

На правах рукописи

**Фрейганг Николай Николаевич**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ  
ГОЛОГРАММ С ЗАПИСЬЮ ТРАНСФОРМИРОВАННЫМИ  
ПУЧКАМИ**

*Специальность: 01.04.05 - «Оптика»*

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2011

Работа выполнена в научно-исследовательском институте лазерной физики и в Федеральном Государственном унитарном предприятии «Научно-производственная корпорация «Государственный Оптический Институт им. С.И.Вавилова»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
доцент  
Венедиктов Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Кожевников Николай Михайлович

доктор технических наук  
Горбунов Георгий Георгиевич

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный  
университет информационных технологий,  
механики и оптики

Защита диссертации состоится 15 июня 2011 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 407.001.01 при ФГУП «НПК «ГОИ им. С. И. Вавилова» по адресу: 199034, г. Санкт-Петербург, Биржевая линия, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
ФГУП «НПК «ГОИ им. С. И. Вавилова»

Автореферат разослан «5» мая 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук



А. Г. Журенков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

Областью применения результатов полученных в ходе данной диссертации является коррекция аберраций в телескопических системах. Одной из классических задач оптики является задача получения высокого – близкого к дифракционному пределу разрешения – качества изображения в оптическом телескопе. Разрешающая способность идеального телескопа определяется отношением длины волны используемого излучения к диаметру входного зрачка. Однако, чем больше диаметр входного зрачка, тем больше оптическая деталь, тем она тяжелее, тем её сложнее изготовить, тем больше влияние динамических, механических, тепловых и прочих нагрузок. Традиционное решение этой задачи, основанное на применении различных технологических приемов изготовления высококачественных зеркал и систем их разгрузки, достигает своего предела при диаметре главного зеркала (ГЗ) телескопа 2-3 м

В наше время, в стремлении преодолеть искажения вносимые атмосферой, были изготовлены телескопы для работы на борту космических аппаратов. Существует ряд задач в областях внеатмосферной наблюдательной астрономии, создания внеатмосферных систем наблюдения поверхности Земли, создания крупногабаритных поверочных коллиматоров, а также формирования направленных лазерных пучков, где требуется получать дифракционное разрешение на значительно больших апертурах. В связи с этим возникли методы коррекции искажений, именуемые методами линейной адаптивной оптики. Они основаны на использовании сложных измерительных средств, механических и электронных устройств. При помощи таких методов можно корректировать как искажения, вносимые погрешностями оптических элементов, так и вызванные турбулентностью атмосферы или вибрациями. Прогресс, достигнутый в ходе их разработки достаточно велик, но основные недостатки этих методов остаются неизменными: высокая сложность в изготовлении, ограничение по быстродействию, и дороговизна.

Наряду с методами линейной адаптивной оптики, задача коррекции искажений в телескопических системах может быть решена при использовании нелинейно-оптических методов, гораздо более дешёвых и быстродействующих, в том числе при использовании методов динамической голографии. Техника нелинейно-оптической адаптивной коррекции искажений в изображающих оптических системах основывается как на достижениях классической оплотехники и линейно-адаптивной оптики, так и на больших достижениях в области голографии (статической и динамической) и связанной с нею техники обращения волнового фронта (ОВФ). Соединение этих подходов позволило создать новый класс оптических систем – оптические телескопы с коррекцией искажений за счет применения ОВФ и динамической голографии. Описанию схем разработанных в данном направлении, а также, в частности, описанию

экспериментов по исследованию динамических голограмм с записью трансформированными пучками, и посвящена данная работа.

### **Цель работы и задачи исследования**

Целью настоящей работы было расширение возможностей динамической голографической коррекции (расширение спектрального диапазона, увеличение энергетической эффективности, упрощение и удешевление схмотехники) за счет применения усовершенствованных схем записи корректора. Для ее достижения решались следующие задачи:

1. Исследование схем с телевизионным и компьютерным переносом интерферометрической информации.
2. Исследование схем двухдлинноволновой голографии.
3. Исследование путей повышения дифракционной эффективности корректора за счет асимметризации его профиля.

### **Научная новизна работы**

1. Впервые в эксперименте реализована динамическая голографическая коррекция в ИК диапазоне с применением жидкокристаллического пространственного модулятора света, адресуемого видимым излучением. Для этой цели впервые применен двухдлинноволновый динамический голографический конвертер масштаба искажений.
2. Впервые в эксперименте в реальном времени реализована динамическая голографическая коррекция (компенсация) искажений с применением ОА ЖК ПМС и телевизионно-компьютерного переноса интерферометрической информации с записью корректора некогерентным вспомогательным излучением. Показана применимость такой схемы для произвольного спектрального диапазона корректируемого пучка излучения.
3. Впервые экспериментально подтверждена возможность цифровой асимметризации профиля картины интерференции двух пучков с применением оптимального алгоритма, основанного на использовании сугубо локальной информации.
4. Впервые в эксперименте реализована динамическая асимметризация профиля картины интерференции двух пучков в аналоговом нелинейном интерферометре.

### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Двухдлинноволновая голография позволяет осуществлять масштабирование искажений волнового фронта, что позволяет, в частности, осуществлять динамическую голографическую коррекцию в диапазонах длин волн, где прямая запись динамического голографического корректора невозможна.
2. Телевизионная передача интерферометрической информации позволяет реализовывать динамическую голографическую коррекцию при

использовании взаимно некогерентных источников света для записи и считывания голографического корректора. Такая коррекция может осуществляться с частотным сдвигом и при наличии временной задержки.

3. Профиль фазовой решётки может быть преобразован на основе сугубо локальной информации, что позволяет существенно ускорить процедуру цифровой асимметризации.
4. Применение телевизионной передачи интерферометрической информации позволяет упростить оптическую схему записи динамического голографического корректора с асимметричным профилем штриха в петле оптической обратной связи и избежать эффектов оптического гистерезиса в ней.

### **Практическая значимость работы**

1. Применение методов двухдлинноволевой динамической голографии открывает возможность голографической коррекции в ближнем и среднем ИК-диапазонах спектра, а также к расширению масштаба искажений, измеряемых в режиме реального времени с помощью двухлучевого интерферометра.
2. Применение телевизионной передачи интерферометрической информации существенно упрощает оптическую схему записи голографического корректора, а также открывает возможность голографической коррекции с помощью оптически адресуемых корректоров в спектральных диапазонах, где их прямая запись невозможна.
3. Цифровая и аналоговая асимметризация профиля интерференционной картины в режиме реального времени позволяют осуществлять высокоэффективную динамическую голографическую коррекцию с помощью тонких динамических голограмм.

### **Апробация результатов работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались: на международных конференциях «Оптика Лазеров – 98, 2000, 2003, 2006, 2008 и 2010», Ст.-Петербург, июнь 1998, 2000, 2003, 2006, 2008 и 2010 гг., на 1-ой и 2-ой конференциях по высокоразрешающему управлению волновыми фронтами – методам, устройствам и применениям (High-Resolution Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications I & II), Денвер, США, июль 1999 г. и Сан-Диего, США, июль 2000 г., на 5-ой конференции по оптике в распространении по атмосфере и адаптивных системах (Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems V), Агиа Пелагиа, Крит, Греция, сентябрь 2002 г., на 5-ом международном семинаре по применению адаптивной оптики в промышленности и медицине (5th International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine), Пекин, КНР, август 2005 г., на конференции «Голография:

достижения в классической голографии и современные тренды» (Holography: Advances in Classical Holography and Modern Trends), Прага, Чехия, 2009 г. и на молодежной научной конференции «Физика и Прогресс», Ст.-Петербург, ноябрь 2008.

### **Публикации**

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 10 статьях и докладах, среди которых 3 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в действующий перечень ВАК. Доклады доложены и получили одобрение на 12 международных и всероссийских научных конференциях, перечисленных выше.

### **Личный вклад**

Все представленные в диссертации результаты получены и выполнены лично автором или при его непосредственном участии. Научному руководителю В.Ю. Венедиктову принадлежит постановка общей темы исследований и формулировка отдельных задач.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 80 наименований. Основная часть работы изложена на 136 страницах машинописного текста. Работа содержит 46 рисунков.

#### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** кратко обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель работы, ее научная новизна и научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен аналитический обзор литературы по различным методам нелинейно оптической коррекции аберраций в телескопических системах.

Аналитический обзор показал, что наиболее перспективными и удобными в применении, в динамической голографической коррекции, являются оптически адресуемые жидкокристаллические пространственные модуляторы света (ОА ЖК ПМС).

Схема одного из наиболее значительных экспериментов по коррекции искажений в модельном телескопе с деформированным главным зеркалом представлена на рис.1. Работа системы носила циклический характер, причем каждый цикл разбивался на два этапа. На первом этапе работы системы с помощью импульсного лазера происходило зондирование искажений телескопической системы и запись голографического корректора. На втором этапе, когда импульсное излучение в системе отсутствовало, наблюдение тест-объекта велось через главное зеркало и голографический корректор. Результаты эксперимента представлены на рис.2.

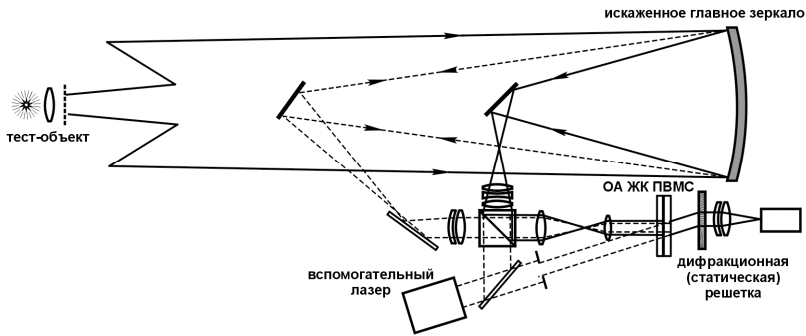


Рис.1.Схема телескопической системы с голографической коррекцией искажений

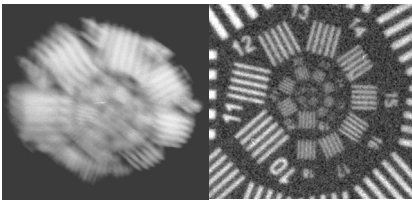


Рис.2. Искаженное изображение тест-объекта, формируемое деформированным главным зеркалом и изображение после коррекции искажений.

Несмотря на достоинства применения ОА ЖК ПМС в голографической коррекции (простоту схемных решений, возможность корректировать очень глубокие искажения волнового фронта и быстрый отклик корректора) у такого прямого подхода есть и ограничения – доступность записи только в видимом диапазоне света и большие потери (максимальная дифракционная эффективность 30-40%).

Есть несколько путей преодоления этих ограничений, а именно применение двухдлинноволновой голографии, телевизионной передачи интерференционной картины и компьютерной голографии и асимметризация профиля штриха, которые и исследовались в данной работе.

**Во второй главе** описаны эксперименты, посвящённые коррекции искажений в ИК диапазоне при помощи метода двухдлинноволновой голографии.

Ограничение применения оптически адресуемых модуляторов обусловлено тем что фотопроводник используемый в них, чувствителен только в видимом диапазоне и в самом ближнем ИК диапазоне (длины волн до 0.8-0.9 мкм). Не существует полупроводников чувствительных к излучению на длине волны 1 мкм и более, которые могли бы быть использованы в качестве фоточувствительного слоя. Невозможно создать ЖК ПМС, которые были бы восприимчивы к излучению в ИК-диапазоне; однако, вполне возможно создать ЖК элементы управляемые видимым излучением для преобразования излучения в полосе 1-12 мкм.

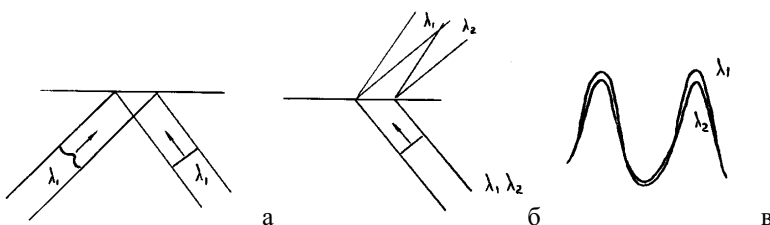


Рис.3. Масштабирование искажений при двухдлинноволновой голографии. (а) – запись тонкой динамической голограммы, (б) – считывание ДГ на двух разных длинах волн, (в) – масштабированные искажения

Как известно, голограмму можно воспроизвести не только на длине волны ее записи, а также излучением со сдвинутой длиной волны (рис.3). При этом вычитание фазовых искажений будет не полным. Использование различных длин волн излучения на стадиях записи голограммы и ее восстановления приводит к масштабированию искажений волнового фронта. Используя схему голографического конвертора масштаба искажений волнового фронта, можно обеспечить масштабирование искажений со значительным уменьшением их абсолютной величины. Эта схема обеспечивает запись видимым светом на двух длинах волн голограммы некоего объекта, идентичной эффективной голограмме этого объекта, записанной излучением с большей длиной волны. Её воспроизведение искаженным пучком излучения среднего ИК-диапазона приведет к восстановлению плоской волны, то есть к выполнению фазового вычитания.

Расчитать эффективную длину волны можно по простой формуле

$$\lambda_{\text{эфф}} = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2| \quad (1)$$

В эксперименте была осуществлена динамическая голографическая коррекция в среднем ИК диапазоне. Специально для этого был разработан модулятор оригинальной конструкции. В обычных модуляторах используются диэлектрические зеркала, расположенные между слоем фотопроводника и жидкого кристалла, но тут в качестве зеркала использовался тонкий слой золота, расположенный между фотопроводником и стеклянной подложкой. Такое зеркало хорошо отражает излучение ИК диапазона, и может пропускать излучение в видимом диапазоне.

В качестве подготовительного был выполнен эксперимент, целью которого являлось исследование возможности записи в ОА ЖКПМС решёток с пилообразным профилем штриха и считывания записанного корректора в ИК диапазоне на длине волны 3мкм. В данном случае использовался YAG:Er лазер с длиной волны 2,94 мкм. На модулятор проецировалось изображение прозрачного транспаранта с помощью некогерентного осветителя. Дифракционная эффективность в данном эксперименте составляла 75%.

Для записи корректора использовалось излучение Ar лазера. Выбранные длины волн 488 нм (“синяя”) и 514 нм (“зелёная”) обеспечивали запись дифференциальной голограммы, соответствующей корректируемой



длине волны  $\approx 9.7$  мкм, которая довольно близка к стандартной длине волны  $\text{CO}_2$ -лазера 10.6 мкм, который использовался в качестве считывающего лазера. Корректировался наклон двух элементов составного зеркала.

Наблюдалась практически полная коррекция угловой разъюстировки двух пучков. Дифракционная эффективность корректора была примерно равна 1% в первый порядок дифракции.

**Третья глава.** Как указывалось выше, проблема коррекции искажений в ближнем ИК диапазоне может быть решена не только с помощью методов двухдлинноволновой голографии. Как известно, нет чувствительных в области ИК диапазона фотопроводников используемых в ОАЖКПМС. Зато в этом диапазоне чувствительны ПЗС матрицы. Поэтому очередным шагом на пути решения задач динамической коррекции с непрямой записью, является схема, в основу которой лёг симбиоз методов нелинейной и линейной адаптивных систем, а именно, схема динамической голографической коррекции (ОВФ) с телевизионной передачей голографической информации. В схеме соответствующего эксперимента коррекция производилась в видимом диапазоне, но она применима и для коррекции в ИК диапазоне. Суть работы данной схемы заключается в следующем.

Излучение одного из лазеров разделялось на опорный и сигнальный пучки. Сигнальный пучок проходил через абератор и в плоскости ПЗС-матрицы интерферировал с опорным сигналом. Картина интерференции опорной и сигнальной волн регистрировалась ПЗС-матрицей, воспроизводилась мультимедийным проектором и переносилась на модулятор.

Пучок излучения считывающего лазера направлялся на модулятор со стороны слоя ЖК. Световая волна, продифрагировавшая в минус первый порядок дифракции, имела волновой фронт, обращенный по отношению к искаженной сигнальной волне. После прохода через абератор внесенные им искажения вычитались, и на выходе системы формировался пучок с высоким оптическим качеством.

Использование внутренних регулировок проектора позволило совмещать в плоскости модулятора изображения интерференционных картин с большой точностью, около 30 мкм. В качестве абераторов использовались различные оптические элементы: оптические клинья; сферическая линза; цилиндрическая линза; стеклянная пластина, травленая в плавиковой кислоте, увеличивающая расходимость волнового пучка в по сравнению с дифракционной примерно в 50 раз. Важно отметить, что в этом эксперименте можно было наблюдать процесс коррекции искажений в динамическом режиме. Таким образом, экспериментально была подтверждена работоспособность схемы записи динамического голографического корректора с компьютерно – телевизионной передачей интерферометрической картины и ее применимость для осуществления ОВФ излучения маломощного непрерывного лазера.

**Четвёртая глава** посвящена возможности повышения дифракционной эффективности голограммы записываемой в ОА ЖК ПМС. Одним из подходов решения данной проблемы является преобразование профиля штриха записываемой решётки на ЖК ПМС из синусоидального в пилообразный, или его ассиметризация. (Известно, что максимальная дифракционная эффективность решёток с синусоидальным профилем штриха не может быть выше 30-40%, в то время как дифракционная эффективность решётки с пилообразным профилем штриха может приближаться к 100%). **Первая часть главы** посвящена **цифровому** способу ассиметризации профиля штриха. Надо сказать, что уже предпринимались эксперименты (Марком Грюнайzenом) в которых цифровым способом, при помощи компьютера преобразовывали профиль штриха. Быстродействие и применимость подобного подхода сильно зависят от используемого алгоритма ассиметризации профиля интерференционной картины. В его работе использовался простейший подход, весьма сходный с обычным алгоритмом расшифровки интерферограмм.

В таком подходе для каждого участка интерферограммы проводится анализ направления полос и перпендикулярного ему направления самого быстрого изменения разности фаз. Далее проводится поиск соседних максимумов и минимумов и замена синусоидального профиля штриха пилообразным. Такая процедура связана с обработкой очень большого и, строго говоря, весьма избыточного, объёма информации. Кроме того, при немономонном характере интерференционной картины возможна ошибка в выборе направления нарастания зубца «пилы».

В данной диссертационной работе рассматривается иной алгоритм ассиметризации профиля интерференционной картины, основанный на использовании только локальной (поточечной) информации о разности фаз интерферирующих пучков.

Для простоты рассматривается случай интерференции двух волн равной интенсивности. В этом случае распределение интенсивности картины интерференции двух световых волн, описывается зависимостью вида:

$$I(x, y) = I_0(1 + \cos \Delta\varphi(x, y)) \quad (2)$$

где  $x$  и  $y$  – поперечные координаты, а  $\Delta\varphi(x, y)$  - разность фаз интерферирующих пучков.

Если одна из волн отличается дополнительной разностью фаз в  $\pi/2$ . то в этом случае распределение интенсивности в интерференционной картине подчиняется закону:

$$I(x, y) = I_0(1 + \cos(\Delta\varphi(x, y) - \pi/2)) = I_0(1 + \sin \Delta\varphi(x, y)). \quad (3)$$

Если мы имеем информацию о распределении интенсивности в обоих случаях, мы легко можем получить для каждой точки интерференционной картины значения синуса и косинуса разности фаз. Эта информация позволяет вычислить и величину тангенса половины указанной разности фаз:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\Delta\varphi(x,y)}{2}\right) = \frac{\sin \Delta\varphi(x,y)}{1 + \cos \Delta\varphi(x,y)} \quad (4)$$

а на ее основе может быть синтезирована функция вида

$$f(x,y) = \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\Delta\varphi(x,y)}{2}\right)}{1 + \left|\operatorname{tg}\left(\frac{\Delta\varphi(x,y)}{2}\right)\right|} \quad (5)$$

На рис.4 приведён рассчитанный график такой функции при изменении координаты  $x$ . Как видно из графика, такая функция практически идеально соответствует искомому пилообразному профилю. Зная величину  $\sin \Delta\varphi(x,y)$  и  $\cos \Delta\varphi(x,y)$  в каждой точке интерферограммы, можно вычислить для этой точки значение этой функции и использовать массив ее значений в качестве синтезированной интерферограммы для записи динамической голографической решетки.

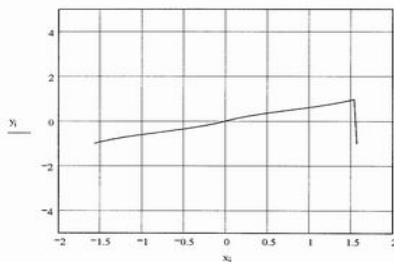
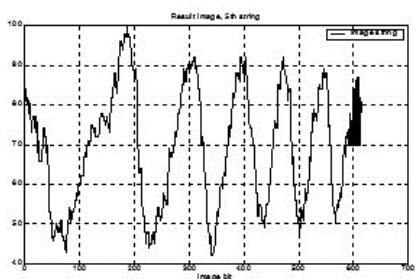


Рис.4 График функции

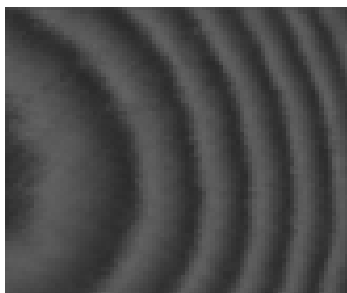
$$f(x,y) = \frac{\operatorname{tg}(x)}{1 + |\operatorname{tg}(x)|}$$

Описанный алгоритм был успешно применен к интерферограммам, полученным в эксперименте. Для реализации указанного алгоритма необходимо иметь две картины интерференции одного и того же пучка, которые идентичны с точностью до сдвига фаз в  $\pi/2$ . С этой целью был разработан двухлучевой интерферометр, в одном из плеч которого был размещен элемент с управляемым набегом фазы. В качестве такого элемента использовалась так называемая S-ячейка. Интерферограммы, полученные для двух значений фазового набега в S-ячейке, отличающихся на четверть длины волны лазерного излучения, записывались с помощью ПЗС-матрицы в память персонального компьютера и использовались в процедуре асимметризации.

Полученные данные делились на максимальную интенсивность  $2I_0$ . После чего получалось два распределения, одно из которых трактовалось как  $(1 + \cos \Delta\varphi(x,y))$ , а другое как  $(1 + \sin \Delta\varphi(x,y))$ . Далее вычислялся массив значений функции  $f(x,y) = \frac{\operatorname{tg}(x)}{1 + |\operatorname{tg}(x)|}$ , а затем вычислялся массив значений функции  $I_{\text{asymmetrical}}(x,y) = I_0(1 + f(x,y))$ , который затем воспроизводился в интерферограмме с асимметризованным профилем. Синтезированные интерферограммы пригодны для записи голограммы с Д.Э. близкой к 100% (пример на рис.5).



а)



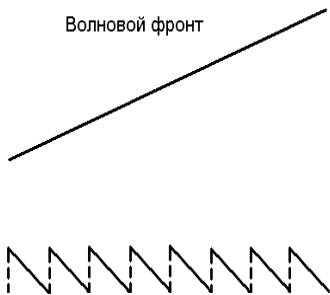
б)

Рис.5. Пример синтезированной интерферограммы и ее профиля.

Предложенный алгоритм может быть применен для записи динамических тонких голограмм с ДЭ, близкой к 100%, при этом, в отличие от ранее использовавшихся, он свободен от обработки излишней информации и обладает значительно более высоким быстродействием.

Во второй части главы 4, описано экспериментальное исследование схемы по преобразованию профиля штриха аналоговым методом, а именно реализация записи тонкой динамической голографической решётки в петле оптической обратной связи с телевизионным замыканием. Прежде чем описать работу схемы, необходимо отметить, что её работа основана на явлении так называемой  $2\pi$  неопределенности. Обнаружено это явление было при изучении схемы ЖК корректора в петле отрицательной обратной связи. Было обнаружено что при больших фазовых искажениях т.е. при глубине фазового искажения больше чем длина волны считывающего излучения (больше чем  $2\pi$ ), управляющий элемент не различает изменений фазы поля, кратных  $2\pi$ . В результате апертура корректора разбивается на ряд доменов, на границе которых происходит скачок фазы в  $2\pi$ .

Такой "разбитый на части" корректор может быть эффективно использован не во всей области прозрачности ЖК, а только в довольно узкой спектральной зоне  $\Delta\lambda \ll \lambda$ . Следует отметить, что для решения  $2\pi$ -проблемы в технике ООС-коррекции можно применить методы масштабирования волнового фронта с помощью двухдлинноволновой голографии. И наоборот, само по себе явление  $2\pi$ -неопределенности послужило основой для решения задачи по асимметризации профиля штриха динамических голограмм записываемых в модуляторах аналоговым способом. Схема записи голограммы похожа на известные схемы динамической коррекции в петле отрицательной оптической обратной связи нелинейного оптического интерферометра. Однако в отличие от этих схем волновые фронты референтной и сигнальной волн наклонены относительно друг друга. В предлагаемой схеме домены приобретают вид узких полос, распределение фазы внутри которых имеет вид клина (см.рис. 6). Иными словами, в такой схеме должна записываться дифракционная решетка с асимметричным профилем штриха.



Профиль фазовой задержки в ОА ПМС

Рис. 6. Запись динамических голографических решеток с асимметричным профилем штриха при использовании оптической системы с обратной связью.

Была предпринята попытка реализации схемы в которой перенос изображения осуществлялся оптическим методом. Однако, при проведении эксперимента была выявлена трудность. Она состояла в необходимости соблюдать высокую точность совмещения при переносе изображения, до 20 мкм. В предлагаемой схеме замыкание петли ООС осуществляется телевизионно-компьютерным методом. Применение такого метода позволяет существенно упростить оптическую схему. Работа схемы (рис.7) заключается в следующем: Излучение He-Ne лазера направлялось в интерферометр Майкельсона. Световые пучки, отраженные зеркалом и внутренним зеркалом модулятора сводились под

небольшим углом и интерферировали на ПЗС-матрице. При этом линза строила на матрице изображение плоскостей зеркала и модулятора. Сигнал с ПЗС камеры в реальном режиме времени поступал на вход персонального компьютера и с него на мультимедийный проектор. Воспроизводимое компьютером изображение интерференционной картины строилось проектором на рассеивающем белом экране и проецировалось высококачественным объективом в плоскость модулятора.

Процесс установления профиля решетки был численно смоделирован. Распределение фазы в модуляторе зависит от интенсивности управляющего излучения  $I(x,y)$  и задается следующим соотношением:

$$\varphi(x, y) = \gamma \cdot I(x, y) \quad (6)$$

$\gamma$ -коэффициент пропорциональности (чувствительность к внешнему записывающему полю.)

При замыкании петли обратной связи происходит интерференция двух световых волн, одна из которых плоская, а вторая несет информацию о текущей фазе модулятора, которая в начальный момент времени также является плоской. Результат этой интерференции можно записать в следующем виде:

$$I(x) = I_{rr} [1 + p \sin(kx + \varphi(x, y))] \quad (7)$$

$k$  – волновой вектор,  $I_{rr}$  и  $p$  – коэффициенты близкие к единице (их значения зависят от потерь в петле ООС и внутри модулятора).

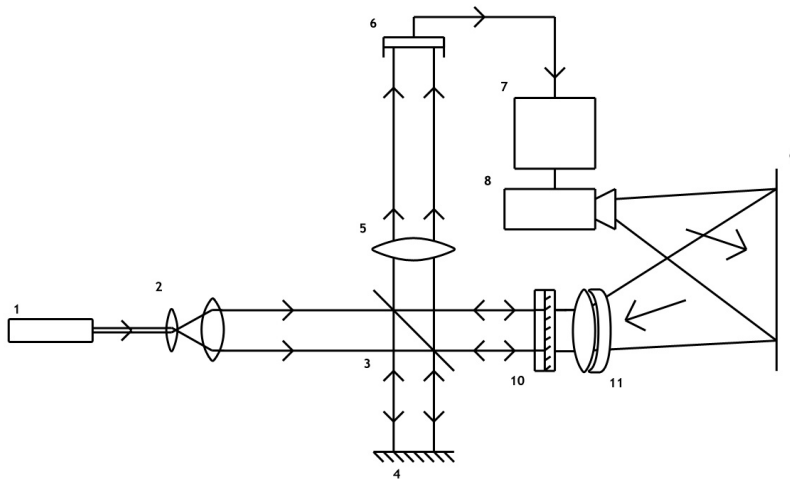


Рис.7. Схема экспериментальной установки по ассиметризации профиля штриха аналоговым способом с телевизионно-компьютерным методом переноса интерференционной информации. На рисунке: 1 – He-Ne лазер, 2 – коллиматор, 3 – светоделитель, 4 – зеркало, 5 – линза, 6 – ПЗС-камера, 7 – персональный компьютер, 8 – мультимедийный проектор, 9 – рассеивающий экран, 10 – ОА ЖК ПМС с внутренним зеркалом, 11 – объектив.

Полученная в результате этого выражения интенсивность определяет фазовый профиль модулятора. Моделирование показало, что данный итерационный процесс довольно быстро сходится к некому предельному профилю, и этот профиль близок к искомому пилообразному (см. рис.8).

Был также произведен расчет дифракционной эффективности. Расчет был произведен по формуле Геймгольца-Киргофа, где интенсивность в точке Р вычисляется как результат интерференции вторичных сферических волн:

$$I(P) = \frac{i}{2\lambda} \iint u(x, y) \frac{e^{-ikr}}{r} (1 + \cos \theta) dS \quad (8)$$

$U(x,y)$  – профиль интенсивности на поверхности модулятора

Р – точка в которой вычисляется интенсивность.

$\frac{e^{-ikr}}{r}$  сферическая волна,  $\theta$  – угол направления до искомой точки.

Данный расчет основан на интегрировании вторичных волн с поверхности модулятора для каждого направления. Интенсивность равна:

$$D(\theta) \sim \int_0^{2\pi} \left[ \int_{-1}^1 \sin(t + kr + I(t)) dt \right]^2 dt \quad (9)$$

D – интенсивность дифракции, t – начальная фаза, r – расстояние до плоскости перпендикулярной направлению искомого порядка дифракции,  $I(t)$  – фазовый профиль модулятора

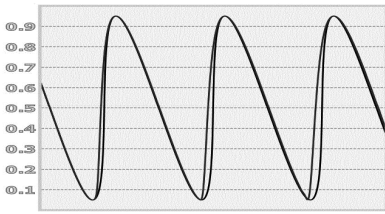


Рис.8. Установившийся профиль решетки

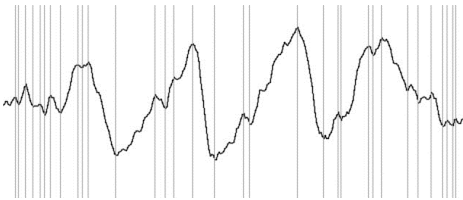


Рис. 9. Сечение интерференционной картины после установления асимметричного профиля.

Расчет показал дифракционную эффективность в 70-75%. Этот результат близок к значениям дифракционной эффективности асимметричных динамических голограмм, записываемых цифровым способом.

В заключении приведены основные выводы и результаты работы.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- Проведено экспериментальное исследование динамической голографической коррекции в телескопе с помощью оптически адресуемого жидкокристаллического ПМС.
- Экспериментально исследована схема динамической голографической коррекции в среднем ИК-диапазоне с применением методов двухдлинноволновой голографии.
- Реализована схема динамической голографической коррекции (ОВФ) с ТВ-передачей голографической информации.
- Экспериментально подтверждена работоспособность асимметризации профиля интерференционной картины на основе локальной информации.
- Экспериментально реализована запись тонкой динамической голографической решетки в петле оптической обратной связи с телевизионным замыканием.

Внутренний интеграл описывает интерференцию вторичных волн. Внешний интеграл суммирует квадраты амплитуды итоговой волны для каждой начальной фазы от 0 до  $2\pi$ , что, собственно, и соответствует интенсивности волны. Эффективность дифракции в (-1) порядок для кривой, представленной на рис.8, оказалась равной 90%.

Изложенные соображения были проверены в эксперименте (см. рис.7). Эксперимент показал, что в такой системе после смены 4-5 кадров с момента включения питания модулятора, картина интерференции двух пучков приобретала отчетливую асимметрию. Пример сечения интерференционной картины приведен на рисунке 9.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Berenberg V.A., Freygang N.N., Leshchev A.A., Semenov P.M., Vasil'ev M.V., Venediktov V.Yu. Imaging bypass system with correction for primary mirror distortions. Proc. SPIE, 1999, Vol. 3760, p. 153-161.
2. Berenberg V.A., Danilov V.V., Freygang N.N. *et al.* Holographic correction in mid-IR using OA LC SLM elements. Proc. SPIE, 2000, Vol. 4124, p. 257-264.
3. Berenberg V.A., Petrushin Yu.A., Venediktov V.Yu., Amosova L.P., Gruneisen M., Freygang N.N. New elements and schemes for holographic correction in mid-IR. Proc. SPIE, 2002, Vol. 4884, pp. 291-297.
4. Berenberg V.A., Freygang N.N., Leshchev A.A. *et al.* System of phase conjugation with a two-stage holographic corrector recording scheme. Proc. SPIE, 2005, Vol. 6018, p.6018OJ-1.
5. А. А. Лещев, В. А. Беренберг, М. В. Васильев, В. Ю. Венедиктов, Н. Л. Иванова, Ю. А. Петрушин, П. М. Семенов, Н. Н. Фрейганг. ОВФ низкоинтенсивного лазерного излучения в схеме с тонкой динамической голограммой и телевизионной передачей интерферометрической информации. Квантовая Электроника, 2007, 37 (8), 716-719.
6. В. Ю. Венедиктов, Н. Н. Фрейганг. Асимметризация профиля динамической голографической решетки на основе сугубо локальной информации. Оптика и Спектроскопия, 2008, т.104, вып.2, стр.347-351.
7. В. А. Ласкин, Н. Н. Фрейганг. Экспериментальное исследование схемы записи динамического голографического корректора с дифракционной эффективностью близкой к 100%. Тезисы докладов молодежной научной конференции «Физика и Прогресс», Ст.-Петербург, 2008, стр.55.
8. В. А. Ласкин, Н. Н. Фрейганг. Экспериментальное исследование схемы записи динамического голографического корректора с дифракционной эффективностью близкой к 100%. Сборник трудов молодежной научной конференции «Физика и Прогресс», Ст.-Петербург, 2008, стр.116-120.
9. Venediktov V.Yu., Freygang N.N., Laskin V.A.. Record of thin dynamic holographic grating with asymmetrical fringe profile in optical feedback loop with TV-closure Proc. SPIE, 2009, Vol. 7358, pp. 73580T-1 - 73580T-6.
10. В. Ю. Венедиктов, Н. Л. Иванова, В. А. Ласкин, Н. Н. Фрейганг. Асимметризация профиля тонкой динамической голографической решетки в петле оптической обратной связи с телевизионным замыканием. Квантовая Электроника, 2009, 39 (10) 973–976.