

1551267

Московский

ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового  
Красного знамени государственный технический университет  
им. Н.Э.Баумана

---

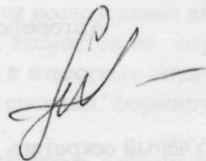
На правах рукописи

Лысенко Галина Артуровна

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ,  
ФОРМИРУЮЩИЕ КВАДРАТУРНЫЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ  
СИГНАЛЫ

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук



Москва - 1996г.

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Д.Т.Пуряев

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Г.М.Мосягин,

кандидат технических наук, старший  
научный сотрудник В.Г.Поспехов

Ведущая организация – ГП НПО "Астрофизика"

Защита состоится "6" сентября 1996г. на заседании специализированного Совета К 053.15.02 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, дом 5.

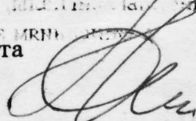
Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан "30" апреля 1996г.

Учёный секретарь  
специализированного Совета

К.Т.Н.

 В.П.Погребенов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. С развитием науки и техники постоянно повышаются требования к точности и скорости измерения физических величин. Важнейшее место занимают измерения расстояний и линейных перемещений, доля которых в одной из основных отраслей промышленности - машиностроении - составляет не менее 90%.

Для повышения точности и производительности линейных измерений всё чаще применяют лазерные интерференционные системы (ЛИС). Полагают, что они обладают запасом точности, который обеспечит развитие техники на ближайшие несколько десятилетий.

Среди известных ЛИС значительное число действуют по принципу реверсивного счёта полос и построены на основе оптических систем, формирующих квадратурные интерференционные сигналы. Квадратурными интерференционными сигналами (КИС) называют два интерференционных сигнала, полученные в результате преобразования одной и той же оптической разности хода лучей в интерферометре, сдвинутые по фазе на  $\pi/2$  рад.

Для формирования КИС в оптических системах наиболее широко применяют поляризационный метод, основанный на преобразовании поляризации интерферирующих пучков. Предложено значительное число оптических систем, которые могут быть использованы с этой целью. К сожалению, процесс формирования КИС в этих системах описан, исходя из идеальных поляризационных характеристик оптических элементов, а информация о влиянии поляризационных свойств реальных оптических элементов и о действительных значениях параметров КИС отсутствует. Без этих сведений невозможно:

- сравнить эффективность различных оптических систем;
- обоснованно выбрать оптическую систему;
- определить оптимальные требования к точности изготовления оптических деталей, к конструкции оптико-механических узлов и к параметрам электронной системы при разработке ЛИС.

Основной целью настоящей работы является исследование влияния поляризационных свойств реальных оптических элементов на параметры квадратурных интерференционных сигналов в известных оптических системах и разработка оптимальной оптической системы, формирующей квадратурные интерференционные сигналы.

Так как по разрозненным описаниям в литературе сложно полу-



дать полное представление о роли и перспективах развития ЛИС; построены на основе оптических систем, формирующих КИС; одной из основных целей работы является определение сфер и перспектив применения этих систем.

Для достижения указанных выше целей были поставлены и решены следующие задачи.

1. На основе анализа и систематизации известных ЛИС по принципам измерения и методам обработки интерференционных сигналов определить области и перспективы применения ЛИС, построенных на основе оптических систем, формирующих КИС.

2. Исследовать влияние поляризационных свойств реальных оптических элементов на качество КИС в базовых оптических системах, реализующих известные способы формирования КИС, и возможность оптимизации этих систем с целью достижения максимально высокого качества КИС.

3. Найти способ формирования КИС, который позволяет разработать оптимальную оптическую систему, исходя из реальных поляризационных характеристик оптических элементов.

4. Разработать метод расчёта оптимальной оптической системы, формирующей КИС.

Методы исследований. Исследования поляризационных свойств реальных оптических элементов и их влияния на качество КИС выполнялись методами математического моделирования с использованием ЭВМ типа IBM AT. Проверка основных теоретических положений диссертации проведена экспериментально на опытной образце лазерного интерференционного преобразователя линейных перемещений; оптическая система которого разработана на основе предложенного способа формирования КИС и метода расчёта оптимальной оптической системы.

Основными положениями диссертации, выносимыми на защиту, являются следующие.

1. Известные способы формирования квадратурных интерференционных сигналов, основанные на преобразовании идеальных форм поляризации, не позволяют получить высокое качество сигналов в реальной оптической системе без трудоёмкой оптимизации ее поляризационных параметров.

2. Новый способ формирования квадратурных интерференционных сигналов, основанный на эллиптических формах поляризации интерферирующих лучей, позволяет учесть поляризационные свойства

реальности оптических элементов в сочетании с предложенным методом проектирования оптической системы, которая обеспечивает более высокое качество сигналов по сравнению с другими системами.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые в исследуемой области техники:

1) показано, что матрица Джонса углового отражателя полного внутреннего отражения, описывающая его поляризационные свойства, зависит от выбора знаков в формулах Френеля; предложен метод определения знаков;

2) установлено, что аргументы амплитудного коэффициента отражения светоделительного элемента для противоположных направлений падения излучения могут быть различны; разность амплитудных коэффициентов отражения существенно влияет на работу оптических систем, формирующих КИС поляризационным методом;

3) доказано, что в оптических системах, реализующих способы формирования КИС, основанные на преобразовании идеальных форм поляризации излучения, деполаризующее действие оптических элементов нарушает требуемые идеальные формы поляризации и приводит к существенному снижению качества КИС; выявлены пути оптимизации известных оптических систем с целью улучшения качества КИС.

4) предложены новый способ формирования КИС и метод расчёта, которые позволяют разработать оптимальную оптическую систему, содержащую минимальное число оптических элементов и обеспечивающую высокое качество КИС; новизна оптической системы, разработанной на основе предложенных способа формирования КИС и метода расчёта подтверждена патентом Российской Федерации № 1916022.

Научная ценность результатов работы заключается в следующем.

1. Поучительные в диссертации результаты позволяют для известных оптических систем:

- рассчитать параметры КИС при заданных поляризационных свойствах оптических элементов;

- оценить эффективность и обоснованно выбрать оптическую систему;

- оптимизировать оптическую систему с целью достижения наи-

лучшего качества КИС; - определить требования к точности изготовления оптических деталей, к конструкции оптико-механических узлов и к параметрам электронной системы при разработке ЛИС.

2. Новый способ и предложенный метод расчёта позволяют разработать оптимальную оптическую систему, в которой формируются КИС максимально высокого качества с использованием минимального числа оптических элементов.

Реализация и внедрение. Полученные в диссертации научные результаты использованы при разработке серийной модели лазерного интерференционного преобразователя линейных перемещений, два опытных образца которого успешно прошли государственные испытания, что подтверждено актом о внедрении.

Апробация результатов работы. Теоретические положения и практические результаты диссертации доложены и обсуждены на отраслевом научно-техническом семинаре "Лазеры в технологии", Брянск, апрель 1991 г.; всесоюзном научном семинаре "Метрология лазерных измерительных систем", Волгоград, май 1991 г.; студенческой научно-технической конференции "Студенческая научная весна – МГТУ'94", Москва, май 1994 г.

Публикации. Основные результаты работы изложены в двух отчётах по НИОКР, в тезисах отраслевого научно-технического семинара, в двух статьях, защищены патентом Российской Федерации.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения; изложена на 174 страницах машинописного текста, содержит 29 рисунков, 17 таблиц, 5 приложений и список литературы, включающий 150 наименований, – всего 206 страниц.

## СОДЕРЖАНИЕ

Во введении кратко охарактеризованы область применения и назначение оптических систем, формирующих КИС, показана актуальность и обоснована необходимость исследования качества КИС в этих системах. Поставлены цели и определены задачи исследования. Изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу современного состояния проблемы измерения расстояний и линейных перемещений посредством ЛИС,

в рамках которого выявлены области применения ЛИС, построенных на основе оптических систем, формирующих КИС, перспективы их развития, способы формирования КИС и параметры для оценки их качества.

В разделе 1.1 предложена классификация известных ЛИС по двум принципам измерения расстояний: принципу измерения приращений геометрической разности хода и принципу измерения абсолютной геометрической разности хода лучей в интерферометре, -- а также по методам и способам их практической реализации. Показано, что на основе оптических систем, формирующих КИС, могут быть построены ЛИС, измеряющие приращения геометрической разности хода методом счёта полос, и ЛИС, измеряющие абсолютную геометрическую разность хода методом плавной перестройки частоты. Среди прочих систем, предназначенных для решения аналогичных задач, ЛИС на основе оптических систем, формирующих КИС, являются наиболее быстродействующими. В то же время, они наиболее функционально и конструктивно простые, а следовательно, наиболее дешёвые. По мнению автора диссертации, применение оптической системы, формирующей КИС, особенно перспективно с точки зрения объединения в одной ЛИС двух принципов измерения, так как, с одной стороны, введение дополнительного интерферометра с КИС приводит к минимальным функциональным и конструктивным усложнениям ЛИС, а, с другой стороны, на основе оптической системы, формирующей КИС, оба принципа измерения могут быть объединены органично, с использованием одних и тех же оптических элементов и электронных систем обработки сигналов.

В п. 1.2 исследованы известные методы формирования КИС в оптической системе. Установлено, что для формирования КИС осуществляют деление излучения по фронту или по амплитуде. При измерении расстояний и линейных перемещений в значительном диапазоне используют, главным образом, деление по амплитуде, позволяющее получить стабильные параметры КИС за счёт снижения влияния флуктуаций атмосферы и разбюстировок оптической системы интерферометра. При этом, требуемые значения параметров КИС обеспечивают поляризационным методом, суть которого заключается в построении анизотропной интерференционной оптической системы, в которой разность фаз между интерферирующими волнами зависит от направления их поляризации. С этой целью обеспечивают особые поляризационные свойства элементов интерферометра (светоделителей и отражателей), устанавливают дополнительные оптические элементы (фазовые пласти-

ны, поляризаторы и др.) в плечи интерферометра, на его входе и выходе, определённым образом ориентируют все оптические элементы системы.

В литературе предложено большое число оптических систем, формирующих КИС поляризационным методом, которые отличаются числом и сложностью используемых элементов. Однако процесс формирования КИС в этих системах описан, исходя из идеальных поляризационных характеристик оптических элементов, в то время как реальные элементы оптических систем интерферометров (угловые отражатели, светоделители, зеркала и др.) в общем случае изменяют состояние поляризации проходящего излучения и снижают качество КИС. Опубликованы работы, в которых рассматриваются поляризационные эффекты в оптических системах, формирующих КИС. Однако они касаются либо отдельных оптических элементов, либо специфических, редко используемых систем, при этом, поляризационные свойства некоторых элементов, по мнению автора диссертации, описаны неточно или неполно (подробно это рассмотрено в главе 2).

Отсутствие информации о действительных значениях параметров КИС не позволяет сравнить эффективность различных оптических систем и объективно выбрать оптическую систему при разработке ЛИС. Для восполнения этого пробела необходимо исследовать влияние поляризационных свойств реальных оптических элементов на качество КИС, формируемых известными оптическими системами. Целесообразно также решить задачу оптимизации известных оптических систем с целью достижения в них максимально высокого качества КИС и задачу разработки оптимальной оптической системы, в которой КИС с заданными параметрами формируются посредством минимального числа оптических элементов.

В п. 1.3 сформулированы условия исследования и определены параметры для оценки качества КИС.

В реальных системах интерферометров присутствует много причин, снижающих качество интерференционных сигналов (расходимость излучения лазера, разъюстировка оптической системы и др.), влияние которых исследовано и описано в литературе. В данной работе расчёты параметров КИС проведены при условии, что на вход интерферометра поступает идеальная плоская монохроматическая волна с равномерным распределением интенсивности по сечению; оптическая система не вносит искажений волнового фронта, не нарушает степень

когерентности и степень поляризации излучения, не вносит потерь интенсивности из-за поглощения, рассеяния и паразитных отражений на границах сред. В этом случае качество КИС определяется только способом их формирования.

Установлено, что при фотоэлектрическом детектировании КИС с помощью фотодиодов и принятых алгоритмах обработки их в электронных системах основными параметрами КИС следует считать амплитуды переменных составляющих их интенсивности  $I_1$  и  $I_2$  и значение фазового сдвига между ними  $\Phi$ .

Для правильного и надёжного функционирования ЛИС необходимо обеспечить равенство амплитуд переменных составляющих и значение фазового сдвига  $\pi/2$  рад, при этом желательно получить по возможности наибольшие значения  $I_1$  и  $I_2$ . Поэтому для оценки качества КИС выбраны следующие параметры:

коэффициент, характеризующий равенство амплитуд переменных составляющих сигналов,  $K_1 = |I_1 - I_2|/I$ , где  $I$  — интенсивность излучения на входе оптической системы;

погрешность значения фазового сдвига между двумя сигналами  $d\Phi = |\Phi| - \pi/2$ ;

коэффициент использования энергии излучения лазера  $K_2 = (I_1 + I_2)/I$ .

Условие максимально высокого качества КИС можно записать в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} I_1 = I_2, \\ \Phi = \pi/2, \\ I_1 = \max. \end{cases} \quad (1)$$

Вторая глава диссертации посвящена теоретическому исследованию влияния поляризационных свойств реальных оптических элементов на работу известных оптических систем, формирующих КИС поляризационным методом.

Анализ литературы позволил сделать вывод, что все известные оптические системы, какими бы сложными они ни были, реализуют один из двух способов формирования КИС, отличающихся формами поляризации интерферирующих волн: обеспечивают либо линейную и круговую, либо ортогональные круговые формы поляризации. Для каждого из этих способов можно выделить базовую оптическую систему, которая содержит минимально необходимое число оптических элементов и

не решает других задач, кроме формирования КИС. Именно базовые системы были выбраны для исследования.

В п. 2.1 изложен метод анализа качества КИС.

Посредством матричного метода Джонса основные параметры КИС  $I_1$ ,  $I_2$  и  $\Phi$  в исследуемой оптической системе могут быть выражены через её поляризационные параметры, характеризующие состояние поляризации излучения на входе системы, собственные поляризационные свойства оптических элементов и их азимуты в системе. Полученные выражения позволяют вычислить реальные значения основных параметров КИС при известных поляризационных параметрах, исследовать зависимость между этими параметрами, оптимизировать оптическую систему с целью достичь максимально высокое качество КИС. Последняя задача сводится к решению системы уравнений (1) относительно поляризационных параметров оптической системы.

Для снижения трудоёмкости проводимых исследований и проверки полученных аналитических зависимостей автором разработана программа для ЭВМ типа IBM на языке FORTRAN, позволяющая рассчитать параметры КИС в оптической системе, построенной по схеме интерферометра Майкельсона, с любым числом оптических элементов на входе, в ветвях и на выходе интерферометра.

П. 2.2 посвящен исследованию поляризационных свойств оптических элементов интерферометров (фазовой пластины, плоского отражателя, уголкового отражателя, светоделителя, поляризатора) и описанию их матрицами Джонса, при этом предложены поправки к принятому в литературе описанию некоторых из них.

В п. 2.2.3 показано, что значения элементов матрицы уголкового отражателя полного внутреннего отражения существенно зависят от выбора знаков в формулах Френеля, используемых при их расчёте. На основе рассмотрения предельных случаев падения излучения на отражающую поверхность доказано, что, в отличие от принятого в литературе, для правильного описания поляризационных свойств отражателя необходимо выбирать противоположные знаки в этих формулах.

В п. 2.2.4 исследованы поляризационные свойства светоделителей на основе многослойных интерференционных диэлектрических покрытий, которые находят наибольшее применение в поляризационных и интерференционных оптических системах. Установлено, что в настоящее время отсутствуют покрытия, обеспечивающие идеальные свойства светоделителя, а именно: деление излучения на две равные по ин-

тенсивности части без изменения состояния его поляризации. На основе анализа выражений для амплитудных коэффициентов пропускания и отражения интерференционного диэлектрического покрытия показано, что аргумент амплитудного коэффициента отражения может быть различен для противоположных направлений падения излучения на покрытие. Следовательно, полное описание поляризационных характеристик светоделиителя должно содержать не две матрицы Джонса (для прошедшего и отраженного излучения), как это принято в литературе, а три: матрицу пропускания и две матрицы отражения для противоположных направлений падения излучения на покрытие.

С помощью программы расчёта оптических характеристик интерференционных диэлектрических покрытий, разработанной автором, исследованы поляризационные свойства покрытий, рекомендованных для применения с лазерными источниками излучения. В результате найдено покрытие, обеспечивающее поляризационные характеристики, наиболее близкие к идеальным, для использования при исследовании качества КИС в оптических системах.

В п. 2.3 и п. 2.4 исследовано качество КИС в базовых оптических системах, реализующих способы формирования КИС на основе линейной и круговой форм и на основе ортогональных круговых форм поляризации интерферирующих волн. Получены аналитические зависимости основных параметров КИС в этих системах от их поляризационных параметров. Подстановка реальных значений последних показала, что они существенно влияют на процесс формирования КИС и снижают их качество.

Исследование возможности улучшить качество КИС позволило установить следующее.

1. Для одновременного выполнения первых двух условий из (1) необходимо иметь два свободных поляризационных параметра. В качестве одного из них удобно выбрать азимут электрического вектора излучения на входе системы. В качестве другого, на этапе разработки оптической системы, может быть выбран один из параметров, характеризующий собственные поляризационные свойства элементов, а в оптической системе с заданными свойствами всех элементов – азимут одного из них. В работе предложены алгоритмы и найдены решения для различных вариантов выбора второго свободного параметра.

2. Значение амплитуд переменных составляющих КИС при выполнении первых двух условий из (1) зависит от оптических характе-

ристик светоделителя: оно тем выше, чем ближе к 0.25 произведение энергетических коэффициентов пропускания светоделителя для ортогональных составляющих электрического вектора падающего излучения. Если оптические характеристики светоделителя заданы и далеки от идеальных, что имеет место на практике, то для решения системы (1) необходимо оптимизировать азимуты всех элементов оптической системы. Оптимизация может быть выполнена расчётным путём, если известны собственные поляризационные характеристики всех элементов (в диссертации приведены результаты такой оптимизации, выполненной в базовых системах), в противном случае её придётся выполнять путём независимого изменения азимутов оптических элементов при непрерывном контроле параметров КИС на выходе оптической системы.

Таким образом, чтобы получить заданные идеальные формы поляризации интерферирующих волн, в известных оптических системах введены дополнительные элементы. Поляризационное действие реальных оптических элементов нарушает требуемые идеальные формы поляризации и приводит к необходимости оптимизации оптической системы с целью улучшения качества КИС. Чем больше дополнительных элементов в системе, тем более трудоёмким является процесс оптимизации.

Глава 3 посвящена разработке оптимальной оптической системы, формирующей КИС, в которой число оптических элементов минимально, а качество КИС не хуже, чем в известных системах.

В п. 3.1 предложен новый способ, в котором задача формирования КИС сформулирована, исходя из эллиптической поляризации интерферирующих волн, что позволяет при разработке оптической системы учесть реальные поляризационные свойства оптических элементов.

Если интерферируют две пары эллиптически-поляризованных волн, векторы Джонса которых в некоторой прямоугольной системе координат  $\{O; x, y\}$  соответственно равны

$$E_{11} = \begin{vmatrix} E_{11x} \cdot \exp \phi_{11x} \\ E_{11y} \cdot \exp \phi_{11y} \end{vmatrix}, \quad E_{12} = \begin{vmatrix} E_{12x} \cdot \exp \phi_{12x} \\ E_{12y} \cdot \exp \phi_{12y} \end{vmatrix}$$

и

$$E_{21} = \begin{vmatrix} E_{21x} \cdot \exp \phi_{21x} \\ E_{21y} \cdot \exp \phi_{21y} \end{vmatrix}, \quad E_{22} = \begin{vmatrix} E_{22x} \cdot \exp \phi_{22x} \\ E_{22y} \cdot \exp \phi_{22y} \end{vmatrix}$$

то систему уравнений (1) можно записать

$$\begin{cases} E_{11x}^2 \cdot E_{12x}^2 \cdot [1 + e_{11}^2 \cdot e_{12}^2 + 2 \cdot e_{11} \cdot e_{12} \cdot \cos(\phi_{1x} - \phi_{1y})] = \\ E_{21x}^2 \cdot E_{22x}^2 \cdot [1 + e_{21}^2 \cdot e_{22}^2 + 2 \cdot e_{21} \cdot e_{22} \cdot \cos(\phi_{2x} - \phi_{2y})], \\ \cos(\phi_{2x} - \phi_{1x}) + e_{11} \cdot e_{12} \cdot e_{21} \cdot e_{22} \cdot \cos(\phi_{2y} - \phi_{1y}) + \\ e_{11} \cdot e_{12} \cdot \cos(\phi_{2x} - \phi_{1y}) + e_{21} \cdot e_{22} \cdot \cos(\phi_{2y} - \phi_{1x}) = 0, \\ E_{11x}^2 \cdot E_{12x}^2 \cdot [1 + e_{11}^2 \cdot e_{12}^2 + 2 \cdot e_{11} \cdot e_{12} \cdot \cos(\phi_{1x} - \phi_{1y})] = \max, \end{cases} \quad (2)$$

где

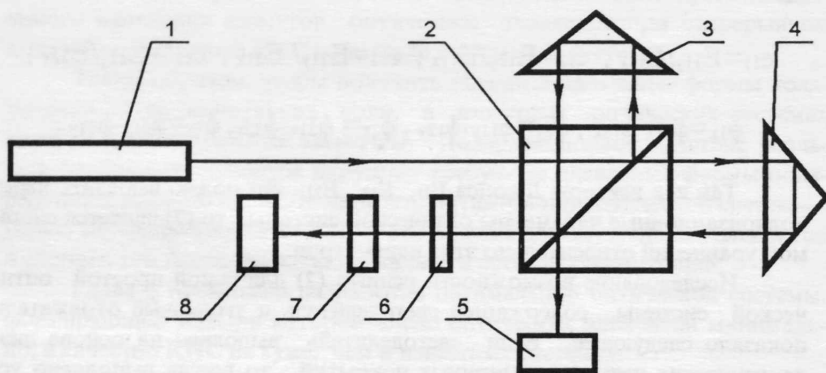
$$e_{11} = E_{11y} / E_{11x}, \quad e_{12} = E_{12y} / E_{12x}, \quad e_{21} = E_{21y} / E_{21x}, \quad e_{22} = E_{22y} / E_{22x},$$

$$\phi_{1x} = \phi_{11x} - \phi_{12x}, \quad \phi_{1y} = \phi_{11y} - \phi_{12y}, \quad \phi_{2x} = \phi_{21x} - \phi_{22x}, \quad \phi_{2y} = \phi_{21y} - \phi_{22y}.$$

Так как векторы Джонса  $E_{11}$ ,  $E_{12}$ ,  $E_{21}$ ,  $E_{22}$  можно выразить через поляризационные параметры оптической системы, то (2) является системой уравнений относительно этих параметров.

Исследование возможности решить (2) для самой простой оптической системы, содержащей светоделитель и уголкового отражатели показало следующее. Если светоделитель выполнен на основе диэлектрических интерференционных покрытий, то всегда выполнено условие равенства амплитуд переменных составляющих КИС, а фазовый сдвиг между ними всегда равен  $\pi$ . Последнее является широко известным фактом. Полученные в диссертации выражения могут быть использованы для расчёта покрытия светоделителя с использованием поглощающих слоёв, однако изготовление и применение в ЛИС таких покрытий связано с рядом проблем, которые изложены в п. 1.2.2 диссертации.

При использовании светоделителя с диэлектрическим покрытием для решения системы (2) необходимо ввести дополнительные свободные параметры. С этой целью предложено (Рисунок) установить на выходе интерферометра фазовую пластину 6, направления собственных осей которой совпадают с направлением собственных осей светоделителя, и поляризатор 7. В этом случае в системе (2) появляются три свободных параметра: азимут электрического вектора излучения на входе оптической системы; фазовый сдвиг, вносимый фазовой пласти-



Рисунок

Новая оптическая система,  
формирующая квадратурные интерференционные сигналы  
(патент РФ N1816082)

1 - лазер; 2 - светоделитель; 3, 4 - уголкового отражатели;  
5, 8 - фотоприёмники, 6 - фазовая пластина, 7 - поляризатор.

ной между быстрой и медленной составляющими электрического вектора проходящего излучения; азимут поляризатора.

В п. 3.2 теоретически исследована возможность реализации нового способа формирования КИС в оптической системе при следующих условиях: в качестве светоделителя использована светоделительная призма-куб с покрытием, представляющим собой чередование диэлектрических слоёв равной оптической толщины с высоким и низким показателями преломления; уголкового отражатели работают за счёт полного внутреннего отражения.

Исследование показало, что первые два уравнения в (2) имеют решение относительно азимута электрического вектора излучения на входе оптической системы и азимута поляризатора во всём диапазоне возможных поляризационных характеристик выбранных оптических элементов независимо от характеристик фазовой пластины, т.е. независимо от её наличия в оптической системе. Выполнение последнего условия в (2) требует определённого соотношения фазовых сдвигов, вносимых элементами системы, которое может быть выполнено за счёт изменения фазовых характеристик светоделителя или за счёт введения в оптическую систему фазовой пластины. Максимальное значение коэффициента использования энергии излучения лазера, которое всегда может быть достигнуто, в 1.15 раза выше, чем в известных оптических системах при идеальных свойствах элементов, и в 1.5 раза выше, чем удалось достигнуть при оптимизации базовых систем, содержащих реальные оптические элементы (пп. 2.3, 2.4).

В п. 3.3 изложен разработанный автором диссертации метод расчёта оптимальной оптической системы, формирующей КИС, при различных условиях расчёта. Рассмотрены следующие случаи: 1) заданы поляризационные характеристики всех оптических элементов; 2) свободным параметром является фазовый сдвиг, вносимый светоделительной призмой-куб между ортогональными составляющими падающего излучения (фазовая пластина в оптической системе отсутствует); 3) свободным параметром является фазовый сдвиг, вносимый фазовой пластиной между ортогональными составляющими падающего излучения. В последних двух случаях гарантируется достижение максимального коэффициента использования энергии излучения лазера.

Таким образом, новый способ формирования КИС позволяет разработать оптимальную оптическую систему (Рисунок), которая содержит минимальное число оптических элементов и, в то же время,

обеспечивает более высокое качество КИС, чем известные оптические системы.

Четвёртая глава посвящена экспериментальной проверке нового способа формирования КИС и метода расчёта оптимальной оптической системы на примере разработки оптической системы лазерного интерференционного преобразователя линейных перемещений (ИПЛП). В основу работы преобразователя был заложен принцип измерения приращений геометрической разности хода методом счёта полос. Основная задача его оптической системы заключалась в формировании КИС.

В п. 4.1 произведён расчёт оптической системы ИПЛП на основе метода расчёта оптимальной оптической системы. Требование максимального использования энергии излучения лазера и поляризационные свойства выбранных оптических элементов (угловые отражатели с посеребрёнными отражающими гранями и светоделительная призма-куб из стекла БФ28 ( $n=1.6605$ ) с покрытием (57ИЭ.41ИЭ) $\times 2$ ,  $\lambda=0.6328$  мкм,  $t_p=1$ ,  $t_s=0.2814$  по ОСТ 3-1901-85) позволили реализовать вариант оптической системы с фазовой пластиной (Рисунок), при этом, по конструктивным и экономическим соображениям фазовая пластина была заменена призмой полного внутреннего отражения AP-90°, имеющей эквивалентные поляризационные характеристики.

В п. 4.2 исследовано влияние погрешностей изготовления оптических деталей и сборки оптической системы на качество КИС. Установлено, что в рассчитанной оптической системе ИПЛП отсутствуют жёсткие технологические требования к изготовлению и сборке оптических деталей и узлов.

В п. 4.3 кратко описана конструкция оптико-механического блока серийной модели ИПЛП, где использована рассчитанная оптическая система, формирующая КИС. Два опытных образца ИПЛП были изготовлены в 1989 г. в Особом конструкторском бюро машиностроения при Брянском заводе технологического оборудования (в 1990 г. реорганизовано в НИИ "Изотерм") и успешно прошли заводские испытания.

В заключении сформулированы следующие основные результаты работы.

1. Выполнены анализ и систематизация известных лазерных интерференционных систем для измерения расстояний и линейных перемещений; определены области и перспективы применения оптических систем, формирующих квадратурные интерференционные сигналы.

2. Показано, что известные способы формирования квадратурных интерференционных сигналов, основанные на идеальных формах поляризации интерферирующих лучей, не реализованы в оптических системах: поляризационные свойства реальных оптических элементов нарушают требуемые идеальные формы поляризации и существенно снижают качество квадратурных интерференционных сигналов; выявлены пути оптимизации известных оптических систем с целью улучшения качества квадратурных интерференционных сигналов.

3. Предложен новый способ формирования квадратурных интерференционных сигналов, основанный на эллиптических формах поляризации интерферирующих лучей, который позволяет учесть поляризационные свойства реальных оптических элементов; разработан метод расчёта оптической системы, формирующей квадратурные интерференционные сигналы данным способом.

4. Новый способ формирования квадратурных интерференционных сигналов и метод расчёта оптической системы позволяют разработать оптимальную оптическую систему, которая содержит минимальное число элементов и, в то же время, обеспечивает более высокое качество квадратурных интерференционных сигналов, чем известные оптические системы.

5. Новый способ формирования квадратурных интерференционных сигналов и метод расчёта оптимальной оптической системы проверены при разработке оптической системы лазерного интерференционного преобразователя линейных перемещений. Два опытных образца преобразователя успешно прошли испытания в НИИ "Изотерм". Оптическая система преобразователя защищена патентом Российской Федерации N1816082.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах.

1. Исследование возможности создания лазерного интерференционного преобразователя для металлорежущих станков с целью повышения точности обработки в 2-3 раза: Отчёт о НИР / Брянский завод технологического оборудования; Руковод. В.К.Филиппов. - Шифр "Контроль"; N ГР РК У44060. - Брянск, 1987. - 23с. - Отв. исполн. Г.А.Лысенко.

2. Разработка встраиваемого интерференционного преобразователя линейных перемещений (ИПЛП) на базе НИР "Контроль": Отчёт об ОКР / Брянский завод технологического оборудования; Руковод.

В.К.Филиппов. - Шифр "Контроль-1"; N ГР РК У50552. - Брянск, 1988. - 48 с. - Отв. исполн. Г.А.Лысенко, В.А.Тимофеев.

3. Лысенко Г.А. Оптический блок лазерного интерферометра // Лазерная техника и технология. Тез. докл. отраслевого научно-технического семинара. - Брянск, 1991. - С. 7.

4. Патент 1816082 РФ, МКИ<sup>5</sup> G 01 B 21/00. Устройство для измерения линейных перемещений / Г.А. Лысенко (РФ); Научно-исследовательский институт "Изотерм" (РФ). - 5 с.

5. Лысенко Г.А. Поляризационные свойства углового отражателя с полным внутренним отражением // Оптический журнал. - 1995. - N 2. - С. 79.

6. Лысенко Г.А. Поляризационные свойства светоделиителя на основе диэлектрического интерференционного покрытия // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. - 1995. - N 3. - С. 96.