# Методика измерения перемещений при помощи лазерных интерферометров

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Стр.

1. Принципы измерения расстояний и линейных перемещений....................3

2 Описание принципа работы и оптических схем интерферометров

со счетом полос..............................................................................................5

2.1 Интерферометр со счетом полос на основе квадратурных сигналов........5

1. Интерферометр со счетом полос на основе частотной модуляции............7

3 Исследование погрешности измерения перемещений................................10

1. Анализ основных состовляющих погрешности измерения

перемещений...................................................................................................10

3.2 Исследование погрешности показателя преломления воздуха...................11

1. Определение погрешности измерения расстояния......................................12

3.4 Определение положения ближней и дальней зоны.....................................14

ПРИЛОЖЕНИЯ......................................................................................................15

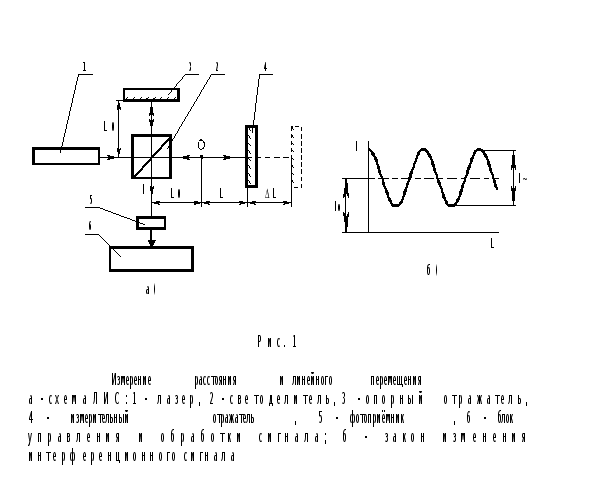
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ....................................................................................25

***1. Принципы измерения расстояний и линейных перемещений***

Обобщенная схема измерения расстояний и линейных перемещений

посредством ЛИС на основе двухлучевого интерферометра изображена

на рис. 1а.



Рассматривая принципы и методы измерения, излучение лазера 1

будем считать идеальной плоской волной.

Интерферометр, состоящий из светоделителя 2, опорного отра-

жателя 3 и измерительного отражателя 4, настроен на бесконечно

широкую полосу. Интенсивность интерференционного сигнала I на фо-

топриемнике 5 изменяется по закону (рис. 1б)

I=I0+I~\* COS (4πL/λ), (1)

где I0 и I~ - постоянная составляющая и амплитуда переменной сос-

тавляющей сигнала соответственно; 2L - геометрическая разность

хода интерферирующих пучков; λ - длина волны излучения.

Расстояние от нуля интерферометра О до измерительного отра-

жателя 4:

(2)



где P - порядок интерференции, φ - фаза интерференционного сигна-

ла I, определяемого формулой (1).

***2 Описание принципа работы и оптических схем интерферометров со***

***счетом полос.***

Метод счета полос заключается в измерении (счете) числа пе-

риодов изменения интерференционного сигнала при изменении ГРХ.

Для предотвращения ложного счета вследствие механических вибраций

и турбулентности воздуха осуществляют реверсивный счет, при кото-

ром определяют знак каждого счетного периода приращения порядка

интерференции.

Применяют два способа реверсивного счета полос.

***2.1 Интерферометр со счетом полос на основе квадратурных сигналов***

Квадратурными называют два сигнала, содержащие информацию об

одной и той же ГРХ, но сдвинутые по фазе на π/2:

I1(t)=I10+I1~\*COS[φ(t)] ,

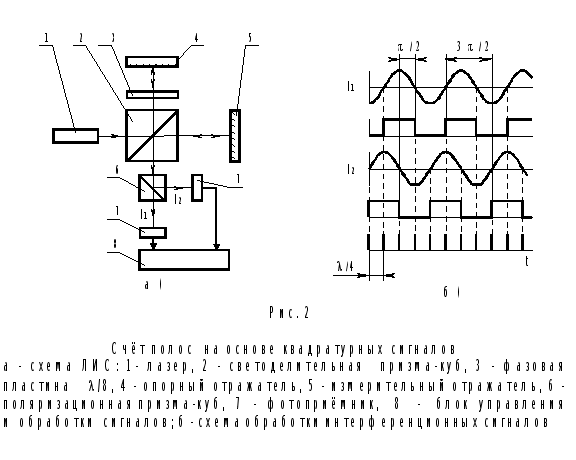
(3)

I2(t)=I20+I2~\*SIN[φ(t)] .

Фиксируя пересечения сигналами (3) среднего уровня (рис. 2б),

измеряют приращения ГРХ c дискретой λ/4. Знак каждой дискреты оп-

ределяют по фазовому сдвигу между сигналами, который в зависимости от направления изменения ГРХ равен π/2 или 3 π /2.



На рис. 2а изображена схема ЛИС, где квадратурные сигналы

получают оптическим способом. Плоскость поляризации излучения од-

ночастотного лазера 1 составляет угол 450 с плоскостью чертежа.

Фазовая пластина λ/8 - позиция 3, одна из собственных осей кото-

рой лежит в плоскости чертежа, вносит в интерферометр, образован-

ный светоделительной призмой-куб 2 и отражателями 4, разность

ГРХ, равную λ /4, для составляющих излучения лазера параллельной и

перпендикулярной плоскости чертежа. Поляризационная призма-куб 6

разделяет эти составляющие. В результате интерференционные сигна-

лы I1 и I2 на фотоприемниках 6 сдвинуты по фазе на π/2.

Информационный спектр сигналов (3) содержит постоянные сос-

тавляющие I10 и I20. Подобные ЛИС называют системами без переноса

спектра сигнала или системами "постоянного тока".

Метод счета полос на основе квадратурных интерференционных

сигналов не ограничивает скорость изменения и максимальное значе-

ние диапазона измеряемых расстояний. Время измерения в ЛИС, рабо-

тающих на основе этого метода, определяется только пропускной

способностью электронного тракта и может составлять сотые доли

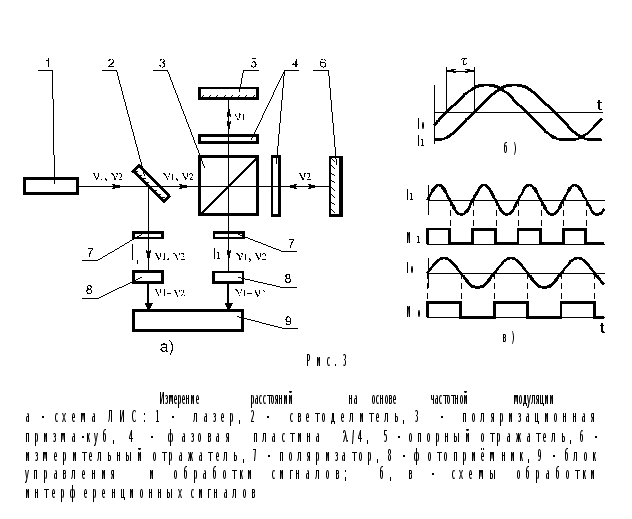
микросекунды (скорость счета полос 100 МГц), что при дискpете λ/4

соответствует скорости приращения ГРХ 16 м/с. Измеряемые расстоя-

ния превышают десятки метров. Минимальную погрешность измерения

расстояния определяет дискрета счета, чаще всего равная λ/8.

***2.2 Интерферометр со счетом полос на основе частотной модуляции***



На рис. 3а приведен пример схемы ЛИС. Двухчастотный лазер 1

излучает две волны с частотами ν1 и ν2, одна из которых поляризо-

вана параллельно, а другая - перпендикулярно плоскости чертежа.

Светоделитель 2 отклоняет часть излучения каждой частоты для фор-

мирования опорного сигнала I0. Поляризационная призма-куб 3 раз-

деляет составляющие излучения разных частот и направляет их в

разные плечи интерферометра. Пластины λ/4 - позиция 7, оптические

оси которых составляют угол 450 с плоскостью чертежа, меняют сос-

тояние поляризации дважды прошедших пучков на ортогональное. По-

ляризационная призма-куб 3 обеспечивает суперпозицию пучков,

возвращенных отражателями 4 и 5, в направлении I1. После поляри-

заторов 6, ось пропускания которых составляет угол 450 с плос-

костью чертежа, в результате интерференции пучков с разными час-

тотами образуются опорный I0 и измерительный I1 сигналы биения.

Поскольку номенклатура двухчастотных лазеров и значения раз-

ности частот, которые они обеспечивают, ограничены, в качестве

источника излучения часто используют одночастотный лазер, сдвигая

частоты ортогональных составляющих его излучения акустооптически-

ми модуляторами, которые устанавливают на входе, выходе или в од-

ном из плечей интерферометра . В этом случае опорный сигнал

I0 может быть получен непосредственно из модулирующих сигналов,

подаваемых на акустооптические модуляторы.

Частота частотной модуляции, аналогично частоте фазовой модуляции, ограничивает время измерения . Однако при использовании акустооптических модуляторов она может быть установлена достаточно большой, чтобы этим ограничением можно было пренебречь. Тогда время однократного измерения фазы определяется временем задержки фазоизмерительного устройства и составляет для современных ЛИС около 10 мкс .

Так как ЛИС на основе частотной модуляции обеспечивают время измерения на порядок меньше, чем ЛИС на основе фазовой модуляции,

допустимые скорости изменения ГРХ в них на порядок выше. Эти ЛИС

считаются в большей степени подходящими для высокоточных измерений в реальном масштабе времени . При равной погрешности они имеют несколько больший диапазон измерения ГРХ.

На основе методов прямого измерения фазы разрабатывают ЛИС для измерения медленно меняющихся во времени и незначительных по величине расстояний с высокой точностью. Основная область применения таких ЛИС - контроль профиля и шероховатости поверхностей, в том числе оптических. Другая обширная сфера применения - интерференционные датчики физических величин, изменение которых можно преобразовать в изменение еометрической или оптической разности хода интерферирующих лучей (давление и влажность атмосферы, температура, напряженность электрического и магнитного полей и др.).

Частотную модуляцию интерференционного сигнала обеспечивают путем суперпозиции двух волн разной оптической частоты. В этом случае закон изменения интенсивности имеет вид

(4)



где I1 и I2 - интенсивности, ν1 и ν2 - оптические частоты, φ1 и φ2 - фазы интерферирующих волн.

Все переменные составляющие сигнала (4), кроме последней, вследствие высокой частоты не могут быть детектированы фотоприемником непосредственно.

Выбирая близкие оптические частоты интерферирующих волн, получают частоту φb= ν1- ν2 последней составляющей, удобную для обработки в фотоэлектронной системе. Эту частоту называют сигналом биения.

Особенность сигнала биения в том, что даже в отсутствие изменения ГРХ между интерферирующими волнами интенсивность изменяется по гармоническому закону. Если одна из интерферирующих волн проходит дополнительный геометрический путь 2L, то сигнал биения получает дополнительный фазовый сдвиг φ=4πL/λ, эквивалентный фазе немодулированного интерференционного сигнала на длине волны λ при

ГРХ интерферирующих лучей, равной 2L.

Чтобы определить ГРХ, измеряют фазовый сдвиг (рис. 3б)

φ(t)=2π\*t\*φb

между опорным и измерительным сигналами биения:

I0(t)=A0 \*COS[2π(ν1- ν2)t+(φ1-φ2)] ,

(5)

I1(t)=A1 \*COS[2π(ν1- ν2)t+(φ1-φ2)+ φ(t)] ,

где A0 и A1 - их амплитуды.

Вместо непрерывного измерения разности фаз между сигналами

подсчитывают число биений каждого из них N0 и N1 и отслежи-

вают разность ΔN=N1-N0 (рис. 3в). Если ГРХ в интерферометре не

меняется, частоты опорного и измерительного сигналов равны

f0=f1= υ1 −υ2, и ΔN=0. При движении отражателя 4 частота биения

измерительного сигнала становится равной f1= υ1- υ2+Δυ, где

Δυ=Δφ(t) / Δt. Изменение ГРХ равно 2ΔL= ΔΝ\*λ=(N1-N0)\*λ.

Знак при Δn зависит от направления движения отражателя 4.

Связь между знаками ΔL и Δ υ остается однозначной до тех пор, пока

[Δ υ]<[ υ1- υ2]. Чтобы исключить влияние низкочастотных шумов на ра-

боту ЛИС, обеспечивают ¦Δ υ¦<[ υ1- υ3]+ υш, где υш - верхняя гранич-

ная частота шумов. Таким образом, в ЛИС со счетом полос на основе

частотной модуляции имеет место принципиальное ограничение ско-

рости изменения измеряемых расстояний. В современных ЛИС она не

превышает 1 м/с.

При счете числа биений сигналов дискрета измерения при-

ращений ГРХ равна λ. Для повышения точности измерения уменьшают

дискрету счета, умножая частоты этих сигналов в электронной сис-

теме. Чаще всего обеспечивают дискрету λ/64 .

Метод счета полос на основе частотной модуляции, также как и

на основе квадратурных интерференционных сигналов, не ограничива-

ет максимальное значение измеряемых расстояниий, которые в из-

вестных ЛИС достигают 100 м.

ЛИС со счетом полос применяют для измерения больших расстоя-

ний и быстрых линейных перемещений с интерференционной точностью.

Благодаря достигнутому уровню технических характеристик и высокой

надежности они находят широкое применение в метрологии (аттеста-

ция станков и технологического оборудования, поверка вновь разра-

батываемых интрументов измерения расстояний и т.д.). Очень перс-

пективная область их применения - преобразователи линейных пере-

мещений координатно-измерительных систем станков и технологичес-

кого оборудования.

***3 Исследование погрешности измерения перемещений.***

***3.1 Анализ основных состовляющих погрешности измерения перемещений.***

Физическими пределами, ограничивающими точность измерения,

являются погрешность измерения фазы интерференционного сигнала Δφ

и относительная погрешность длины волны лазера Δλ/λ .

Дифференцируя выражение (2), максимальную погрешность изме-

рения расстояния можно записать следующим образом:

(6)



При измерении малых расстояний {ближней зоны }(L<<Δφλ2/(4πΔλ)) ΔL определяется только погрешностью Δφ. При измерении больших расстояний

{дальней зоны}(L>> Δφλ2/(4πΔλ)) ΔL определяется величиной Δλ/λ. В остальных случаях необходимо учитывать оба слагаемых в (6).

Длина волны лазера в воздухе: λ=λвак/n, где λвак - длина вол-

ны лазера в вакууме, n - показатель преломления воздуха. Поэтому

погрешность длины волны содержит две составляющие:

(7)



где Δλвак - погрешность воспроизведения длины волны лазера в ва-

куме, Δn - погрешность измерения показателя преломления воздуха.

Таблица 1

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Δφ/2π | Δλ/λ | | | Δn/n |
|  | Лазер СО2 | Лазер He-Ne | Лазерный диод |  |
| 10-4 | 10-8 | 10-9 | 10-6 | 10-7 |

В табл. 1 приведены минимальные значения погрешностей,

достигнутые на практике в ЛИС .

В 1990 г. на международном симпозиуме "Измерение размеров в

процессе производства и контроля качества" для промышленного при-

менения ЛИС физическими пределами, ограничивающими точность изме-

рений, было принято считать: относительную погрешность длины вол-

ны лазера в вакууме 10-10; показатель преломления воздуха - 10-8;

а физическими пределами точности измерения длины: 0.01 мкм для

больших расстояний и 1 нм - для малых.

***3.2 Исследование погрешности показателя преломления воздуха.***

Основные факторы влияющие на нестабильность показателя преломления воздуха это температура , влажность и давление.

Очевидно возникает задача , которую необходимо решить - определение текущего показателя преломления воздуха .

Применим метод измерения с помощью соответствующих датчиков

значений температура t , влажности e и давления p.

Применим для вычисления формулу Эдлена :

(8)



где (nc-1) - рефракция стандартного воздуха при t=15` и p=760 мм. Рт . ст.



Возьмем реальные граници изменения параметров среды:

давление воздуха (720 - 790 мм. Рт. Ст.)

температура (10 - 30 гр.С.)

влажность (средняя 10 мм. Рт. Ст.)

длинна волны излучения лазера в вакуме (из док .на лазер λ=0.6329 мкм)

Вычисления по формуле Эдлена дали результат :

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Давление мм.рт.ст. | nвоздуха при t=100 | nвоздуха при t=200 | nвоздуха при t=300 |
| 720 | 1.000266 | 1.000257 | 1.000248 |
| 730 | 1.000270 | 1.000260 | 1.000252 |
| 750 | 1.000277 | 1.000268 | 1.000259 |
| 770 | 1.000285 | 1.000275 | 1.000266 |
| 790 | 1.000292 | 1.000282 | 1.000273 |

Из получившихся результатов можно сделать вывод , что показатель приломления воздуха увеличивается при увеличении давления и уменьшении температуры .

Максимальный показатель приломления воздуха будет при t=100 и давлении P=790 мм.рт.ст. nMAX=1.000292

Минимальный показатель приломления воздуха будет при t=300 и давлении P=720 мм.рт.ст. nMIN=1.000248

Определим среднее значение погрешности изменения показателя преломления воздуха без учета параметров среды :

Δn=(nMAX-nMIN)/2 Δn/n= 2.200\*10-5

Определим максимальное значение погрешности изменения показателя преломления воздуха с учетом параметров среды :

Определим точность измерения датчиков как:

Δp=0.1 мм. Рт. Ст. (для датчика давления)

Δt=0.1 мм. Рт. Ст. (для датчика температуры)

Для нахождения максимальной значение погрешности необходимо продеференцировать формулу Эдлена и возьмем сумму дифференциалов для

случия максимального значения погрешности:

(9)



Проведем анализ результатов полученных при помощи пограммы MathCad 7.0

См. Приложение (1).

Результатом является определение максимальнолй погрешности изменения

показателя преломления при изменении параметров среды :

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Δn/n t=10’ | Δn/n t=20’ | Δn/n t=30’ |
| P=720 | 1.314\*10-7 | 1.238\*10-7 | 1.169\*10-7 |
| P=730 | 1.327\*10-7 | 1.250\*10-7 | 1.180\*10-7 |
| P=740 | 1.340\*10-7 | 1.262\*10-7 | 1.192\*10-7 |
| P=750 | 1.353\*10-7 | 1.275\*10-7 | 1.203\*10-7 |
| P=760 | 1.366\*10-7 | 1.287\*10-7 | 1.214\*10-7 |
| P=770 | 1.379\*10-7 | 1.299\*10-7 | 1.226\*10-7 |
| P=780 | 1.393\*10-7 | 1.311\*10-7 | 1.237\*10-7 |
| P=790 | 1.406\*10-7 | 1.323\*10-7 | 1.249\*10-7 |

Соответственно из полученных данных видно , что максимальное значение

погрешности изменения показателя преломления при изменении параметров среды будет наблюдаться при температуре 100 и давлении 790 мм. Рт. Ст.

Δn/n= 1.406\*10-7

***3.3 Определение погрешности измерения расстояний .***

Поставим задачу исследования :

т.к на погрешность измерения перемещений влияет погрешность длинны волны

и нестабильности атмосферных условий то определим когда решающей будет

погрешность длинны волны , а когда нестабильности атмосферных условий.

Исследуем диапазон изменения погрешности длинны волны при значениях Δλвак/λ=10−5 , Δλвак/λ=10−7 , Δλвак/λ=10−9

Имеем расчитанные значения погрешности изменения показателя преломления

такие как :

Δn/n= 1.406\*10-7 , Δn/n= 2.200\*10-5

Диапазон изменения Δφ имеем два значения дискреты счета , такие как :

Δφ=π/2 , Δφ=π/16

Исследуем диапазон измерения длин в интервале : L=(1 мкм до 1 м)

Исследование проведено при помощи пограммы MathCad 7.0 по формуле (8) См. Приложение (2)

После расчета из получившихся зависимостей можно выделить основные три группы:

1. Δλ/λ=10−5

Решающие влияние оказывает погрешность длинны волны и нестабильность атмосферных условий.

случай : Δλвак/λ=10−5 , Δn/n= 2.2\*10-5

случай : Δλвак/λ=10−5 , Δn/n= 1.406\*10-7

2. Δλ/λ=10−7

Решающие влияние оказывает погрешность длинны волны и нестабильность атмосферных условий.

случай : Δλвак/λ=10−7 , Δn/n= 1.406\*10-7

3. Δλ/λ=10−9

Решающие влияние оказывает нестабильность атмосферных условий , но

на сегоднешний день реальна погрешность длинны волны Δλвак/λ=10−7 .

случай : Δλвак/λ=10−9 , Δn/n= 1.406\*10-7

***3.4 Определение положения ближней и дальней зоны .***

Определим граничные значения для ближней и дальней зоны :

Будем считать что дальняя зона или ближняя зона будет при условии , что в погрешности измерения перемещений:



дальней зоной будем считать условие:

,



примем для дальней зона К=10,

а ближней зоной будем считать условие:



примем для ближней зоны К=0.1 .

Проведем расчеты по программе MathCad 7.0 см приложение 3 и получим :

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Зона | Дискрета | Δλ/λ=10−9 | Δλ/λ=10−7 | Δλ/λ=10−5 |
| Дальняя зона | π/2 | >791 м | >7.91 м | >0.079 м |
|  | π/16 | >98.87 м | >0.98 м | >9.88\*10-3 м |
| Ближняя зона | π/2 |  |  | <7.91\*10-4 м |
|  | π/16 |  | <9.88\*10-3 м | <9.88\*10-5 м |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысенко Г.А. Принципы измерения расстояний и линейных перемещений

Рукопись.

2.Коронкевич В.П. Ленкова Р.А. Лазерные измерительные устройства

журнал «Автометрия ».