с точностью в 5-10 мкм и получить требуемый вершинный радиус с точностью менее 0.03-0.05 % от заданного. Успешная реализация метода была показана при асферизации зеркал по проектам VST, TNT, VISTA, DOT ARIES и др.

Список литературы:

1. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Pridnya V.V. Methods of fabrication and testing of unique large size optics in LZOS, JSC (VST, VISTA and other projects)// Proceedings of SPIE. 2012. Vol. 8450. P. 84504T.

2. *Burge J.H.* Measurement of large convex aspheres// Proceedings of SPIE. 1996. V. 2871. P.362-373 (1996).

3. *Smith B.K., Burge J.H. and Martin H.M.* Fabrication of large secondary mirrors for astronomical telescopes// Proceedings of SPIE. 1997. V.3134. P. 51-61.

4. *Burge J. H., Su P., Zhao C.* Optical metrology for very large convex aspheres// Proceedings of SPIE. 2008. V.7018. P.701818-1 - 701818-12.

5. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P., Patrikeev V.E., Pridnya V.V. M1 and M2 mirror manufacturing for ARIES project: current status// Proceedings of SPIE. 2010. V.7739. P.773907.

6. Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A. Manufacturing of primary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST// Proceedings of SPIE. 2001. V.4451. P.131-137.

7. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Sharov Y.A. Manufacturing of secondary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST// Proceedings of SPIE. 2001. V.4451. P.138-144.

8. *Henselmans R., Rosielle, P.C.J.N., Steinbuch, M., Saunders, I.J.* Nanometer Accuracy Noncontact Measurement of Freeform Optical Surfaces// 2005. Philips Precision Technology Conference. P.117 – 121.

9 *Bely P. Y.* The Design and Construction of Large Optical Telescopes// 2002. Springer. P.167 .

10. *Semenov A.P.* Accomplished the task of production of the primary and secondary mirrors of Devasthal Optical Telescope under the project ARIES (India, Belgium, Russia): fabrication features// Proceedings of SPIE. 2012. V.8450. P.84504R.

11. Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Semenov A.P. Interference testing methods of large astronomical mirrors base on lenses and CGH wavefront correctors// Proceedings of SPIE. 2010. V.7739. P.77390P.

МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ УНИКАЛЬНЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ И КОСМИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ ТЕЛЕСКОПОВ В ОАО ЛЗОС

СЕМЕНОВ А.П., АБДУЛКАДЫРОВ М.А., БЕЛОУСОВ С.П., ПАТРИКЕЕВ В.Е., ПРИДНЯ В.В.

ОАО "Лыткаринский завод оптического стекла", Лыткарино, Московская обл.

E-mail: lastro@lzos.ru, lastro-am@lzos.ru

Рассмотрены методы формообразования асферических поверхностей крупногабаритных астрономических и космических зеркал от стадии шлифования до финишной полировки с использованием программно-управляемых систем обработки и контроля на всех стадиях изготовления.

Ключевые слова: астрономические и космические зеркала, формообразование асферических поверхностей, шлифование и финишная полировка.

введение

В ОАО ЛЗОС за последние два десятилетия разработаны компьютерно-управляемые методы обработки крупногабаритной астрономической и космической оптики, которые позволили изготовить зеркала для крупных российских и международных проектов, включая зеркала для сети телескопов LGOGT (Las Cumbres Observatory Global Telescope Network)1 с диаметром главных зеркал до 2 м, телескопа TNT (Thai National telescope, Australia – Thailand)1 с главным зеркалом диаметром 2.4 м, зеркало телескопа DOT ARIES (Devasthal Optical Telescope, DOT, for Aryabhatta Research Institute of Observational Sciences, ARIES)2 с зеркалом диаметром 3.7 м, оптику обзорных телескопов VST (VLT Survey Telescope)3,4 и VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy)5,6,7. Зеркала этих телескопов имеют значительную асферичность и высокую апертуру, что создает значительные трудности не только при обработке данных зеркал, но и при их контроле. Для успешного изготовления таких оптических элементов необходим контроль процесса производства

оптики на всех стадиях обработки, начиная с предварительного шлифования и кончая финишной доводкой.

В процессе шлифования поверхности выполняется контроль ее набором сферометров и ИК-интерферометром, затем в видимом диапазоне с линзовыми корректорами и корректорами на базе дифракционных оптических элементов (ДОЭ-корректорами или CGH-correctors, Computer-generated hologram)^{1,2}. При этом выполняются измерения радиуса обрабатываемой поверхности с лазерным трекером. Такие методы позволили получить высокоточные зеркала, которые сейчас успешно функционируют в действующих телескопах.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ И ОБЛЕГЧЕННОЙ СТРУКТУРЫ

В настоящее время в оптической промышленности для изготовления астрономических зеркал используются различные материалы, такие как Zerodur[®], Astrositall[®], ULE[®], карбид кремния и его модификации, бериллий и др. Но все же стеклокерамические материалы Zerodur[®], Astrositall[®], ULE[®] являются наиболее распространенными. Именно из данных



Рисунок 1. Пример облегченного космического зеркала диаметром 1200 мм. Облегчение около 70%

материалов изготовлены зеркала крупнейших в мире телескопов.

ОАО ЛЗОС имеет значительный запас заготовок из Астроситалла[®] для изготовления как отдельных зеркал, так и составных сегментированных зеркал. Современное оборудование и инструменты позволяют создавать все основные геометрические формы заготовки (форму эллипса, многогранника и др.), могут выпускаться заготовки с заложенными сферическими поверхностями с двух сторон заготовки.

Технологический процесс обработки заготовок включает в себя изготовление окончательных геометрических параметров заготовки, шлифование задней базовой поверхности, фрезерование пазов, фасок, фрезерование центрального отверстия и облегченной структуры. Точность изготовления геометрической структуры достигает величины 20 мкм на диаметре до 4000 мм (рис. 1).

ОАО ЛЗОС может производить как заготовки из материала Астроситалл[®], так и готовые зеркала, причем не только из Астроситалла[®], но и из других материалов, включая нетрадиционные. Обработка геометрических параметров заготовок ведется с применением станков с компьютерным управлением в декартовой и полярной системах координат, с использованием набора алмазных инструментов. Облегчение заготовок выполнялось на деталях диаметром до 2 м. Также выполняется закладка сферической поверхности фрезерованием с компьютерным управлением.

ШЛИФОВАНИЕ И АСФЕРИЗАЦИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С КОНТРОЛЕМ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ СФЕРОМЕТРАМИ И ИК-ИНТЕРФЕРОМЕТРАМИ

При шлифовании рабочей поверхности и асферизации шлифованием, если асферичность поверхности достаточно велика, используются как классические методы, так и асферизация малым инструментом на станках с компьютерным управлением. Для компьютерного управления шлифованием и полированием используется целая серия станков, произведенных специально для данной цели: АД-1000, АД-2000, АД-4000, КУ-168АМД и их модификации (рис. 14, 15, 17), которые предназначены для шлифования и полирования деталей, соответственно диаметром до 1000 мм, 2000 мм, 4000 мм и 6000 мм. Эти станки портального типа управляют инструментом либо в декартовой системе координат, либо в полярной.

Для создания управляющей программы обработки необходима информация о топографии поверхности. Ее можно получить тремя разными способами.

- Для деталей диаметром до 1400 мм механическим способом с помощью 6-координатной измерительной машины КІМ-1400, российского производства (Саратов), дающей точность отклонений от требуемой асферической поверхности в 2-3 мкм (рис. 2). Использование такой машины для измерений и построение карты поверхности весьма эффективно для процесса шлифования и особенно для асферизации внеосевых оптических деталей. Такая технология опробована и оправдала себя в конкретном производстве. Данным методом достигаются отклонения от требуемой формы поверхности менее 2-3 мкм.

- Известны способы определения формы оптической поверхности с измерением отклонений от сферической^{8,9}. Для деталей любых размеров, выпуклых и вогнутых, но осесимметричных, применим метод трехточечного линейного сферометра. В основе методики использовано свойство асферических поверхностей: различный радиус кривизны на различных зонах поверхности. При установке линейного сферометра на асферическую поверхность между краевыми и центральной ножками измеряется стрелка прогиба, величина которой изменяется при перемещении сферометра. На рис. 3 отрезками прямых линий показано положение линейного сферометра с определенной базовой длиной, ножки которого установлены в точки зональных окружностей. Сферометр устанавливается последовательно таким образом, чтобы центральная измерительная ножка стояла на одной окружности, а внешние ножки - на следующей. Исходя из этого, рассчитывается переменный шаг перемещений сферометра вдоль радиального направления. Для калибровки измерений используется эталонное зеркало с точно измеренным радиусом,



Рисунок 2. Измерительная машина КИМ-1400



Рисунок 3. Положение сферометра на детали

чтобы получить абсолютные измерения профиля сферометром.

По результатам измерений на основании геометрических соотношений строится профиль асферической поверхности. Измерения сферометром выполняются на предварительной стадии обработки до тех пор, пока не будет получено интерференционное изображение волнового фронта с использованием зеркально-линзового или линзового корректоров и точно измерен фактический радиус кривизны поверхности. Погрешность отклонений зонального профиля от теоретического также достигает 2-3 мкм. Данный метод позволяет также с высокой точностью получить заданный вершинный радиус (менее 2-3 мм на радиусе до 15 м и менее 1-2 мм на радиусе менее 10 м для деталей диаметром более 1 м.

С использованием данного метода была выполнена асферизация всех крупных оптических деталей, включая главные и вторичные зеркала проектов VST, TNT, ARIES, VISTA и т.д. При этом для высокоапертурных деталей при измерении сферометром учитываются поправки, связанные с наклоном сферометра. Точность измерений профиля по размаху в таком методе может достигать величины 2-3 мкм.

- И, наконец, для деталей произвольной формы, на стадии шлифования может быть использован ИК-интерферометр в сочетании с зеркальным корректором волнового фронта¹⁰. Зеркальный корректор для ИК-диапазона



Рисунок 4. Контроль формы поверхности VST с ИК- интерферометром

(λ=10.6 μm), например, использовался для автоматизированной асферизации главных зеркал проектов VST³(рис. 4) и VISTA^{2,4}.

Корректор на базе СGH использовался для контроля шлифованной поверхности зеркала проекта ARIES M1 диаметром 3700 мм (рис. 5). Он имеет диаметр 136 мм и центральное отверстие для прохождения сферического волнового фронта от интерферометра. Волновой фронт дважды отражается от поверхности зеркала, в результате чего ошибки волнового фронта удваиваются. На рис. 6 показан процесс управляемого шлифования рабочей поверхности, а на рис. 7 ИК-интерферометр для контроля зеркала ARIES M1 и интерферограмма волнового фронта.

КОНТРОЛЬ И ОБРАБОТКА ОПТИЧЕСКИХ ПО-ВЕРХНОСТЕЙ НА СТАДИИ ПОЛИРОВАНИЯ

Как на стадии шлифования, так и на стадии полирования, и особенно на стадии финишной доводки зеркала, оно базируется либо на штатной разгрузке, на которой будет использоваться в телескопе, либо на мембраннопневматической технологической разгрузке. Так, например, зеркало TNT диаметром 2.4 м обрабатывалось на штатной механической разгрузке, а зеркала VST, VISTA на мембранно-пневматической.

Мембранно-пневматическая оправа (рис. 8)



Рисунок 5. СGH-корректор для контроля главного зеркала в ИК-диапазоне

позволяет производить как формообразование зеркала на шлифовально-полировальном и доводочном станке, так и кон-троль формы оптической поверхности в вертикальном стенде^{2,3}. Она является частью стенда вертикального контроля и входит в состав контрольно-технологического оборудования для обработки и контроля формы поверхности оптической детали. Система технологической разгрузки зеркала должна обеспечить деформационные изменения формы поверхности зеркала в процессе технологического и аттестационного контроля в допустимых пределах, меньших по амплитуде, чем требуемый размах ошибок поверхности обрабатываемого зеркала.



Рисунок 6. Автоматизированное шлифование поверхности с контролем ИК-интерферометром



Рисунок 7. ИК-интерферометр с СGH-корректором

Мембранно-пневматические элементы оправы несут нагрузку на опору до 100 кг и погрешность разгружающих усилий торцевой разгрузки не более ±10 г. Разгрузочная оправа снабжена системой автоматической стабилизации положения зеркала на оправе при изменении внешних условий (атмосферного давления, влажности) во время контроля формы поверхности, что обеспечивает неизменное состояние формы поверхности с необходимой точностью.

Вторичные зеркала разгружаются, как правило, в штатной оправе, в которой они будут использоваться в телескопе. Выпуклые вторичные зеркала телескопов контролируются в ОАО ЛЗОС с использованием сфер Хиндла, которые изготавливаются из Астроситалла®. Контроль выполняется, как правило, в



Рисунок 8. Зеркало М1 на технологической оправе в процессе контроля и обработки





Рисунок 9. Линзовый корректор волнового фронта

вертикальном стенде, когда вторичное зеркало в своей разгрузке располагается рабочей поверхностью вниз над сферой Хиндла. Ось зеркала и сферы Хиндла вертикальные^{2,7}.

Для контроля вогнутых асферических поверхностей используются линзовые или зеркально-линзовые корректоры волнового фронта или CGH-корректоры (CGH-Computer Generated Hologram) с CGH-имитаторами зеркала. Причем CGH-имитаторы зеркала позволяют проконтролировать и линзовый корректор волнового фронта. Такой перекрестный контроль оптической поверхности позволяет избежать ошибок при изготовлении зеркала и получить правильные значения



Рисунок 10. Зеркально-линзовый корректор волнового фронта

вершинного радиуса и эксцентриситета рабочей поверхности¹.

Так, например, при изготовлении зеркала VISTA М1 для контроля использовались два корректора разной конструкции – линзовый и зеркально-линзовый⁶. Асферичность зеркала диаметром 4100 мм около 850 мкм.

Первый корректор является линзовым и содержит три линзы, преобразующие плоский волновой фронт в сферический. Интерферометр типа Тваймана-Грина (рис. 9) содержит корректор, плоскую пластину с эталонным клином и объектив. Максимальный размер линз - около 300 мм.

Второй корректор - зеркально-линзовый, состоит из четырех зеркальных поверхно-



Рисунок 11. Расчет съема материала в процессе обработки поверхности оптической детали

стей и фокусирующей линзы (рис. 10). Диаметр наибольшего из зеркал равен 430 мм.

Наибольшая сложность при изготовлении корректоров состояла в том, чтобы обеспечить изготовление и измерение параметров линз и зеркал с точностью 2-5 мкм (короткие радиусы поверхностей, толщины линз, разнотолщинность), выставить с такой же точностью воздушные промежутки, убрать наклоны поверхностей в процессе юстировки и получить высокую точность изготовления самих поверхностей. Важность всех параметров корректора, влияющих на результирующее оптическое качество, настолько высока, что неоднородности в материале линз могут существенно исказить форму получаемого волнового фронта. Поэтому в заготовках линз исследовалась однородность стекла. Результаты определения однородности в заготовках показали, что она лучше, чем 0.3 · 10⁻⁶ ÷ 0.5 · 10⁻⁶, что достаточно для выполнения требований спецификации на корректоры волнового фронта, с учетом всех остальных допусков на конструктивные параметры корректора, чтобы получить требуемую точность оценки формы волнового фронта главного зеркала.

Несмотря на тщательное измерение всех параметров и выставление воздушных промежутков в корректорах, необходимо было проверить форму создаваемого ими волнового фронта, поскольку все параметры корректора изготавливались на пределе технологических возможностей. Для проверки корректоров Институтом автоматики и электрометрии (Новосибирск, Россия) был успешно изготовлен СGH-имитатор зеркала диаметром 159 мм. Изготовление такого имитатора само по себе является весьма непростой задачей.

Таким образом, комбинированное использование корректоров волнового фронта и измерительных машин на стадии управляемого процесса шлифования оптических деталей ускоряет процесс асферизации крупногабаритной оптики, а использование линзовых корректоров и CGH-корректоров волнового фронта для полированных поверхностей в дополнении с CGH-имитаторами зеркала позволяет гарантированно получить требуемые



Рисунок 12. Прямой контроль первых сегментов в камере высотой 70 м. Точка контроля располагается на расстоянии 40 м от сегмента зеркала

параметры асферической поверхности (вершинный радиус, коническая константа и т.д.) с требуемыми допусками в соответствии со спецификацией.

Совершенствование технологии формообразования в настоящее время идет по ряду направлений. Но наиболее эффективными для крупногабаритной оптики в настоящее время являются три способа: компьютерное управление смоляным или синтетическим полирующим инструментом, ионно-лучевая полировка и магнитореологическая полировка. А для деталей диаметром более 2-х метров только первая. Все остальные способы требуют своего дальнейшего развития.

Основные направления в развитии технологий полирования в последнее время направлены на то, чтобы обработать высокоапертурное и, соответственно, высокоасферическое зеркало или линзу, получив при этом малую мелкоструктурную ошибку, которая определяется среднеквадратичным наклоном отраженных от зеркала лучей (RMS Slope), измеряемым в угловых секундах.

Программный комплекс содержит комплект подпрограмм различного назначения, обеспечивающих проведение автоматизированного технологического процесса, расчет топографии оптической поверхности по результатам интерференционного контроля, расчет съема материала заданным набором полировальников, расчет траектории движения полировальников по детали, расчет корректирующих технологических параметров, оптимизацию процесса формообразования, вывод управляющих программ для компью-



Рисунок 13.

Интерферограммы волнового фронта: слева - с выделением регулярных ошибок и собственной ошибки корректора волнового фронта, справа - реальная интерферограмма на малом количестве полос



Рисунок 14. Процесс полировки зеркала диаметром 6 метров БТА на станке КУ-168АДМ

терного управления движением полирующего инструмента.

В ОАО ЛЗОС в технологическом процессе формообразования малыми инструментами используются полировальники различного диаметра в одном сеансе обработки (рис. 14,15,17). Комбинированное использование серии инструментов позволяет устранять последовательно ошибки от низкочастотных до высокочастотных.

Для увеличения производительности съема на поверхностях с высокой асферичностью используется принудительное сдерживание инструмента от вращения вокруг своей оси, чтобы профиль съема соответствовал тре-



Рисунок 15. Финишная полировка зеркала диаметром 3700 мм на станке с компьютерным управлением

буемому в меридиональном и сагиттальном сечениях. В этом случае можно использовать инструмент достаточно большого размера, который притирается к асферическому профилю переменного радиуса на всей поверхности инструмента.

Для создания съема материала на поверхностях со значительной кривизной используется станок с наклонной полирующей головкой для обеспечения прижима полирующего инструмента по нормали к рабочей поверхности (рис. 17).

Моделирование процесса съема материала с поверхности выполняется таким образом, чтобы материал снимался со всей поверхно-



Рисунок 16. Юстировка оптических элементов с внеосевой асферикой с использованием гексапода и лазерного трекера АРІТЗ



Рисунок 17. Финишная полировка зеркала с наклоном стола для обеспечения работы инструмента по нормали к зеркалу



Рисунок 18. 1- нуль-корректор; 2- верхняя марка; 3- нижняя марка на подставке; 4- имитатор вершины; 5- шток (в составе имитатора); 6- измеряемое зеркало; 7- оправа, 8- лазерный трекер

сти пропорционально величинам отклонений профиля от самой глубокой ямы на поверхности (рис. 11). Т. е. там, где максимальный бугор, там и максимальный съем. Такой способ распределения работы по съему материала с поверхности позволяет получать гладкие оптические поверхности с минимальным RMS Slope, включая и краевые области на детали. В качестве примера на рис. 12 приведены интерферограммы двух сегментов из 40 изготовленных для составного сферического зеркала MB телескопа LAMOST11. Размеры сегментов по диагонали 1100 мм. Зеркала изготовлены из материала Zerodur[®]. Контроль сегментов выполнялся в вертикальном стенде с линзой Физо диаметром 1200 мм. Высота контрольного стенда – 11 метров, а радиус кривизны сегментов – 40 метров.

На рис. 13 приведены интерферограммы волнового фронта главного зеркала телескопа VISTA диаметром 4100 мм и асферичностью около 850 мкм⁶: слева - с выделением регулярных ошибок, дисторсионного искажения изображения корректора и собственной ошибки корректора волнового фронта, полученной по результатам построения топографической карты поверхности, а справа - реальная интерферограмма на малом количестве полос. На ней видна остаточная расфокусировка и зональная ошибка, эквивалентная остаточной зональной ошибке линзового корректора волнового фронта, которая вычиталась из суммарного волнового фронта.

Для измерений вершинного радиуса оптической поверхности используется лазерный трекер. Принципиальная схема представлена на рис. 18. Радиус R₀ зеркала определяется по формуле:

$$R_0 = C + h - S'F'$$
,

где С - линейный размер, измеряемый трекером между площадкой на штоке имитатора вершины и первой линзы корректора, или голограммой ДОЭ-корректора;

h – измеренное значение штока имитатора вершины;

S'F' – расчетное значение отрезка от вершины последней линзы 0-корректора до точки пересечения параксиального луча с оптической осью (определяется в программе "ZEMAX").

Таким образом, ОАО ЛЗОС использует самые современные средства контроля оптики, включающие машины 3D, лазерный трекер, системы позиционирования с использованием гексаподов, комплект интерферометров с элементами микроподач, интерферометры с линзовыми корректорами производства ОАО ЛЗОС и ДОЭ-корректорами производства Института автоматики и электрометрии СО РАН, современное программное обеспечение для обработки интерферограмм и для оптических расчетов, включая программу ZEMAX. И это лишь краткий перечень имеющегося оборудования и технологий.

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ СЛОЖНОСТИ ИЗГОТОВ-ЛЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Для оценки степени сложности изготовленных поверхностей воспользуемся графиком (рис. 19), приведенным Р. Dierickx в 1999 году12, дополним ее данными последнего десятилетия и укажем на ней положение обработанных в ОАО ЛЗОС главных и вторичных зеркал по основным проектам. График показывает степень сложности изготовленного зеркала в зависимости от параметра *dy* и достигнутого качества обработки RMS(W):





Оптическое качество, полученное на крупногабаритных оптических зеркала за последние 40 лет



Рисунок 20. Градиент асферичности для зеркал ряда телескопов

$$dy=8N^3/k$$

где N – апертура (afocal ratio) оптической поверхности, а k – коническая константа. Таким образом, получается, что чем ближе точка на графике находится к началу координат, тем сложнее изготовленная поверхность.

На графике представлены следующие обозначения.

◆ - зеркала телескопов, изготовленные до 1985 года (Wavefront RMS error (nm) Pre-1985),

■ – зеркала телескопов с пассивной оптикой (Wavefront RMS error (nm) Passive),

 \blacktriangle – зеркала телескопов с активной оптикой (Wavefront RMS error (nm) Active),

 сегменты телескопа Кеск, включая сегменты, обработанные с использованием ионной полировки (Wavefront RMS error (nm) Segment, Wavefront RMS error (nm) Segment IB. All Keck data assume most difficult segment),

• – зеркала наиболее важных телескопов, изготовленные в ОАО ЛЗОС за период с 1990 года.

Таким образом, развитие технологии формообразования оптических поверхностей с использованием новых технологических приемов и компьютерного моделирования процесса обработки, а также развитие контрольного оборудования, включающего линзовые корректоры и синтезированные голограммы, привело к существенному прогрессу в получении крупногабаритных оптических зеркал с фокальным отношением F/1 с диаметром зеркал до 8 м.

На рисунке 20 представлен график максимального градиента асферичности в мкм/мм для главного (ось абсцисс) и вторичного (ось ординат) зеркал телескопов:Треугольники – ряд зарубежных проектов по изготовлению оптики телескопов Δ :

Zeiss-600 (0.06, 0.09), Астрон (0.10, 0.17), ZTSh (0.07, 0.11), 4-meter Kitt Peak National Obs. (0.19, 0.31), T-170M (0.34, 0.53), Hubble (0.32, 0.54), SDSS (0.45, 1.30), Pan-STARRS (0.57, 1.32), WIYN (0.78, 1.33).

Кружками обозначен ряд выполненных в ОАО ЛЗОС проектов по изготовлению оптики различных телескопов, в основном - в последнее время. Точки, лежащие на оси абсцисс – не изготавливали вторичное зеркало для данного проекта, только главное зеркало.

Как видно из данного графика, комплект оптики телескопа VISTA по сложности изготовления, по градиенту асферичности, существенно превосходит все предыдущие варианты главных и вторичных зеркал. В табл. 1 представлены параметры градиента для зеркал, изготовленных в ОАО ЛЗОС.

| Телескоп/ лиаметр главного зеркала | Параметры |
|---|------------|
| Testeekon, Anamerp mabriero sepkasia | градиента |
| NOA (Astronomical Institute National Observatory of Athans Frances)/2200 var | 0.28.0.40 |
| NOA (Astronomical institute - National Observatory of Attens, i pequa)/ 2200 MM | 0.28 0,49 |
| VST (VLT Survey Telescope, Osservatorio Astronomico di Capodimonte Napoli)/ | 0.65, 1.44 |
| 2650 мм | |
| 23 комплекта для 1-метровых телескопов LCOGT (Las Cumbres Observatory | 0.25 0.45 |
| Global Telescope Network, США, Великобритания) | |
| Комплект оптики с главным зеркалом 1600 мм для COREX | 0.45 0.65 |
| Параболическое зеркало ОС диаметром 3190 мм | 0.46 - |
| Комплект оптики для Мюнхенского телескопа, изготовленного фирмой Кайзер | 0.52 0.70 |
| Трейде | |
| TNT (Thai National Telescope – тайский национальный телескоп, изготовленный | 1.06 1.40 |
| фирмой EOS Technology, США и Австралия)/ 2400 мм | |
| Параболоид диаметром 1120 мм | 3.3 - |
| Комплект оптики для индийского телескопа Devasthal Optical Telescope (DOT) | 0.45 0.73 |
| for Aryabhatta Research Institute of Observational Sciences (ARIES) /3700 мм | |
| Телескоп VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy)/ 4100 мм | 3.74 4.02 |

Параметры максимального градиента ряда изготовленных в ОАО ЛЗОС комплектов зеркал •

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ОАО ЛЗОС разработана технология автоматизированного формообразования крупногабаритной асферической оптики диаметром до 6000 мм, включающая комплекс компьютерно-управляемых станков и контрольную аппаратуру. Комбинированное использование корректоров волнового фронта и измерительных машин на стадии управляемого процесса шлифования оптических деталей ускоряет процесс асферизации крупногабаритной оптики, а использование линзовых корректоров и CGH-корректоров волнового фронта для полированных поверхностей в дополнении с СGH-имитаторами зеркала позволяет гарантированно получить требуемые параметры асферической поверхности (вершинный радиус, коническая константа и т.д.) с требуемыми допусками в соответствии со спецификацией.

ОАО ЛЗОС использует самые современные средства контроля оптики, включающие машины 3D, лазерный трекер, системы позиционирования с использованием гексаподов, комплект интерферометров с элементами микроподач, интерферометры с линзовыми корректорами производства ОАО ЛЗОС и ДОЭ-корректорами производства Института автоматики и электрометрии СО РАН, современное программное обеспечение для обработки интерферограмм и для оптических расчетов, включая программу ZEMAX. И это лишь краткий перечень имеющегося оборудования и технологий

Компьютерно-управляемые методы обработки крупногабаритной астрономической и космической оптики, позволили изготовить зеркала для крупных российских и международных проектов, зеркала для сети телескопов LGOGT с диаметром главных зеркал до 2 м, телескопа TNT с главным зеркалом диаметром 2.4 м, зеркало телескопа DOT ARIES с зеркалом диаметром 3.7 м, оптику обзорных телескопов VST и VISTA. Зеркала этих телескопов имеют значительную асферичность и высокую апертуру, что создает значительные трудности не только при обработке данных зеркал, но и при их контроле. Тем не менее, эти задачи были успешно решены.
Список литературы:

1. Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Semenov A.P. Interference testing methods of large astronomical mirrors base on lenses and CGH wavefront correctors// Proceedings of SPIE 7739, 77390P (2010).

2. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P., Patrikeev V.E., Pridnya V.V. M1 and M2 mirror manufacturing for ARIES project: current status// Proceedings of SPIE 7739, 773907 (2010).

3. Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., RumyantsevV.V., Samuylov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A. Manufacturing of primary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST// Proceedings of SPIE 4451, 131-137 (2001).

4. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Sharov Y.A. Manufacturing of secondary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST// Proceedings of SPIE 4451, 138-144 (2001).

5. Abdulkadyrov M.A., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A., Atad-Ettengui E., Egan I, Bennet R.J., Craig S.C. M1 and M2 mirrors manufacturing for VISTA telescope// Proceedings of SPIE 5494, 374-381 (2004).

6. Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P., Belousov S.P., Semenov A.P., Patrikeev V.E., Ignatov A.N.,

Polyanchikov A.V., Pridnya V.V., Sharov Y.A., Poleshchuk A.G., Nasyrov R.K. M1 primary mirror manufacturing for VISTA project// Proceedings of SPIE 7018, 701804 (2008).

7. Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P., Belousov S.P., Pridnya V.V., Patrikeev V.E., Ignatov A.N., Polyanchikov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A. M2 secondary mirror manufacturing for VISTA project// Proceedings of SPIE 7018, 70180B (2008).

8. *Burge J.H.* Measurement of large convex aspheres// Proceedings of SPIE 2871, 362-373 (1996).

9. Smith B.K., Burge J.H. and Martin H.M. Fabrication of large secondary mirrors for astronomical telescopes// Proceedings of SPIE 3134, 51-61 (1997).

10. Abdulkadyrov M.A., Semenov A.P., Sharov Y.A., Baryshnikov N.V., Denisov D.G., Zhivotovskii I.V. and Karasik V.E. An unequal-arm Twyman-Green IR interferometer for monitoring the shape and quality of the surfaces of large optical items at the grinding stage// J. Opt. Technol 77, 621-627 (2010)

11. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Sharov Y.A. Fabrication of blanks, figuring, polishing and testing of segmented astronomic mirrors for SALT and LAMOST project// Proceedings of SPIE 5494, 31-38 (2004).

12. *Dierickx P.* Optical fabrication in the large// Workshop on Extremely Large Telescopes, Bäckaskog, Sweden, (1999).

НАНЕСЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО ПРОСВЕТЛЯЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ МЕТОДОМ ЗОЛЬ-ГЕЛЯ НА ЗАЩИТНЫЕ СТЕКЛА ЛАМПОВЫХ КАССЕТ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ УФЛ-2М

КУЗНЕЦОВА О.В., АЗЕРБАЕВ А.А., АБДУЛКАДЫРОВ М.А.

ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: ktb2@lzos.ru

В рамках проекта по изготовлению оптических элементов для лазерной установки УФЛ-2M, предназначенной для осуществления инерциального термоядерного синтеза, разработана промышленная технология получения двухслойного широкополосного просветляющего покрытия на защитные стекла ламповых кассет методом вытягивания из растворов пентахлорида тантала и тетраэтоксисилана.

Разработано и изготовлено технологическое оборудование, позволяющее наносить широкополосное просветляющее покрытие на защитные стекла с габаритами 1900 мм х 650 мм. Производительность технологического оборудования – более 350 штук защитных стекол с покрытием в год.

Ключевые слова: широкополосное просветляющее покрытие, метод золь-геля, вытягивание из пленкообразующих растворов.

В ОАО ЛЗОС разработаны и внедрены технологии нанесения просветляющих покрытий вакуумным методом, травление тяжелых свинцовосодержащих стекол в уксусной кислоте, нанесение пленкообразующих покрытий методом центрифугирования и нанесение просветляющего однослойного покрытия методом вытягивания из раствора тетраэтоксисилана.

Для защитных стекол с габаритными размерами 1900х650 мм вакуумный метод и центрифугирование неприемлемы в связи с отсутствием соответствующего оборудования, а травление в уксусной кислоте и однослойное просветляющее покрытие не отвечают требованиям по коэффициенту отражения.

Поэтому оказалось необходимым поиск новых комбинаций пленкообразующих растворов, удовлетворяющих следующим требованиям:

- коэффициент отражения в диапазонах длин волн 490-610 нм и 720-910 нм при нормальном угле падения - ≤1%;

- интегральный коэффициент пропускания в диапазонах длин волн 490-610 нм и 720-910 нм при углах падения 0-60° - ≥ 97%;

влагоустойчивость – 1 группа;

- механическая прочность – 0 группа.

Авторы остановились на методе вытягивания из золь-гелевых растворов пленкообразующих веществ. Данный метод нанесения просветляющих покрытий заключается в погружении покрываемой детали в раствор пенкообразующего материала и извлечение его с определенной скоростью. В качестве пленообразующего материала используется ряд органических и неорганических соединений, имеющих тенденцию к образовыванию полимерных молекул или полисольватированных групп в спиртовых и спирто-ацетоновых растворах и образующих гели со слабой склонностью к кристаллизации при удалении растворителя.

Формирование просветляющего покрытия происходит на границе раздела воздух-раствор.

Толщина d получаемого слоя зависит в основном от следующих параметров:

- скорости подъема;

- угла наклона покрываемой плоскости к уровню жидкости;

- концентрации раствора.

Другие параметры, влияющие на толщину слоя, такие, как вязкость, поверхностное



Рисунок 1. График зависимости коэффициента отражения от длины волны

натяжение и упругость паров раствора включают в коэффициент пропорциональности к, характеризующий каждый раствор.

Зависимость толщины пленки d от скорости подъема детали v выражается соотношением d $\approx v^{2/3}$, которое учитывает суммарное влияние плотности, вязкости и поверхностного натяжения.

Нелинейная зависимость d от концентрации раствора с обусловлена увеличением его вязкости η с ростом концентрации [1].

Распределение толщины слоя в вертикальном направлении определяется только процессом испарения растворителя и не изменяется при движении подложки. В перпендикулярном направлении пленки получаются равномерными при отсутствии колебаний



Рисунок 3. График зависимости коэффициента отражения от длины волны образца с покрытием

уровня жидкости или неконтролируемых воздушных потоков.

Преимуществами данного метода является:

- большая производительность;

 несложное в изготовлении технологическое оборудование;

 возможность получения слоев с различными коэффициентами преломления.

В ходе работы по подбору структуры просветляющего покрытия, отвечающего заданным техническим требованиям, авторы остановились на двухслойном просветляющем покрытии из спиртовых растворов пентахлорида тантала и тетраэтоксисилана. Теоретическая кривая зависимости коэффициента отражения от длины волны двухслойного ахроматического покрытия приведена на рис. 1.



Рисунок 2. Образец с нанеенным просветляющим покрытием



Рисунок 4. Прибор проверки механической прочности типа СМ-55

В качестве первого слоя использовался 20% спиртовой раствор пентахлорида тантала. Он дает возможность достичь высокого показателя преломления 2,0, и срок его жизни составляет более 1 года.

В качестве второго слоя использовался 10% спиртовой раствор тетраэтоксисилана. Показатель преломления составляет 1,45 и срок жизни раствора около 3 лет.

При отработке режимов нанесения просветляющего покрытия использовались образцы из стекла К8 размером 50х50х8 мм (рис. 2).

Были отработаны скоростные режимы вы-

тягивания образцов из растворов пленкообразующих веществ для определения оптимальной толщины каждого слоя. После нанесния слоев пленкообразующих веществ проводилась термообработка образцов.

Контроль оптических характеристик проводился на спектрофотометре Lambda 950. Полученные результаты приведены на рис. 3 и в табл. 1.

Контроль механической прочности осуществляется методом истирания на приборе проверки механической прочности типа СМ-55 (рис. 4). Образцы с покрытием вы-

2014

| Длина волнЫ | Коэффициент отражения ρ_{λ} , % | | | | | |
|-------------|--|---------------|---------------|---------------|--|--|
| | Под углом 00 | Под углом 300 | Под углом 450 | Под углом 600 | | |
| 490 | 0,75 | 0,06 0,95 | | 5,42 | | |
| 500 | 0,28 | 0,10 | 1,36 | 5,99 | | |
| 510 | 0,06 | 0,30 | 1,81 | 6,46 | | |
| 520 | 0,03 | 0,60 | 2,24 | 6,81 | | |
| 530 | 0,16 | 0,95 | 2,63 | 7,06 | | |
| 540 | 0,40 | 1,32 | 2,96 | 7,19 | | |
| 550 | 0,70 | 1,67 | 3,22 | 7,24 | | |
| 560 | 1,03 | 1,99 | 3,41 | 7,19 | | |
| 570 | 1,37 | 2,26 | 3,52 | 7,07 | | |
| 580 | 1,68 | 2,48 | 3,56 | 6,88 | | |
| 590 | 1,97 | 2,63 | 3,53 | 6,63 | | |
| 600 | 2,20 | 2,72 | 3,45 | 6,35 | | |
| 610 | 2,39 | 2,76 | 3,32 | 6,04 | | |
| 720 | 1,56 | 0,99 | 0,91 | 3,28 | | |
| 730 | 1,35 | 0,80 | 0,78 | 3,27 | | |
| 740 | 1,15 | 0,63 | 0,68 | 3,30 | | |
| 750 | 0,96 | 0,48 | 0,61 | 3,38 | | |
| 760 | 0,78 | 0,35 | 0,57 | 3,51 | | |
| 770 | 0,61 | 0,25 | 0,57 | 3,68 | | |
| 780 | 0,47 | 0,17 | 0,61 | 3,90 | | |
| 790 | 0,34 | 0,13 | 0,67 | 4,14 | | |
| 800 | 0,23 | 0,10 | 0,77 | 4,43 | | |
| 810 | 0,14 | 0,11 | 0,11 0,89 | | | |
| 820 | 0,08 | 0,14 | 1,05 | 5,08 | | |
| 830 | 0,04 | 0,20 | 1,23 | 5,44 | | |
| 840 | 0,02 | 0,28 | 1,44 | 5,83 | | |
| 850 | 0,03 | 0,39 | 1,66 | 6,22 | | |
| 860 | 0,07 | 0,52 | 1,91 | 6,62 | | |
| 870 | 0,12 | 0,67 | 2,17 | 7,03 | | |
| 880 | 0,20 | 0,84 | 2,45 | 7,45 | | |
| 890 | 0,30 | 1,03 | 2,73 | 7,85 | | |
| 900 | 0,42 | 1,24 | 3,04 | 8,28 | | |
| 910 | 0,55 | 1,45 | 3,34 | 8,68 | | |

Таблица 1.



Рисунок 5. Участок нанесения просветляющего покрытия методом золь-геля

держивали 3000 оборотов при истирании, что согласно ОСТ 3-1901-85 соответствует 0 группе механической прочности.

Зависимость коэффициента отражения рλ от длины волны и угла падения для двухслойного широкополосного просветляющего покрытия, наносимого методом вытягивания из золь-гелевых растворов с показателями преломления слоев n₁=2,0 n₂=1,45

Для нанесения отработанного широкополосного просветляющего покрытия на защитные стекла ламповых кассет было разработано и изготовлено технологическое оборудование, состоящее из установки нанесения просветляющего покрытия, печи для термообработки покрытия и установки контроля светопропускания деталей с покрытием. Для



Рисунок 6. Установка нанесения просветляющего покрытия



Рисунок 7. Печь для термообработки просветляющего покрытия

размещения технологического оборудования был создан участок со специальными климатическими условиями (рис. 5).

Нанесение покрытий проводится на специальной установке (рис. 6), состоящей из подъемника, грузозахватного приспособления и двух ванн со спиртовыми растворами пентахролида тантала и тетраэтоксисилана.

После нанесения пленки просветляющего покрытия следует этап термообработки в печи (рис. 7) с регулируемой скоростью подъема и поддержания температуры.

Температурный режим определяется природой покрытия и материала подложки, а также от требуемой механической прочности пленки. Скорости нагрева и охлаждения детали зависит от стойкости материала подложки к тепловым ударам.

После термообработки измеряется коэффициент пропускания детали с покрытием на установке контроля светопропускания под углами в диапазоне 0-60°.

В ходе работы было получено широкополосное просветляющее покрытие, отвечающее всем техническим требованиям заказчика. Создано оборудование для нанесения и контроля просветляющего покрытия, обеспечивающее производительность более 350 штук в год.

Список литературы:

1. Шредер Х. Осаждение оксидных слоев из органических растворов/ В.кн. Физика тонких пленок. Т5. М.: Мир, 1972 С.82-139

77

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕЦЕНТРИРОВКИ АСФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ АСТРОНОМИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА

СЕМЕНОВ А.П.

ОАО "Лыткаринский завод оптического стекла"

E-mail: lastro@lzos.ru

Описан метод определения децентрировки асферической поверхности относительно геометрического центра астрономического зеркала с помощью линейного трехточечного сферометра, используемого также и для определения отклонений профиля шлифованной поверхности от теоретической. Приведены примеры успешного использования метода при изготовлении зеркал телескопов TNT (Thai National Telescope), VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy), DOT ARIES (Devasthal Optical Telescope for Aryabhatta Research Institute of Observational Sciences) и другие.

Ключевые слова: оптика телескопа, обработка оптики, контроль оптики, асферическое зеркало, измерения сферометром, децентрировка зеркала.

введение

Задача измерения смещения оптической оси (смещение вершины асферической поверхности) относительно геометрического центра изготавливаемого крупногабаритного астрономического зеркала является в настоящее время весьма актуальной, поскольку, практически во всех чертежах крупногабаритных зеркал задаётся значение допустимого смещения. Это связано, прежде всего, со сложностью юстировки оптики современных телескопов, которые стали короткофокусными и высокоапертурными и, соответственно, с большим угловым полем поэтому значительное смещение оптической оси может привести к смещению центра масс зеркала и к серьезным сложностям при юстировке телескопа.

Известны способы центрировки оптических элементов, например, для оптики диаметром до 100 мм, где задача определения подобных смещений решается путём её юстировки в центрировочном приспособлении с использованием оптической системы для выполнения данной процедуры. Для крупногабаритной оптики диаметром 1 м и более использование такого способа сопряжено с большими сложностями. Появляется потребность в станках с вращающимся столом диаметром, превышающим размер детали, с биением и центрировкой в сотые доли миллиметра, кроме того, необходима оптическая система, расположенная на оси зеркала, позволяющая проверять соосность элементов оптической системы с осью исследуемого зеркала.

В статье описан механический метод измерения децентрировки, основанный на способе определения относительных изменений показаний линейного трёхточечного сферометра при измерении стрелок прогиба вдоль радиального направления на детали в различных сечениях при помещении сферометра на одинаковом расстоянии от края детали. В этом случае разница в показаниях сферометра в двух взаимно-противоположных направлениях позволяет определить смещение оптической оси. Точность способа определяется чувствительностью сферометра и асферичностью поверхности. Чем выше асферичность поверхности, тем меньшее смещение оптической оси можно определить данным способом.

Для выполнения измерений был разработан и изготовлен специальный линейный трёхточечный сферометр с упорами, фиксирующими положение сферометра относительно боковой цилиндрической поверхности, который устанавливается на поверхности детали в направлении от края к центру.

Для экспериментальной проверки пригодност способа были выполнены измерения смещения оптической оси на асферических деталях различного диаметра и асферичности. Наиболее показательные из них - измерения, выполненные на главном зеркале телескопа VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy) [1, 2] Европейской южной обсерватории диаметром 4100 мм с асферичностью около 850 мкм и на главном зеркале телескопа TNT (Thai National Telescope) [3] диаметром 2400 мм с асферичностью около 160 мкм (по контракту с фирмой EOS Technology). Это зеркала, изготовленные в ОАО ЛЗОС, на которых было определено смещение оптической оси и, таким образом, подтверждена пригодность метода.

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ВЕРШИНЫ ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕЦИАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ

Для точной настройки и определения положения оптической оси зеркала требуется знать положение зеркала относительно некоторых фиксированных базовых точек. Оптическая ось зеркала формируется в процессе асферизации оптической детали методом шлифования и последующего полирования. Геометрические параметры самой заготовки, точность изготовления образующей оптической детали (овальность, цилиндричность) также могут оказывать влияние на точность определения смещения.

При контроле оптических деталей с асферическими поверхностями применяют механический и оптический методы измерения. Среди оптических методов известен интерференционный способ измерения децентрировки. Способ заключается в наложении на измеряемую асферическую поверхность детали сферического пробного стекла, которое самоустанавливается на измеряемой поверхности, в воздушном промежутке межу ними возникает кольцевая интерференционная картина. Децентрировку поверхности определяют по смещению центра колец относительно центра поперечного сечения цилиндрической поверхности детали. Способ позволяет измерять смещение вершины поверхности относительно геометрической оси детали. Погрешность измерения децентрировки вершины различных типов асферических поверхностей не более 5 мкм. К крупногабаритным астрономическим зеркалам такой метод неприменим, поскольку пробное стекло имеет очень малые размеры по сравнению с диаметром зеркала, что ведёт к потере необходимой точности измерений, кроме того, как правило, главные зеркала телескопов имеют центральное отверстие, что делает использование пробного стекла при вершине зеркала вообще невозможным.

Известен оптический автоколлимационный способ измерения децентрировки оптических одиночных и склеенных линз в оправах, который можно адаптировать и к измерению децентрировок асферической поверхности зеркала. Он основан на использовании приборов, построенных по схеме автоколлимационной трубки. Объектив прибора формирует изображение перекрестия в плоскости, где расположен центр кривизны верхней поверхности измеряемой линзы. При вращении линзы, если она децентрирована, автоколлимационное изображение центра перекрестия на измерительной сетке прибора опишет окружность с определённым радиусом. По нему судят о децентрировке линзы. Но в этом случае оптическая система (вращающийся стол – оправа зеркала – зеркало – корректор асферического волнового фронта - вспомогательная оптика) не должна иметь биений и наклонов и собственных смещений элементов с оптической оси, что невозможно достичь на практике в случае крупногабаритных астрономических зеркал.

Изготовленное главное зеркало телескопа VISTA имеет гиперболическую поверхность диаметром 4100 мм (вершинный радиус 8094 мм, коническая константа равна –1,129792) с отверстием 1200 мм. При этом оптическая ось должна иметь децентрировку не более 1 мм. Наклон оптической оси не столь существенно влияет на оптическое качество зеркала (наклон оси главного зеркала может быть скомпенсирован наклоном вторичного зеркала), а вот смещение оптической оси относительно вершины зеркала вносит более заметные искажения в отраженный волновой фронт.

Оптический метод измерений, который предлагался для данных измерений, заключается в следующем. Форма поверхности зеркала контролируется с помощью корректора волнового фронта (1, рис 1), который преобразует плоский волновой фронт в асферический.

Асферический волновой фронт, отражённый от контролируемой поверхности 2, снова проходит через корректор и интерферирует с эталонным плоским волновым фронтом. При настройке интерферометра на малое количество полос он располагается на оптической оси зеркала. Перед корректором располагается отражающая двухсторонняя пластина 3, после корректора – пластина с перекрестием 4. В отверстие детали также помещается пластина с перекрестием 5, за которой находится





автоколлимационный микроскоп 6. По данной оптической схеме и измеряются смещения оптической оси.

Настраивается интерферометр с корректором волнового фронта на зеркало как обычно. В параллельный пучок перед корректором помещается пластина 3, входящая в объектив корректора. Настройкой интерферометра (наклоны/касания) добиваются соосности этой пластины с осью корректора с помощью интерферометра. Размещаем пластину с перекрестием 4 в промежуточном фокусе. Юстируем положение (ХҮ) перекрестия пока оно не будет настроено на оптическую ось. Убираем корректор 1. В автоколлиматор, расположенный в отверстии зеркала, наблюдаем два перекрестия. Настроив автоколлиматор (наклон и центрирование) на эти перекрестия получим, что ось автоколлиматора совпадает с оптической осью зеркала. Размещаем пластину с перекрестием в центральное отверстие зеркала и выставляем его в соответствии с геометрией зеркала. Измеряем отклонения между автоколлиматором и данным перекрестием. Это является прямым измерением смещения оси.

Так как промежуточный фокус линзы корректора имеет значительные сферические аберрации, перекрестие в промежуточном фокусе создаёт изображения, подобные тем, которые приведены на рис. 1б (характеристики теста наподобие ножа Фуко).

Значительная сферическая аберрация требует точности юстировки перекрестия менее ±0,1 мм. Перед автоколлиматором, настроенным на оптическую ось корректора волнового фронта и установленным в отверстии, размещается пластина с перекрестием 5, которая настраивается на ось автоколлимационного микроскопа. Это перекрестие даёт положение оптической оси, т.е., как бы, визуализируется оптическая ось. Далее необходимо измерить расстояние до этой точки от геометрического центра детали, в данном случае – от боковой поверхности центрального отверстия.

В этом случае центральное отверстие должно иметь погрешности изготовления меньшие, чем измеряемые погрешности смещения. На рис. 1в представлена схема размещения пластины с перекрестием в центральном отверстии. Устройство юстируется на координатной машине. Анализ показывает, что теоретически такой способ позволяет определить оптическую ось. Однако при его технической реализации возникает целый ряд существенных проблем.

В конструкции интерферометра нет места, где можно было бы разместить пластину 3. Размещение пластины 4 в промежуточном фокусе с точностью 0,1 мм также выглядит проблематичным, так как промежуточный фокус имеет каустику размером порядка 30 мм. Убрать корректор, не представляется возможным по причине невозможности установки в рамках стенда контроля приспособлений, необходимых для фиксации пластин 3 и 4. Кроме того, контрольная площадка, на которой располагается корректор, не является абсолютно жёсткой, и при устранении корректора возникнут деформации площадки и, как следствие, смещение пластин 3 и 4. Зеркало в процессе обработки и контроля обычно располагается либо на мембранно-технологической оправе, либо на механической системе разгрузки зеркала, и разместить там автоколлиматор не представляется возможным. Размещение пластины 4 по отношению к отверстию с точностью 0,1 мм также выглядит проблематично, так как для обеспечения такой точности потребуется достаточно жёсткая (массивная) конструкция, и, кроме того, данная конструкция должна будет занять пространство в отверстии зеркала, ранее занятое автоколлиматором.

Из всего сказанного выше можно заключить: предложенный способ, без сомнения, является достаточным для проведения требуемых измерений, но его техническая реализация невозможна. Таким образом, необходим другой способ для решения задачи определения смещения оптической оси относительно механического центра.

ТЕОРИЯ МЕТОДА

Известен механический метод измерения децентрировки асферических поверхностей, который реализуется следующим способом. Из теории следует, что децентрированная линза обладает разнотолщинностью Δd по краю и клиновидностью, поэтому может быть представлена как совокупность центрированной линзы и клина с углом $\theta = \Delta d/D$, где D – диаметр линзы. В данном способе используют индикаторный контактный косиномер, которым измеряют толщины d_1 и d_2 диаметрально противоположных краёв линзы по нескольким сечениям и вычисляют разнотолщинность $\Delta d = d_1 - d_2$, а затем её функцию – смещение вершины поверхности, т.е. децентрировку. Способ применим только для контроля линз (деталей) диаметром до 200 мм и не решает поставленную задачу.

Крупногабаритные астрономические зеркала всегда имеют разнотолщинность, и задача максимально устранить её не ставится. Проблема заключается только в том, чтобы в пределах допуска совместить оптическую вершину зеркала с его механическим центром, определяемым по внешней боковой поверхности зеркала. Для измерений используется линейный трехточечный сферометр. Его последовательно помещают вдоль радиального направления на рабочей поверхности на одинаковом расстоянии от боковой поверхности в различных направлениях от центра детали. Затем по относительной разности в измеренных значениях стрелки прогиба во взаимно противоположных направлениях определяют смещение оптической оси относительно геометрического центра оптической детали (рис. 2).

Уравнение асферической (конической) поверхности представляется в следующем виде:

$$z = \frac{x^{2} + y^{2}}{R + signR\sqrt{R^{2} - (1 + K)} x^{2} + y^{2})} + aspheric$$
$$aspheric = \left\{ \sum_{1 \le p \le 4} A_{p} \left(x^{2} + y^{2}\right)^{p} \right\} + \left\{ \sum_{1 \le m + n \le 0} C_{m,n} x^{m} y^{n} \right\}$$

где *x*, *y*, *z* – координаты любой точки на поверхности оптической детали, центр системы координат находится в вершине зеркала, R – вершинный радиус кривизны зеркала, K – коническая константа (K= $-e^2$, e – эксцентриситет конической поверхности), A_p – коэффи-



Рисунок 2. Расположение сферометра на детали: вид сверху (а) и сбоку (б)

циенты асферической поверхности высшего порядка, $C_{m,n}$ – коэффициенты полинома в декартовой системе координат *x*, *y*, $C_{00} = K$.

Уравнение без дополнительных коэффициентов высшего порядка (aspheric) описывает асферические поверхности 2-го порядка, наиболее распространенные в оптике.

Уравнение асферической поверхности, наиболее употребляемое в современной асферической оптике, можно также представить в следующем виде:

$$z = \frac{cS^2}{1 + \sqrt{(1 - (1 + K)c^2S^2)}} + A_1S^4 + A_2S^6 + A_3S^8 + A_4S^{10}$$
(1)

где A_{l} , A_{2} , A_{3} , A_{4} – коэффициенты асферических поверхностей более высокого порядка (выше 2-го), $S^{2} = x^{2} + y^{2}$, c = 1/R.

В зависимости от значения конической константы различают следующие формы поверхности: если K < -1, то гиперболоид, K = -1 – параболоид, -1 < K < 0 – эллипсоид вращения относительно главной оси, K = 0 – сфера, K > 1 – эллипсоид вращения относительно малой оси (сплюснутый сфероид).

На рис. З изображено сечение x, z асферической поверхности, где z – оптическая ось. Определим стрелку прогиба dl, когда сферометр установлен вдоль радиального направления на детали в точках x_1 , z_1 (первая ножка сферометра) и x_2 , z_2 (вторая ножка сферометра). База сферометра – L. Следовательно, в данном случае необходимо найти координаты точки x_0 , z_0 , затем координаты точки x_3 , z_3 и определить отрезок dl, как расстояние от точки x_0 , z_0 до точки x_3 , z_3 . Но сначала надо определить координаты точки x_2 , z_2 , которая находится на расстоянии L от точки x_1 , z_1 . Таким образом, используя уравнение (1), имеем следующую систему уравнений для сечения асферической поверхности высшего порядка для поиска координат точки x_2 , z_2 :

$$z_{2} = \frac{cx_{2}^{2}}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^{2}x_{2}^{2}}} + A_{1}x_{2}^{4} + A_{2}x_{2}^{6} + A_{3}x_{2}^{8} + A_{4}x_{2}^{10},$$
$$L = \sqrt{(x_{2} - x_{1}) + (z_{2} - z_{1})},$$
(2)

Определяем координаты второй точки x_2 , z_2 . Вычисляем координаты средней точки (x_0, z_0) :

$$x_0 = (x_1 + x_2)/2, z_0 = (z_1 + z_2)/2.$$

Через точку x_0 , z_0 проходит нормаль, пересекающая поверхность. Расстояние от точки x_0 , z_0 до поверхности (x_3, z_3) и есть искомая стрелка прогиба. Её длину можно с достаточной степенью точности определить следующим образом:

$$dl=dl'\cos\varphi, \quad dl'=[(x_0-x_3)^2-(z_0-z_3x_0)^2]^{1/2},\\ \cos\varphi=(x_2-x_1)/L,$$

Таким образом, вычислив стрелки прогиба при смещении сферометра вдоль радиального направления (радиальное направление – по линии от центра детали к краю) можно определить точность полученных измерений, т.е. насколько изменятся показания сферометра



Рисунок 3. К расчету стрелки прогиба, измеряемой сферометром



Рисунок 4. Вид сферометра сбоку (а) и сверху (б)

при продольном смещении на 1, 2, 3... мм.

Причем само значение стрелки прогиба неважно, поскольку интересует только её относительное изменение при радиальном смещении.

Если при радиальном смещении сферометра на размер допустимого по спецификации смещения оптической оси показания сферометра изменятся в пределах его чувствительности, то тогда можно измерить смещение оптической оси. Например, асферическая поверхность смещена на 1 мм относительно механического центра детали, а показания сферометра при смещении его на 1 мм на данном расстоянии от боковой поверхности меняются на 0,75 мкм, тогда, если вдоль радиального направления на одном краю детали (положение 0°) обнулить показания сферометра (0 мкм), то с противоположной стороны детали при положении сферометра на таком же расстоянии от боковой поверхности детали оно составит +1,5 мкм (положение 180°).

КОНСТРУКЦИЯ СФЕРОМЕТРА Для ИЗМЕРЕНИЙ

Для реализации предложенного способа был сконструирован и изготовлен специальный сферометр на базе линейного трёхточечного прибора (рис. 4).

Сферометр состоит из полого металлического корпуса 1, имеющего форму параллелепипеда, с несколькими сквозными вертикальными отверстиями 2. В крайних отверстиях размещены две опорные ножки 3, а в центральном отверстии – измерительная ножка 4 с центральным микронным индикатором 5. В центральной части на корпусе закреплен боковой упор 6 – регулируемая по высоте ножка, необходимая для устойчивости сферометра и установки трёх измерительных опор строго в вертикальной плоскости. На одном из торцов корпуса закреплён кронштейн 7, в нижней части которого установлены два горизонтальных регулируемых упора 8, необходимых для фиксации сферометра на боковой поверхности измеряемой детали 9. Для установки сферометра на деталь на корпусе сверху предусмотрены три ручки 10. Опорные ножки можно устанавливать в резервных вертикальных отверстиях 2 и таким образом менять базу сферометра в зависимости от диаметра детали. Желательная база – в пределах от 600 до 1000 мм.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Предложенный способ и сферометр были применены на практике, они позволили простым путём измерять с заданной точностью децентрировку асферической поверхности зеркал телескопов, в том числе у зеркал с центральным отверстием.



Рисунок 5. Сферометр на поверхности оптической детали при измерениях

83

Способ реализуется следующим образом. Для измерений используют линейный трёхточечный сферометр с базой примерно равной расстоянию от края детали до центра или до центрального отверстия (если деталь с отверстием), но не более 1000 мм, чтобы избежать ошибок, вызванных собственными деформациями сферометра. Овальность и конусность боковой цилиндрической поверхности зеркала, как правило, не превышает 0,1 мм. Чувствительность измерительной головки сферометра составляет обычно 1 мкм или даже 0,2 мкм. Сферометр размещают вдоль радиального направления от края детали к центру. Положение сферометра относительно края фиксируется на боковой поверхности зеркала двумя упорами с точностью менее 0,1 мм (рис. 5).

Расчетная величина изменения стрелки прогиба при смещении сферометра в радиальном направлении вдоль кривой, описывающей контролируемую поверхность зеркала, например, на 1 мм вычисляется по уравнению поверхности с учётом заданной базы сферометра.

В табл. 1 представлены результаты расчётов стрелки прогиба главного зеркала телескопа ТNT диаметром 2400 мм. Здесь x_1, z_1 и x_2, z_2 – координаты крайних ножек сферометра в мм, S_c – длина стрелки прогиба в средней точке при отклонении от эталонной сферической поверхности близкого радиуса кривизны (какой именно не имеет значения) в мкм. В таблице приведены измеренные значения

| х ₁ , мм | <i>z</i> ₁ , MM | <i>x</i> ₂ , MM | <i>Z</i> ₂ , MM | <i>S_c</i> , мкм |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 197,98 | 2,72 | 1193,34 | 98,88 | 243,74 |
| 198,98 | 2,75 | 1194,33 | 99,05 | 244,43 |
| 199,97 | 2,78 | 1195,31 | 99,21 | 245,12 |
| 200,97 | 2,80 | 1196,30 | 99,38 | 245,81 |
| 201,97 | 2,83 | 1197,29 | 99,54 | 246,50 |
| 202,97 | 2,86 | 1198,27 | 99,70 | 247,19 |
| 203,97 | 2,89 | 1199,26 | 99,87 | 247,88 |



Рисунок 6. Диаграмма углового распределения относительных показаний сферометра

для крайней области детали с шагом в 1 мм. Из неё видно, что при смещении сферометра на 1 мм значения стрелки прогиба меняются на 0,7 мкм, что можно зафиксировать индикаторами сферометра.

Таким образом, если асферическая поверхность смещена на 2 мм (требования спецификации) относительно механического центра детали, то при установке сферометра в радиальном направлении, соответствующем смещению оптической оси (положение 0°), и его обнулении (0 мкм), с противоположной стороны получим отклонение в 3 мкм. В результате точность измерения смещения вершины асферической поверхности при выбранной базе сферометра получена не менее 1 мм.

> Расчетные показания стрелки прогиба (сферометр обнуляется на вспомогательной сферической поверхности) при помещении ножек линейного сферометра в точки с координатами x₁, z₁ и x₂, z₂ Диаметр зеркала 2400 мм, вериинный радиус 7200 мм, эксцентриситет 1,0134,

диаметр отверстия 330 мм, максимальная асферичность от ближайшей сферы 168 мкм, база сферометра 1000 мм

Таблица 2.

| | | <i>x</i> ₂ | Z2 | S _c |
|---------|-------|-----------------------|--------|----------------|
| MM | MM | ММ | ММ | МКМ |
| 620,41 | 23,77 | 1630,72 | 164,06 | 366,45 |
| 621,41 | 23,85 | 1631,70 | 164,25 | 367,33 |
| 735,02 | 33,37 | 1743,32 | 187,46 | 471,57 |
| 736,02 | 33,46 | 1744,30 | 187,67 | 472,52 |
| 895,23 | 49,49 | 1900,42 | 222,71 | 632,94 |
| 896,23 | 49,60 | 1901,39 | 222,93 | 633,99 |
| 1046,18 | 67,57 | 2048,13 | 258,60 | 799,55 |
| 1047,17 | 67,70 | 2049,10 | 258,84 | 800,69 |

Расчетные показания стрелки прогиба при помещении ножек линейного сферометра в точки с координатами x₁, z₁ и x2, z₂. Диаметр зеркала VISTA 4100 мм, вершинный радиус 8094 мм, эксцентриситет 1,129792, диаметр отверстия 1200 мм, максимальная асферичность от ближайшей сферы 881 мкм, база сферометра 1020 мм

При погрешности измерительной головки сферометра 0,2 мкм может быть получена погрешность измерений не более 0,5 мкм.

Проведя измерения по кругу в нескольких радиальных положениях (8–12 положений) на одинаковом расстоянии от края детали получим смещённую относительно центра замкнутую кривую, указывающую направление и размер продольного смещения оптической оси.

Форма поверхности зеркала была доведена до требований чертежа и размах отклонений волнового фронта составляет 0,316 λ (длина волны $\lambda = 0,6328$ мкм), что составляет отклонения на поверхности от заданной формы в 0,1 мкм. При таких отклонениях поверхности они никак не повлияют на результат определения смещения оптической оси. Отклонения не превышают значения 1,5 мкм. Отсюда следует, что смещение оптической оси относительно геометрической не превышает 1 мм. На рис. 6 представлена диаграмма, показывающая направление и величину смещения оптической оси.

| № положения | Измеренные |
|-------------|-----------------|
| | отклонения, мкм |
| 1 | 0 |
| 2 | +1 |
| 3 | 0 |
| 4 | +1 |
| 5 | +2 |
| 6 | 0 |

Таблица 3.

У зеркала VISTA смещение вершины оптической оси относительно механического центра должно было составить 1 мм. База сферометра - 1020 мм. Значения показаний сферометра при смещении его на 1 мм вдоль радиального направления (направление x) представлены в табл. 2. Таким образом, если асферическая поверхность смещена на 1 мм относительно механического центра детали, то показания сферометра будут меняться в диапазоне ±1 мкм. В результате точность измерения смещения вершины асферической поверхности данным способом при выбранной базе сферометра – не менее 0,5 мм. При погрешности измерений головки сферометра 0,2 мкм может быть получена погрешность измерения не более 0,1 мм. При этом собственные локальные отклонения на поверхности детали должны быть менее 0,5 мкм.

Проведя измерения в нескольких радиальных положениях (6 положений, табл. 3) на одинаковом расстоянии от края детали, получено максимальное отклонений 2 мкм, это означает, что продольное смещение оптической оси относительно механического центра детали не превышает 1 мм.

В результате можно сформулировать необходимые условия использования данного способа измерения смещения оптической оси относительно механического центра детали:

Относительные показания сферометра при измерениях стрелки прогиба для зеркала VISTA в 6 радиальных положениях от центра (в первом положении сферометр обнуляется) боковая поверхность детали, на которую опирается сферометр, должна иметь овальность и конусность намного меньшую, чем требуемое значение смещения оптической оси относительно механической;

- собственные ошибки формы поверхности детали не должны превышать погрешность сферометра, чтобы они не сказывались на результатах измерений, а при большом количестве измеряемых сечений влияние локальных ошибок поверхности можно усреднить и исключить;

- в процессе измерений необходимо с максимально возможной точностью сохранять направление измерений, для чего сферометр базируется на боковой поверхности детали с помощью боковых упоров с точностью менее 0,1 мм;

- наклон сферометра к детали должен быть неизменным в процессе измерений, он устраняется четвёртой, вспомогательной, ножкой сферометра;

- база сферометра должна быть максимально возможной для данной измеряемой детали, поскольку это повышает точность измерений;

- способ позволяет определить заданное по техническим условиям смещение оптической оси, когда при перемещении сферометра на данное значение в радиальном направлении чувствительности сферометра достаточно для фиксирования данного смещения;

- зеркало во время проведения измерения должно находиться в разгруженном состоянии, либо на технологической разгрузке, либо на штатной разгрузке, так же как в процессе контроля формы поверхности зеркала.

В настоящее время все более усложняются требования к изготавливаемой астрономической оптике, растёт апертура зеркал, увеличивается их асферичность. Эти изменения касаются как главных зеркал с вогнутой поверхностью, так и вторичных зеркал с выпуклой поверхностью. В качестве примера представлены результаты расчета изменений стрелки прогиба при продольном смещении сферометра вдоль радиального направления на такой поверхности.

Параметры детали следующие: диаметр детали 1240 мм, вершинный радиус 7236 мм, эксцентриситет 67.3812, максимальная асферичность от ближайшей сферы 600 мкм. При смещении сферометра на 1 мм стрелка прогиба меняются почти на 4 мкм(!), что можно зафиксировать индикаторами сферометра без особого труда. Отсюда видно, что поскольку легко зафиксировать изменения стрелки прогиба в 1 мкм, то можно измерить смещение оптической оси относительно механической в 0,25 мм (!).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Механический метод измерения децентрировки крупногабаритного астрономического зеркала, основанный на способе определении относительных изменений показаний линейного трёхточечного сферометра при измерении стрелок прогиба вдоль радиального направления на детали в различных сечениях при помещении сферометра на одинаковом расстоянии от края детали прошел экспериментальную проверку. В этом случае разница в показаниях сферометра в двух взаимнопротивоположных направлениях позволяет определить смещение оптической оси. Точность метода определяется чувствительностью сферометра и асферичностью поверхности. Чем выше асферичность поверхности, тем меньшее смещение оптической оси можно определить представленным методом.

Определено смещение оптической оси относительно механического центра детали главных зеркал телескопов TNT и VISTA и показано, что смещение менее 1 мм.

Список литературы:

1. Abdulkadyrov M.A., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A., Atad-Ettengui E., Egan I, Bennet R.J., Craig S.C. M1 and M2 mirrors manufacturing for VISTA telescope // Proc. SPIE. 2004. V. 5494. P. 374–381.

2. Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P., Belousov S.P., Semenov A.P., Patrikeev V.E., Ignatov A.N., Polyanchikov A.V., Pridnya V.V., Sharov Y.A., Poleshchuk A.G., Nasyrov R.K. M1 primary mirror manufacturing for VISTA project // Proc. SPIE. 2008. V. 7018. P. 701804-1 – 701804-10.

3. *Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Semenov A.P.* Interference testing methods of large astronomical mirrors base on lenses and CGH wavefront correctors // Proc. SPIE. 2010. V. 7739. P. 77390P-1 – 77390P-10.

ОПЫТ ПРОИЗВОДСТВА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛИНЗОВЫХ И ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ И КОМПЛЕКСОВ СЛЕЖЕНИЯ

ПОНИН О.В., ШАРОВ А.А., ДОМНИН А.В., ГАЛЯВОВ И.Р.

ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: ponin@lzos.ru, galyavov@lzos.ru

Обобщен опыт производства и использования уникальных крупногабаритных линзовых объективов на Лыткаринском заводе оптического стекла на всех этапах технологического цикла. Рассмотрены использованные средства контроля и доводки изделий для обеспечения расчетного качества изображения в реальной системе с контролем основных характеристик на всех этапах технологического контроля.

Рассмотрено применение универсальной измерительной видеосистемы. Оценено влияние значений экспозиции и аналогового усиления на отношение сигнал-шум.

Ключевые слова: формообразование линз большого диаметра, установки контроля децентровки, интерферометрические системы контроля, оптические системы КА ДЗЗ, измерительные видеосистемы, оптические вибрации.

Для съёмки земной поверхности из космоса используются специальные оптико-фотографические системы, "сердцем" которых являются уникальные крупногабаритные линзовые объективы (КГЛО) – рис. 1, серийное производство которых в России налажено только на Лыткаринском заводе оптического стекла (ОАО ЛЗОС).

На сегодняшний день на заводе накоплен значительный опыт и создана уникальная научно-производственная база, обеспечивающая полный технологический цикл изготовления КГЛО, начиная от стекловарения до сборки, юстировки и испытания объектива:

получение крупногабаритных заготовок
стекла с высокой однородностью, прозрачностью и стабильность оптических констант
(в том числе стёкол с особыми оптическими свойствами);

- высокоточное формообразование оптических поверхностей линз большого диаметра и нанесение оптических химических и физических покрытий, обеспечивающих высокие характеристики пропускания системы;

- прецизионное изготовление механических деталей;

- сборка, юстировка, контроль и испытания готовых изделий.

ЛЗОС обладает уникальным оборудованием для сборки и юстировки.

Специальные установки контроля децентрировки крупногабаритных линз в оправах и КГ объективов в сборе (рис. 2) на базе прецизионных горизонтально-поворотных столов фирм Horstman (диаметром до 600 мм) и RPI (диаметр до 1000 мм) с биением референтной оси вращения менее 1 мкм, оснащённые автоколлимациоными трубками АЦ8725-4063, обеспечивающими контроль биения автоколлимационных точек с чувствительностью до 0,5 мкм, удалённых на расстояния до 3 м.

Оптические скамьи ЮС-77 (с фокусным расстоянием объектива коллиматора 15 000 мм) и ЮСК-77 (с фокусным расстоянием объектива коллиматора 25 000 мм) для контроля оптических характеристик КГ объек-

87



Рисунок 1. Крупногабаритные линзовые объективы производства ОАО ЛЗОС

тивов диаметром до 750 мм (рис. 3).

Интерферометрические средства контроля (интерферометры ИКД-100, ИТ-172, ПИКА-1 – рис. 4) и специальное программное обеспечение (INTERF, FIDAN, SWODKA, WinFringe) для технологического контроля и доводки изделий.

Среди новых работ ЛЗОС следует выделить создание оптических систем для съёмочной аппаратуры космического аппарата (КА) "Ресурс П" [1]. В частности, для аппаратуры детальной съёмки КА "Ресурс П" на ОАО ЛЗОС изготовлен, прошёл испытания и поставлен заказчику модернизированный КГЛО типа "Актиний" с улучшенными оптическими характеристиками (рис. 5).



Рисунок 3. Контроль крупногабаритного объектива на оптической скамье

Основные габаритные оптические характеристики данной системы приведены в табл. 1.

Уровень расчётных и технологических потерь объектива позволяет обеспечить в единой плоскости изображения для 5 поддиапазонов в указанном в табл. 1 спектральном

Таблица 1. Габаритные характеристики объектива "Актиний-4АГ"

| Фокусное расстояние, мм | 4000 |
|---|----------|
| Относительное отверстие | 1:8 |
| Угловое поле зрения (2 ω), градусов | 5,4 |
| Спектральный диапазон работы, мкм | 0,4570,9 |
| Количество линз | 7 |



Рисунок 2. Установки контроля децентрировки крупногабаритных линз в оправах и объективов в сборе



Рисунок 4. Контроль крупногабаритного объектива интерферометром с вынесенной точкой ПИКА-1



Рисунок 5. Объектив «Актиний-4АГ» для аппаратуры детальной съёмки КА «Ресурс П»

интервале значение коэффициента передачи модуляции в пределах всего поля изображения на пространственной частоте 28 лин/мм составляет от 0,2 до 0,55; в панхроматическом спектральном диапазоне (0,58...0,80 мкм) значение коэффициента передачи модуляции на пространственной частоте 83 лин/мм не хуже 0,2 в пределах всего поля изображения.

ЛЗОС изготовил и поставил такие объективы для комплектации уже 3-х «Ресурсов П».

Используя созданную современную технологическую базу производства оптических систем аппаратуры ДЗЗ, ОАО ЛЗОС освоил выпуск ряда оптических систем различного назначения. В частности, производятся крупногабаритные зеркально-линзовые объективы с диаметром входного зрачка до 750 мм для оптико-электронных комплексов слежения различного назначения, работающих в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра (рис. 6).

На ОАО ЛЗОС отработана технология производства ряда других высокоточных оптикомеханических компонентов для аппаратуры ДЗЗ. В частности для аппаратуры МСУ-МР и для аппаратуры МСУ-ГС метеоспутников «Метеор-М» и «Электро-Л» изготовлены блоки сканирующих зеркал (облегчённые зеркала размером до 350 мм), отвечающих за развёртку изображения в системе (рис. 7). С учётом специфики данных компонентов, которая состоит в сочетании высоких требований к оптическому качеству с необходимостью обеспечения точного механического движения зеркала, разработаны специализированные стенды, позволяющие контролировать и обеспечивать указанные параметры.

Одной из главных задач при производстве оптических систем является сохранение расчётного качества изображения в реальной системе [2].

С этой целью на всех этапах технологического процесса производится контроль основных характеристик оптических материалов и деталей и оптимизация системы на основе фактически измеренных величин. Основные этапы этой оптимизации следующие:

- пересчёт оптической схемы по данным измерений показателей преломления стекла конкретных варок;

 комплектация системы по результатам измерения параметров фактически изготовленных оптических деталей (радиусов и толщин);

- окончательная юстировка системы в процессе сборки.

На этапе окончательной сборки системы юстировка осуществляется на основе данных интерферометрического контроля.



Рисунок 6. Крупногабаритный зеркально-линзовый объектив с диаметром зрачка 750 мм для оптико-электронного комплекса слежения на стадии сборки



Рисунок 7. Блок сканирующего зеркала для мульти-спектральной аппаратуры MCУ-MP спутника «Метеор М»

На этапе приёмки ключевым является достоверный контроль качества изображения по объективным критериям, заданным в технической документации на объектив: таким как функция передачи модуляции и функции концентрации энергии.

Функция концентрации энергии является часто задаваемым в технической документации критерием оценки качества изображения оптических систем.

Для измерения функции концентрации энергии ОАО ЛЗОС применяет универсальную измерительную видеосистему, способную осуществлять анализ качества изображения объективов по различным критериям, и созданную с использованием простых и экономичных устройств формирования цифрового изображения, которая может широко применяться в производственных условиях и использоваться в составе широкого класса контрольных оптических установок коллиматорного типа. Структурно такая система включает оптическую часть, систему анализа и преобразования видеоизображения и персональный компьютер (ПК) (рис. 8); оптическаяя схема системы приведена на рис. 9.

На ОАО ЛЗОС такая система реализована на базе высокоточной крупногабаритной

оптической скамьи, позволяющей осуществлять контроль изделий с диаметром зрачка до 750 мм [3].

Для работы измерительной видеосистемы используется оригинальное программное обеспечение, которое позволяет:

 производить визуализацию видеоизображения на экране монитора персонального компьютера с целью настройки системы и контроля её работы;

- вычислять основные количественные характеристики качества изображения контролируемой системы, в том числе функцию концентрации энергии (ФКЭ);

 осуществлять запись цифровой информации об изображении на жестком диске для хранения с целью повторной или дополнительной обработки

За период, прошедший с момента публикации работы [3], программное обеспечение было существенно доработано, добавлен более глубокий анализ шумов. Это связано с тем, что учет средних значений шумов по краям кадра не всегда приводит к правильному результату. Например, если учитывать функцию распределения уровней сигнала шумов только в вертикальных полосах, то мы можем получить некорректный результат вычисления среднего значения шума, связан-



Рисунок 8. Структурная схема измерительной видеосистемы



Рисунок 9. Оптическая схема измерительной видеосистемы: 1 – источник излучения; 2 – конденсор; 3 – набор светофильтров; 4 – тест-объект; 5 – коллиматорный объектив; 6 – контролируемый объектив; 7 – микрообъетив; 8 – ПЗС-видеокамера

ный со спецификой распределения шума. В новую версию программы включён специальный алгоритм, позволяющий учитывать распределение шума и его характер, и, как следствие, получать более точное значение среднего уровня шума.

Был проведен эксперимент по оценке влияния значений экспозиции и аналогового усиления камеры на отношение сигнал/шум.

На основе полученных результатов разработан алгоритм по определению оптимальных значений аналогового усиления и времени экспозиции.

Также добавлена возможность определения уровня относительных вибраций, что позво-

ляет оценить влияет их текущий уровень на измерение или нет.

В связи с заданием концентрации энергии в кружке заданного диаметра в технической документации в качестве критерия качества изображения актуальной задачей является аттестация оборудования для проведения данной проверки.

Значительный вклад в результирующую погрешность измерения концентрации энергии вносит группа источников погрешности, связанная с применением системы цифровой регистрации и обработки видеоизображения.

Учитывая многообразие действующих факторов, для практического применения пред-



Рисунок 10. Цветовая интерпретация изображения точки





Рисунок 11. Оригинал изображения точки

Рисунок 12. Изображение точки после гамма-коррекции (видно первое дифракционное кольцо)

Таблица 2. Сравнение измеренных значений КЭ с теоретическими

| Радиус кружка | Радиус кружка | Радиус кружка | Измеренные | Теоретические |
|---------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| (пикс.) | (мкм) | (оптические | значения КЭ (%) | значения КЭ (%) |
| | | единицы) | | |
| 26 | 122 | 3,832 | 85,53 | 83,78 |
| 58 | 270 | 8,417 | 93,76 | 90,99 |
| 80 | 372 | 11,62 | 95,01 | 93,76 |
| 102 | 474 | 14,796 | 95,72 | 95,23 |

ставляется целесообразной интегральная оценка погрешности системы цифровой регистрации и обработки видеоизображения, включая возможные ограничения программного алгоритма, на основе экспериментальной оценки.

Такая оценка может быть осуществлена путём создания на чувствительной площадке видеокамеры калиброванного изображения точечного объекта с известным распределением энергии. Разумеется, по характеристикам это изображение должно быть близким к изображению, которое формируется контролируемым объективом. Таким образом, калибровка системы может производиться в схеме, близкой к показанной на рис. 9, где на поз.6 вместо контролируемого объектива будет установлен эталонный, формирующий изображение точки непосредственно на чувствительной площадке ПЗС-видеокамеры 8, для чего микрообъектив поз.7 из схемы контроля исключается.

Для эксперимента по определению точности измерения концентрации энергии был взят объектив-апохромат модели P152/8 с измеренной на зрачке диаметром 152 мм ошибкой волнового фронта 0,131 λ (P-V) и диафрагмирован до 15 мм, при этом ошибка волнового фронта составила 0,002 λ (P-V).

Полученные для такой системы теоретиче-

ские и практические значения концентрации энергии приведены в табл. 2, а на рис.10, 11 и 12 приведены, соответственно, цветовая интерпретация точки, её оригинал формата Gray16 и этаже точка с экспоненциальной гамма-коррекцией для иллюстрации наблюдения первого дифракционного кольца.

Полученная разность теоретических и практических значений КЭ ~3% по большей части вызвана дискретностью сигнала и может быть уменьшена при дальнейшем совершенствовании программного обеспечения. Предполагается провести эксперименты для установления влияния других факторов на точность измерения.

Список литературы:

1. Понин О.В., Архипова Л.Н., Демидова Е.А., Тарабукин В.В., Шаров А.А. Апохроматические термонерасстраиваемые объективы для широкозахватной мультиспектральной космической съёмки // Оптический журнал, №4, 2013 с 40-42.

2. Понин О.В., Шаров А.А. Особенности производства объективов аппаратуры дистанционного зондирования Земли // Контенант, 2014, т.13, №1, с.10.

3. Галявов И.Р., Домнин А.В., Понин О.В., Шаров А.А. Методы и средства контроля опто-технических характеристик высокоточных оптических систем // Контенант, 2014, т.13, №1, с.13-19.

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ФОКАЛЬНЫХ ОТРЕЗКОВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛИНЗ

АБДУЛКАДЫРОВ М.А., ПАТРИКЕЕВ В.Е., СУДАРИКОВ И.Н., ШАРОВ Ю.А.

ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: sudarikov@lzos.ru

Линзы пространственных фильтров являются неотъемлемой частью оптической системы сверхмощного лазера, они используются для пространственно-частотной фильтрации лазерного излучения. Для корректной работы пространственного фильтра необходимо провести его сборку с высокой точностью, для чего необходимо знать точные значения фокальных отрезков линз, входящих в его состав. Не допускаются значительные искажения лазерного излучения при прохождении через линзы пространственных фильтров. Для достижения этих требований разработан метод, позволяющий определить с высокой точностью искажения лазерного излучения при прохождении через линзы пространственных фильтров и задние фокальные отрезки в диапазоне 5 до 30 метров. Использование специальной интерферометрической лазерной измерительной системы позволяет за одну установку в стенд контроля определить с высокой точностью требуемые параметры линзы.

Ключевые слова: лазеры, стенд контроля, лазерные измерительные системы, калибровка линзы.

Мощные лазеры — это сложные оптические системы, состоящие из большого количества оптических компонентов, в том числе оптики активных сред, адаптивной, зеркальной и фокусирующей оптики. Наиболее масштабные мощные лазеры в общей сложности состоят из нескольких тысяч оптических элементов. Среди широкой номенклатуры оптических элементов мощных лазеров одними из важнейших являются линзы пространственных фильтров, благодаря которым осуществляется фильтрация высокочастотного шума лазерного излучения [1]. Линзы пространственных фильтров представляют собой двояковыпуклые линзы с рабочей апертурой 400×400 мм и фокусными расстояниями до 30 м, изготовленные из плавленого кварца. Для корректной пространственно-частотной фильтрации проходящего лазерного излучения требуется точная юстировка линз друг относительно друга. Это накладывает высокие требования на погрешность определения задних фокальных отрезков, которая должна быть менее 0,003 % измеряемой величины или менее 1 мм для линз с задним фокальным отрезком близким к 30 м. С другой стороны, сами линзы не должны вносить существенных искажений волнового фронта при прохождении через них лазерного излучения.

Создание стенда контроля, предназначенного для определения оптических параметров высокоточных крупногабаритных линз указанных лазерных систем и адаптированного к условиям серийного производства, потребовало поиска новых схемотехнических решений и измерительного оборудования.

Существенным преимуществом крупногабаритных линз пространственных фильтров лазерных систем является малая собственная



Схема контроля фокальных отрезков и искажений волнового фронта

сферическая абберация, что позволяет применить автоколлимационную схему контроля, максимально приблизившись к рабочему ходу лазерного излучения и получить информацию на полной апертуре в отличии от классического метода суб-апертур, применяемого для контроля выпуклых поверхностей крупногабаритных линзовых элементов.

Разработанный метод, позволяющий проводить контроль крупногабаритных линз на полной апертуре детали с близким к рабочему ходом оптического излучения.

Существует достаточно большое количество методов контроля фокусных расстояний и фокальных отрезков, среди которых методы измерения по муаровой картине с использованием дифракционных решёток, метод тальбот-интерферометрии, метод Шака-Гартмана и др [2-4]. Однако, эти методы не позволяют достичь погрешности измерения менее 0,003% для требуемого диапазона фокальных отрезков.

Для контроля параметров волнового фронта и задних фокальных отрезков был разработан метод, который позволяет проводить измерения с требуемой точностью и производительностью.

Предлагаемый метод основан на измерении расстояния между объектами при помощи специальной лазерной измерительной системы.

Рассмотрим схему, представленную на рис. 1. Узел интерферометра *И*, построенного по типу интерферометра Тваймана-Грина, создаёт излучение, имеющее сферический волновой фронт, на длине волны 632,8 нм. Точка фокуса объектива интерферометра F'_{OE} совмещена с точкой фокуса измеряемой линзы $(\mathcal{J}) F_{\mathcal{J}}$. При таком относительном расположении узла интерферометра \mathcal{U} и линзы \mathcal{J} сферический волновой фронт, пройдя через линзу, преобразуется в плоский и падает на зеркало \mathcal{J} , которое отражает излучение в обратном направлении. Полученная интерференционная картина характеризует искажения между излучением, отражённым от эталонного зеркала интерферометра \mathcal{U} и излучением, прошедшем через линзу до зеркала и обратно.

Ясно, что при несовпадении точек F'_{OE} и F_{π} вдоль оптической оси, искажения рабочего волнового фронта будут иметь ошибку типа дефокусировки. Величина этой ошибки характеризует величину смещения точек F'_{OE} и F_{π} друг относительно друга вдоль оптической оси.

Для определения расстояния между фокусом F_{π} и вершиной линзы S_{π} используется специальная лазерная измерительная система - лазерный трекер. Лазерный трекер представляет собой лазерный дальномер и средства измерения угла направления лазерного луча. Лазерный трекер оснащён специальным отражателем, представляющим собой триппель-призму в сферическом корпусе. Лазерный луч головки трекера отражается от поверхностей отражателя, регистрируя тем самым расстояние между началом координат в системе координат трекера и отражателем. Смещение центра сферического корпуса и вершины трехгранного угла триппель-призмы составляет не более 15 мкм.



Рисунок 2. Схема определения координат точки схода сферического лазерного пучка

Важно отметить, что поверхность сферического корпуса отражателя ОТ является полированной. Это очень важно при калибровке интерферометра, т.к. позволяет материализовать положение точки F'_{ОБ} и определить поправку относительно выбранной материальной базы измерения. При размещении отражателя ОТ в точке фокуса объектива интерферометра F'_{OE} в соответствии с представленной схемой, расположение отражателя можно оценивать по интерференционной картине. Здесь интерферируют волновой фронт, отражённый от эталонной поверхности интерферометра и сферической поверхности отражателя трекера. Таким образом, если центр отражателя $C_{{\scriptscriptstyle OT}}$ находится не в точке F'_{OF} то на интерференционной картине будет наблюдаться ошибка типа дефокусировки (см. рис. 2). Величина дефокусировки определяет степень отклонения центра отражателя от точки фокуса объектива интерферометра и величину поправки при последующем определении измеряемой дистанции.

Следующим шагом в определении фокального отрезка является измерение координат вершины передней поверхности линзы. Для этого необходимо расположить отражатель OT так, чтобы он находился в центральной области линзы Л и сферическим корпусом соприкасался с её поверхностью. Погрешность

расположения отражателя относительно центра линзы напрямую влияет на погрешность определения фокального отрезка.

Таким образом, для измерения фокального отрезка достаточно измерить координаты точки F'_{OE} , совмещенной с точкой фокуса линзы FЛ, и вершины передней поверхности линзы S_{J} . Однако, на практике при установке отражателя OT в указанных точках юстировка схемы будет нарушаться. Для того чтобы исключить возможность разъюстировки схемы контроля необходимо исключить установку отражателя трекера в уже настроенной схеме.

Так как точка фокуса объектива интерферометра F'_{OB} и вершина линзы S_{J} не зависят от настройки схемы, то их можно откалибровать заранее. Это возможно при установке 3-х дополнительных отражателей на узел интерферометра H. Схематически вариант расположения дополнительных отражателей представлен на рис. 3.

Предварительно на узле интерферометра жёстко закрепляются 3 дополнительных малых отражателя. Малые отражатели устанавливаются один раз для всех последующих измерений. Далее проводится юстировка отражателя лазерного трекера относительно точки фокуса объектива интерферометра. После окончательной юстировки отражателя

95



Рисунок 3. Схема калибровки отражателя трекера в точке фокусировки лазерного пучка

лазерным трекером измеряются координаты OT и малых отражателей и записываются в память компьютера. Трёх малых отражателей достаточно для задания локальной системы координат, относительно которой производятся измерения координаты OT. Таким образом, в памяти компьютера будут храниться координаты точки фокуса объектива интерферометра F'_{OE} , и при дальнейших измерениях и перемещениях лазерного трекера достаточно лишь измерить вновь координаты 3-х малых отражателей для восстановления локальной системы координат.

Калибровка *ОТ* в точке вершины поверхности линзы аналогична калибровке фокуса объектива интерферометра F'_{OE} , с той лишь разницей, что малые отражатели установлены на технологической оправе линзы и той, что при каждой установки детали в оправу необходимо вначале провести калибровку отражателя *ОТ*. Однако, необходимо учитывать, что точка фокуса объектива интерферометра F'_{OE} совпадает с центром сферического корпуса *ОТ*, в то время как при определении координат вершины необходимо вводить поправку, равную радиусу сферы корпуса отражателя R_{OT} .

Таким образом, откалибровав две точки до операции контроля впоследствии можно юстировать схему без опасения её разъюстировки. Ещё одним достоинством является то, что механизм калибровки позволяет свести к минимуму количество прикосновений металла (*OT*) и стекла (поверхность линзы). После операции калибровки проводится юстировка схемы (рис. 1). Полученная интерференционная картина в такой схеме будет иметь ошибку типа дефокусировки, вызванную отклонением точки фокусировки лазерного излучения интерферометра F'_{Ob} от точки фокуса линзы F_{JP} и ошибку типа сферической аберрации, вызванную наличием двух сферических поверхностей у линзы. Ошибка типа дефокусировки является юстировочной, поэтому по ней можно определить в какую сторону и насколько требуется переместить узел интерферометра U относительно линзы J вдоль оптической оси.

После минимизации дефокусировки, используя лазерный трекер необходимо измерить координаты 6-ти малых отражателей. По полученным координатам с использованием результатов калибровки элементов схемы, описанной выше, производятся вычисления координат фокуса и вершины поверхности линзы и, следовательно, определяемый фокальной отрезок.

Важно отметить, предложенный метод позволяет измерять прошедший через линзу волновой фронт, что также является преимуществом по сравнению с другими методами контроля.

Список литературы

1. *Spaeth M. L.* National Ignition Facility wavefront requerements and optical architecture/ Spaeth M. L., Manes K. R. [and all]// Optical Engineering Vol. 43 Issue 12., — 2004, P. 2854-2865.

2. Determination of long focal length of lenses with Talbot interferometer / X. Jin [and all] // SPIE Proceedings Vol. 8417. — 2012, P. 84171V.

3. *Kumar Y. P., Chatterjee S.* Application of Newton's method to determine the focal length of lenses using a lateral shearing interferometer and cyclic path optical configuration setup // Optical Engineering, Vol. 49. — 2010, P. 053604.

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДИСКОВЫХ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛАЗЕРОВ И МОЩНЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ

АБДУЛКАДЫРОВ М.А., АЗЕРБАЕВ А.А, ДОБРИКОВ Н.С., КУРАКИНА Е.В., ПАТРИКЕЕВ В.Е., СЕМЕНОВ А.П., СУДАРИКОВ И.Н., ШАРОВ Ю.А.

ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: sudarikov@lzos.ru

Рассмотрены основные стадии формообразования крупногабаритных дисковых активных элементов (ДАЭ) на основе лазерного фосфатного стекла, включающие фрезерование и предварительное полирование ДАЭ и вспомогательных элементов — «кладингов», склейку ДАЭ с дополнительными элементами – «кладингами», шлифование, полирование и финишную доводку плоских рабочих поверхностей ДАЭ, контроль формы проходящего волнового фронта и оптических параметров поверхности в различных специализированных стендах, аттестацию готового ДАЭ.

Ключевые слова: дисковые активные элементы, требования к качеству, полировка оптических деталей.

Дисковый активный элемент (ДАЭ) представляет собой плоскопараллельную пластину из лазерного фосфатного стекла, легированного неодимом. К торцам ДАЭ приклеены пластины - «кладинги», изготовленные из такого же фосфатного стекла, легированного медью.

Дисковый активный элемент (ДАЭ) — важнейшая составляющая в конструкции сверхмощных лазеров. Именно благодаря ДАЭ, которые изготавливаются из специального фосфатного стекла, генерируется излучение, которое затем проходит сквозь сложную оптическую систему и фокусируется на мишени. В таких мощных лазерах каждый резонатор с фокусирующей системой содержит несколько десятков оптических элементов, поэтому для осуществления фокусировки к каждому элементу в отдельности предъявляются высокие требования.

Например, качество поверхностей ДАЭ оценивается по волновому фронту, проходящему через элемент и разделённому на 4 пространственных диапазона. Это требование вызвано тем, что каждый диапазон вносит разный вклад в формирование лазерного излучения. Для достижения требуемого качества, необходимо выдержать параметры, указанные в табл. 1.

Следующая особенность обработки элементов ДАЭ состоит в том, что полированными должны быть не только его рабочие поверхности, но и поверхности «кладингов». Это требование необходимо, так как при высоких уровнях энергии и мощности генерируемого излучения любые источники рассеянного света вызвать нагрев и, как следствие, разрушение материала.

Эти обстоятельства задают высокие требования к геометрии обработки поверхностей от стадии фрезерования, где используются станки с числовым программным управлением, до процесса полирования, где необходимо обеспечить параллельность рабочих поверхностей ДАЭ в несколько угловых секунд и выдержать углы между гранями в несколько угловых минут.

Например, все торцевые поверхности ДАЭ

Таблица 1. Параметры качества оптических поверхностей ДАЭ

| Диапазон | Ι | | II | III | IV | |
|------------------|---------------|---------|-------------|----------------|--------------|--|
| Пространственный | > | >33 | 33-2,5 | 2,5-0,12 | 0,12-0,01 | |
| масштаб, мм | | | | | | |
| Апертура ДАЭ, мм | | | 785,5 × 435 | | | |
| Апертура | 435×435 | | 435 × 435 | 18×18 | 1×1 | |
| зондирующего | | | | | | |
| излучения | | | | | | |
| Контролируемый | $PV(\lambda)$ | RMSgrad | Rq (nm) | Rq (nm) | Rq (nm) | |
| параметр | (nm/cm) | | | | | |
| Значение | 0,3 | 7 | 1,8 | 1,1 | 0,4 | |

Здесь PV – размах волнового фронта; RMSgrag – среднее квадратическое отклонение градиента волнового фронта, Rq – среднее квадратическое отклонение волнового фронта.

по отношению к рабочим имеют угол 1,5 угловых минуты. Поэтому для фрезерования ДАЭ из фосфатного стекла были разработаны специальные приспособления и создана программа обработки для ЧПУ для достижения требуемых габаритных размеров детали.

Стоит отметить, что высокие требования к геометрии и качеству полирования предъявляются и к «кладингам». Это связано с тем, что на операции приклейки «кладингов» они не должны иметь выступающих частей по отношению к основной пластине ДАЭ, а также должны быть чётко ориентированы, так как любые отклонения по углу значительно увеличивают время обработки ДАЭ на последующих операциях.

Поэтому приклейка кладингов к основной пластине осуществляется по специальной технологии с использованием оснастки для позиционирования и фиксирования положения «кладинга» относительного основной пластины. Соединение активного элемента и кладинга должно выдержать 4x103 импульсов без изменения оптических характеристик, термическое напряжение $\Delta T=10$ К при T=300 К. Поэтому приклейка «кладингов» проводится в чистом производственном помещении, так как любая пыль может быть



Рисунок 1. Дисковый активный элемент (ДАЭ)



Рисунок 2. Оптическая схема стенда контроля ДАЭ в диапазонах I и II

причиной некачественной приклейки и вызвать разрушение ДАЭ в дефектных местах. В то же время для качественной приклейки необходимо соблюсти климатические условия для оптимизации процесса приклейки как по качеству, так и по времени.

Наиболее трудоёмкая операция в процессе изготовления ДАЭ — операция полировки. Это связано с тем, что для достижения требуемых параметров качества (таблица 1) необходимо соблюсти множество факторов, основными из которых являются коэффициент термического расширения, который более чем в 100 раз превышает КТР ситалла и почти вдвое выше КТР стекла К8, и коэффициент сошлифовываемости, который в 2,5 раза меньше коэффициента сошлифовываемости стекла К8. Эти факторы, а также температура, влажность, обрабатывающий инструмент, полирующая суспензия и др., напрямую влияют на достижение качества поверхностей как в области низких пространственных частот, так и в диапазоне шероховатости. Финишная полировка выполняется в специальных чистых производственных помещениях для предотвращения возможности появления ласин и царапин.

Следующая особенность полировки ДАЭ – это налётоопасность лазерного фосфатного стекла. Для предотвращения образования налёта на операции полировки необходимо использовать средства защиты поверхностей от воздействия окружающей среды. Более того, как было сказано выше, полирование поверхностей производится в помещении с управляемыми климатическими условиями, что позволяет стабилизировать температуру окружающей среды и минимизировать влажность воздуха.

Кроме того, ДАЭ имеют прямоугольную, т.е. не круглую форму, что накладывает дополнительные ограничения на достижение требуемой точности обработки поверхности. Поэтому полировка ДАЭ выполняется по технологии непрерывного полирования на станках серии FLP, а окончательная доводка рабочей поверхности - на автоматизированных станках серии АД и АПД с программным управлением, с расчетом сеансов обработки по результатам контроля формы поверхности и построенной карты отклонений в соответствии со спецификацией. Такая комбинация технологий полировки и доводки позволяют ускорить процесс изготовления ДАЭ при достижении требования по градиенту волнового фронта.

Контроль рабочей формы ДАЭ также является довольно сложной задачей со своими специфическими особенностями, поскольку осуществляется в четырех пространственных диапазонах, представленных в табл. 1. Поэтому для измерения качества поверхностей во всех пространственных диапазонах разработаны специальные стенды контроля,

99

каждый из которых позволяет контролировать ДАЭ в определённом диапазоне. Так, для контроля в I и II пространственных диапазонах разработан стенд контроля на основе плоскостного интерферометра Физо (см. рис. 1).

В качестве базового блока интерферометра используется динамический интерферометр. Сдвиг фазы в таком приборе осуществляется не механически, а за счёт изменения наклона плоскости поляризации. Это позволяет получить одновременно несколько интерференционных картин со строго определённым сдвигом фазы. Таким образом, получив 3 или более интерферограммы за одно измерение можно сразу же вычислить топографическую карту волнового фронта. Это позволяет исключить влияние вибраций в процессе измерения.

Контроль качества поверхностей ДАЭ в диапазоне III производится с помощью динамического интерферометра в плоском волновом фронте при апертуре зондирующего излучения 18×18 мм. Диапазон IV предполагает использование динамического профилометра, основанного на интерферометре Линника, который позволяет оценить шероховатость полированной поверхности неконтактным методом вплоть до 0,2 нм.

Таким образом, для изготовления ДАЭ были разработаны: технологический процесс изготовления изделия, уникальное обрабатывающее оборудование, позволяющее осуществлять обработку ДАЭ на этапе фрезерования при помощи разработанных программ для станков ЧПУ, а также специальной оснастки. Для осуществления финишного формообразования, используется технология непрерывной полировки, которая позволяет достичь высокого качества поверхностей ДАЭ, а также уменьшить время полирования. Было разработано контрольное оборудование и специальная оснастка, программное обеспечение, методики расчёта и измерения параметров волнового фронта. Все вышеописанные разработки позволяют обеспечить выпуск ДАЭ требуемого качества.

ОСОБЕННОСТИ ВАРКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЦВЕТНЫХ ОПТИЧЕ-СКИХ СТЕКОЛ, ОКРАШЕННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ CDS·CDSE

ФИРСОВА Ю.А., ГУЛЮКИН М.Н., МОГИЛЬНАЯ Л.Г., ИГНАТОВ А.Н.

ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: J.Firsova@bk.ru, glass@lzos.ru

Разработан и создан комплекс оборудования для отработки технологии получения сульфоселенокадмиевых стекол. Описаны особенности варки промышленных цветных оптических стекол, окрашенных наночастицами CdS·CdSe. Приведен анализ спектральных и оптических параметров, данные химического анализа, полученных варок.

Ключевые слова: цветное оптическое стекло, спектральные характеристики, сульфоселенид кадмия.

В связи с последними достижениями в науке и техники большое внимание стали уделять производству цветного оптического стекла (ЦОС). Расширился спектр использования светофильтров и ужесточились требования в отношении качества ЦОС. Оптические стекла, где основным красителем выступает сульфоселенид кадмия, относятся к контрастным светофильтрам, т. е. к светофильтрам для специальных эффектов. Целью использования контрастных светофильтров является заглушить дополнительный цвет, за счет чего можно изменить цветопередачу или резко отрезать коротковолновую область видимого спектра при полном отсутствии поглощения длиноволнового излучения. От цветных стекол оптические светофильтры отличаются высокой точностью спектрального пропускания и высокой степенью чистоты и однородности. Данные стекла используются для создания большого числа оптических приборов, предназначенных для различных физических и физико-химических исследований, в наблюдательных и в фотоприборах, в колориметрии, в объективной фотометрии, для получения фотомикроскопических кадров, для светофильтров, понижающих цветовую температуру. Из ЦОС изготавливают

сигнальные светофильтры и стекла для получения цветного освещения, в комбинации с другими светофильтрами используют для выделения участков спектра в узких диапазонах, за счет крутого хода спектральной кривой оптической плотности, которая мало изменяется с увеличением толщины стекла, можно использовать для изготовления линз Френеля.

В 60-е годы ОАО ЛЗОС начал разрабатывать составы цветных оптических стекол, окрашенные сульфоселенокадмиевыми красителями, которые использовали в качестве светофильтров. Первоначальные промышленные варки осуществляли в 80-е годы на СВЧ электроустановках ВЧС-250 и ЛПС-500 в шамотных и кварцевоглинянных сосудах объемом 500 л, где получались положительные результаты по спектральным характеристикам. Установки эти были довольно громоздкие и энергетически невыгодными, поэтому в связи с модернизацией производства и переходом на более экономичное оборудование, в 90-е годы варки начали проводить в газовых печах в шамотно-глино-каолинистых полированных сосудах того же объема. При использовании газовых печей для навара сульфоселенокадмиевых стекол



Рисунок 1.

Технологическая схема получения стекла марки ОС23-1



Рисунок 2. Образец «сырого» стекла (слева) и после повторной термообработки - наводки (справа)



График спектральных кривых оптической плотности заготовок из стекла марки OC 23-1 изготовленных по холодному каналу

стекло, сваренное на печи типа:

| _ | ВСЧ250, ЛПС500 |
|---|--------------------|
| _ | Газовая |
| _ | Электрическая печь |

Рисунок 3.

График спектральных кривых оптической плотности, в рабочей толщине 10 мм возникли сложности в воспроизведении стабильных спектральных характеристик. Для данного типа стекол характерна высокая чувствительность к условиям варки (атмосфера в печи, давление газа в печи, температурные колебания). Стабильность температуры и окислительно-восстановительная атмосфера в технологическом процессе оказывает влияние на улетучивание красителей, обеспечивающих цветовой тон и оптические параметры стекла и, в свою очередь, позволяет сохранить однородность стекла по окраске во всем объеме.[1]

В настоящее время стали еще более востребованы цветные оптические стекла, но в малых объемах и широкой номенклатуры, часто со специальными характеристиками, сужающие пределы нормативной документации (ГОСТ 9411-91 «Стекло оптическое цветное»). В связи с этим в данной работе была поставлена задача: получить стекло марки OC23-1, окрашенное наночастицами CdS·CdSe, I категории с показателем поглощения больше 2-х при длине волны 530 нм, отработать технологический процесс получения данной марки стекла в электрической малотоннажной стекловаренной печи.

Как известно, величина оптической плотности в области основного поглощения стекла определяется количеством красящих центров – наночастиц CdS·CdSe: чем больше их концентрация, тем выше поглощение[2]. Увеличение количества красителей в стекле возможно с помощью корректировки состава шихты, но это может привести к опалесценции, а их улетучивание - приводит к потере оптических параметров. Поэтому для сохранения оптимального количества красителей особое внимание в данной работе было уделено этапу варки стекла (см. рис.1).

Для решения поставленных целей на ОАО ЛЗОС был разработан и создан комплекс оборудования:

- электрическая малотоннажная стекловаренная печь;

- печь отжига-наводки заготовок стекла с минимальным градиентом температуры в рабочей зоне;





График определения режима повторной термообработки стекла марки ОС23-1

- электрический пресс (ЭПП) для обесцвечивания заготовок стекла;

- автоматизированы измерительные установки для контроля оптических характеристик стекла.

Выбор электрической печи обусловлен преимуществом ее перед газовыми печами с точки зрения возможности резкого уменьшения улетучивания при варке в ней лекголетучих компонентов шихты. При электроварке отсутствуют движущиеся над шихтой и стекломассой дымовые газы, которые уносят с собой пары селена и соединения кадмия. Возгоняющиеся при этом Se и CdS задерживаются благодаря своим свойствам в холодных слоях шихты. [3] В данной работе:

1. Были разработаны и отработаны режимы варки стекла в малотоннажной электрической стекловаренной печи с косвенным нагревом в стекритовых сосудах объемом 50 л и режимы отжига блока стекла; оптимизировали состав по содержанию красителей: сульфид кадмия вводили от 1,8 до 2,5 %, с дополнительным введением элементарной серы, количество селена изменяли от 0,3 до 0,42 %. Введение элементарной серы влияло как на окислительно-восстановительный потенциал, так и на механизм образования красителя CdS•CdSe[4]. Для смещения химического равновесия в качестве восстановителя в ряд составов добавляли сахар, что позволило снизить







Неоднородное обесцвечивание стекла при T=1150 °C, τ=10 мин

Однородное обесцвечивание при T=1200 °C, т=8,5 мин

Рисунок 5. Образцы стекла, обесцвеченные при разных температурах и времени выдержки

Таблица 1. Содержание красителей и оптические параметры стекол

| Полученные результаты | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------|------|------|--|--|
| ХИМ | оптических параметров | | | | | | |
| красители тип печи | Кр, при λ=530 нм | λ_{np} , нм | | | | | |
| ВЧС250, ЛПС500 | 0,47-0,69 | 0,23-0,30 | 0,13-0,20 | ≥2 | 560 | | |
| Газовая печь | 0,33-0,55 | 0,20-0,30 | 0,20-0,37 | ≤2,2 | ≤568 | | |
| Электрическая печь | 0,68-0,70 | 0,18-0,22 | 0,13-0,16 | ≥2 | 560 | | |

улетучивание красителей, и повысило возможность образования красящего комплекса;

2. Получены и исследованы опытные образцы см. рис. 2;

3. Осуществлен ряд опытно-промышленных варок в электрической печи и проведен их анализ по спектральным характеристикам (см. рис. 3);

4. Подобраны режимы для повторной термообработки заготовок (см. рис. 4);

5. Отработаны температурные параметры для обесцвечивания заготовок, полученных методом прессования (см. рис. 5);

6. Было определено содержание восстановителей, вводимых в шихту, для обеспечения необходимой атмосферы в печи,

7. Данные химического анализа, полученных варок, позволили оптимизировать содержание сульфоселенидов кадмия для получения стекла с заданными оптическими параметрами (см. табл. 1).



Рисунок 6. Готовые светофильтры из стекла марки ОС23-1 с поглощение больше 2 на длине волны 530 нм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Варка стекла в электрической печи позволила стабилизировать атмосферу в процессе варки, а её окислительно-восстановительный потенциал регулировать за счет введения восстановителей в шихту.

При использовании стекритовых стекловаренных сосудов объемом 50 л удалось получить высокооднородное и бессвильное стекло. В результате чего ликвидирована оптическая неоднородность блоков стекла, вышедших после отжига, что повысило выход годного стекла и качество после наводки.

В результате перехода варки стекла марки OC23-1 с газовой печи на малотоннажную электроустановку с косвенным нагревом удалось получить стекло с показателем поглощения >2 при длине волны равной 530 нм (см. рис. 6).

Список литературы:

1. И. Коцик, И. Небрженский, И Фандерлик. Окрашивание стекла. М.: Стройиздат, 1983.-64-65с.

2. *Бреховских С.М., Емельянов Н.И.* Спектральное исследование стекол, окрашенных кадмием, селеном // Оптикомех. пром-сть. – 1966. - №2. – 27-30с.

3. *Варгин В.В.* Производство цветного стекла. М. – Л. : Легпром, 1940. – 179-180с.

4. *Бреховских С.М., Галимов Л.Г. и др.* Окрашивающие центры в силикатных стеклах, содержащих добавки соединений Se, Cd, S // Физ. и хим. стекла. – 1980.-Т.6.-№3. – 256с.

СОЗДАНИЕ МАЛОТОННАЖНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЭЛЕКТРОВАКУУМНОГО СТЕКЛА МАРКИ С 48-3

ИГНАТОВ А.Н., ПОЗДНЯКОВ А.Е., СУРКОВА В.Ф., ЕВСЕЕВА Т.О., КОШКОВ С.В.

ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: npk-74@lzos.ru

В результате проделанной работы была создана малотоннажная эффективная технология производства высококачественного электровакуумного стекла марки С48-3 взамен существующей ранее крупнотоннажной, но малоэффективной и дорогостоящей технологии производства.

Была предложена идея двух стадийной варки стекла марки С48-3. Первая стадия варки происходила в керамическом горшке с последующим изготовлением фритты. Вторая стадия заключалась в переваре полученной фритты в платиновом тигле. Для интенсификации процесса осветления в этом случае применялось вакуумирование стекломассы.

Для получения заготовок стекла C48-3 необходимого качества было важно найти оптимальные величины температуры варки, времени варки и глубины вакуумирования, чтобы избежать попадания большого количества включений при допустимом количестве пузырей.

Ключевые слова: высокотемпературное стекло, режим вакуумирования, осветление, вязкость расплава.

В настоящее время значительно возрос интерес к электровакуумному стеклу марки С48-3. Существовавшая ранее технология его получения в газовой многотоннажной стекловаренной печи (объёмом 63 т) с ручным способом выработки стекломассы была утеряна. Поскольку стекло данной марки относится к тугоплавким стёклам (температура варки более 1600 °C), получить его при варке в газовой печи без дефектов (инородных включений керамики и пузырей), было очень сложно, поэтому из навариваемого стекла использовалось менее 1%, а качество его не совсем удовлетворяло потребителей. Восстанавливать производство стекла марки С48-3 по прежней технологии было нецелесообразно по причине больших капитальных затрат и неэффективности старой технологии. Однако потребность в стекле данной марки оставалась актуальной вплоть до последнего времени.

Поэтому, перед коллективом ОАО ЛЗОС, который на данный момент является практически единственным в России предприятием,

способным производить сложные стекла специального назначения, была поставлена задача – создать малотоннажную, эффективную технологию производства высококачественного электровакуумного стекла марки С48-3.

На первом этапе была предпринята попытка варки стекла марки С48-3 в 700 л керамическом горшке при максимально допустимой температуре варки в горшковой печи 1600 °С, время осветления при этой температуре достигало 80 часов. Однако данный способ варки не дал положительного результата, потому что в связи с высокой вязкостью осветление расплава стекломассы не произошло, и количество пузырей различного диаметра в отлитом стекле было более 1000 штук на килограмм стекла. Кроме того, длительная варка при высоких температурах привела к интенсивному разрушению керамического горшка и к появлению в стекле большого количества керамических включений, что делало навариваемое стекло непригодным для дальнейшей обработки.

После анализа полученных результатов навара стекла в керамических горшках была предложена идея двухстадийной варки тугоплавкого электровакуумного стекла марки С48-3, которая заключалась в следующем. Первая стадия – навар фритты в керамическом горшке при 1600 °С. При этой температуре производились только сыпки и плавление шихты без процесса осветления, в результате чего стекломасса находилась при критичной температуре в 3-4 раза меньше по времени, чем при варке стекла. Отливали стекломассу в блок, затем разбирали на бои. Фритта имела большое количество пузырей, но практически не имела керамических включений. Вторая стадия - перевар полученного неагрессивного боя в платиновом тигле емкостью 3,5 и 15 литров при температуре 1520°С, (максимально допустимая температура при использования тиглей данного типа). Очевидно, что при этой температуре осветлить высокотемпературное стекло не удастся, поэтому было решено для интенсификации процесса осветления применить известный в практике стекловарения прием вакуумирования стекломассы, который был описан И.И. Китайгородским [1].

Проведенный патентный поиск показал, что вакуумирование широко применяется для осветления оконных стекол и стекол технического назначения, но происходит это в тонком слое стекломассы и основная масса патентов относится к устройствам, позволяющим получать давление ниже атмосферного над тонким слоем стекла с отливом в лист. Потребителей же стекла марки С48-3 интересуют блочные заготовки толщиной не менее 40 мм.

Проверка идеи варки стекла в вакууме проводилась при температуре 1520°С в тигле емкостью 3,5 лира в электровакуумной индукционной печи «Кристалл», разработанной и промышленно выпускаемой для выращивания кристаллов, а на нашем предприятии модернизированной для варки стекла с максимально достижимым величиной вакуума 50 кПа. При проведении пробных варок была доказана правильность выбранной идеи и выявлены особенности данного способа производства. Оказалось, что при наборе вакуума на определенных уровнях разрежения происходит резкое вспенивание стекломассы, что приводит к заливу печи и порче дорогостоящего оборудования, поэтому набор вакуума должен быть дискретным. На опытных варках были выявлены уровни разрежения, на которых происходит вспенивание, примерные временные выдержки на них для выхода пузырей и найдено, что чем ниже разрежение, тем выходит более мелкий пузырь. Также определено время вакуумирования при максимально достигаемом вакууме, общее время варки достигало 40 часов.

Отработанный режим позволил получить практически беспузырное стекло, но появилась новая проблема - включения платины. Тем не менее, небольшие партии абсолютно годного стекла без пузырей и включений были выбраны и предоставлены потребителям, на которых были проведены все необходимые испытания и сделан вывод о полном соответствии заготовок требованиям.

В дальнейшем для увеличения объемов навара была разработана и изготовлена вакуумная индукционная электропечь, которая способна обеспечить остаточное давление в печи до 50 Па, температуру до 1520°С в платиновых тиглях емкостью от 5 до 50 литров.

Для получения заготовок стекла марки C48-3 необходимого качества было важно найти оптимальные соотношения скорости набора вакуума, температуры варки, глубины и времени вакуумирования с тем, чтобы избежать вспенивания стекломассы и попадания большого количества включений платины при допустимом количестве пузырей.

На начальном этапе была проведена серия варок для нахождения минимальной температуры варки, при которой было возможно провести процесс осветления стекломассы с использованием операции вакуумирования без вспенивания стекломассы и оказать минимальное воздействие на материал тигля и, как следствие, уменьшить попадание частиц материала тигля в стекломассу.

После подбора температуры варки, которая



Обобщенный график зависимости изменения абсолютного давления от втемени вакуумирования

составила 1440±10°С, опытным путем был найден режим набора вакуума, в процессе которого не происходило вспенивание стекломассы, и была проведена серия варок по найденному режиму.

Полученные экспериментально данные о времени и глубине вакуумирования были обработаны при помощи программы MS Excel (рис. 1, режим 1).

Полученные результаты показали, что зависимость давления над расплавом в печи от времени при варке изменяется по логарифмическому закону и соответствует уравнению:

> $y = -16588 \ln(x) + 68551;$ $R^2 = 0,9952$

где R^2 – среднеквадратичное отклонение.

В результате проведенной серии варок в полученных заготовках после контроля было отмечено, что количество включений Pt и газовых включений (пузырей) стало приемлемым и есть возможность выбрать из данных блоков годное стекло для дальнейшей обработки. Выход годного стекла составил 10%.

В ходе наблюдений за экспериментальными варками и математической обработки полученных данных, была проведена оптимизация режима набора вакуума, степени и времени вакуумирования. Для уменьшения количества газовых включений увеличена глубина вакуумирования с 15 до 10 кПа, а для уменьшения количества включений Pt сокращено общее время вакуумирования с 25 часов до 21 часа (рис. 1, режим 2).

После проведения серии варок по новому режиму можно отметить, что значительно снизилось содержание частиц материала тигля и газовых включений в заготовках стекла. Проведённые эксперименты показали увеличение выхода годного стекла по отношению к сырьевому с 10% до 30 %, при этом произошло снижение потерь платины до 30% на варку.

Однако в ходе дальнейшего визуального наблюдения было выявлено, что выделение пузырей на первоначальных стадиях идёт не интенсивно, а на последней стадии выход пузырей стремится к минимуму и к концу выдержки на данной ступени выход пузырей прекращается. Эти два фактора дали возможность дальнейшего сокращения времени вакуумирования. Для этого был изменён режим вакуумирования: увеличена глубина вакуума на первом этапе вакууммирования с 70 кПа до 50 кПа и сокращено время вакуумирования на последней стадии на 1 час (рис. 1, режим 3.).

Для дальнейшего снижения количества
включений платины была предпринята попытка дальнейшего сокращения времени вакуумирования. Для достижения этой цели была увеличена температура варки на 10 °C и скорректирован режим вакуумирования на разных стадиях (рис. 1, режим 4.).

После проведения экспериментальных варок по новому режиму и контроля полученного стекла выход годного стекла остался на прежнем уровне, но вместе с тем можно отметить, что из-за уменьшения времени варки несколько сократились экономические затраты на производство стекла данной марки.

Из сопоставления графиков видно, что оптимальные параметры режима варки стекла марки С48-3 следующие:

- общее время вакуумирования 16 часов,

- глубина вакуумирования на первой ступени 50 кПа

- глубина вакуумирования на последней ступени 10 кПа.

- температура варки 1450°С.

Таким образом, из проделанной работы можно сделать выводы:

1. Разработанная технология позволяет проводить серийный навар тугоплавкого электровакуумного стекла марки С48-3 по всем параметрам отвечающего современным требованиям заказчиков с выходом годного превышающего ранее существующую технологию более чем на порядок.

2. Оптимизированный и отработанный режим навара стекла марки С48-3 из фритты в вакуумной индукционной электропечи в платиновом тигле позволяет снизить экономические затраты на проведение варок.

3. Так же следует отметить, что данный подход можно использовать для разработки и оптимизации режимов варки других тугоплавких стекол.

Список литературы:

1. *И.И. Китайгородский*. Стекло и стекловарение // Гос. Издательство литературы по строительным материалам, 1950. – 223 с.