

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

Кафедра физики и прикладной математики

Лексин Андрей Юрьевич
Кутровская Стелла Владимировна

Физические и математические принципы адаптивной оптики

Методические указания к лабораторным занятиям
для студентов ВлГУ, обучающихся по направлениям
12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии»,
12.04.02 «Опtotехника»,
12.04.05 «Лазерная техника и лазерные технологии»

Владимир-2015 г.

Оглавление

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 «Принципы функционирования системы динамической коррекции волнового фронта»	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 «Вычисление полиномов Цернике»	6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 «Разложение волнового фронта по полиномам Цернике»	12
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 «Восстановление формы волнового фронта для датчика Шака-Гартмана».....	16
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 «Алгоритм фазового сопряжения»	23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 «Алгоритмы выделения интерференционных полос для восстановления формы волнового фронта на основе интерферограммы».....	28
РЕКОМЕНДОВАННЫЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	33

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

«Принципы функционирования системы динамической коррекции волнового фронта»

Цель работы: изучить состав лабораторного комплекса динамической коррекции волнового фронта и практически познакомиться с принципами его функционирования.

Краткая теория.

Лабораторная установка представляет собой адаптивную оптическую систему (АОС) для компенсации искажений волнового фронта лазерного излучения. Схема установки приведена на рисунке 1. Ключевые элементы установки следующие:

- корректор волнового фронта (КВФ) на основе биморфного деформируемого зеркала (БДЗ);
- система управления (СУ), включающая персональный компьютер (ПК) с предустановленным программным обеспечением и электронный блок управления корректором;
- датчик волнового фронта (ДВФ).

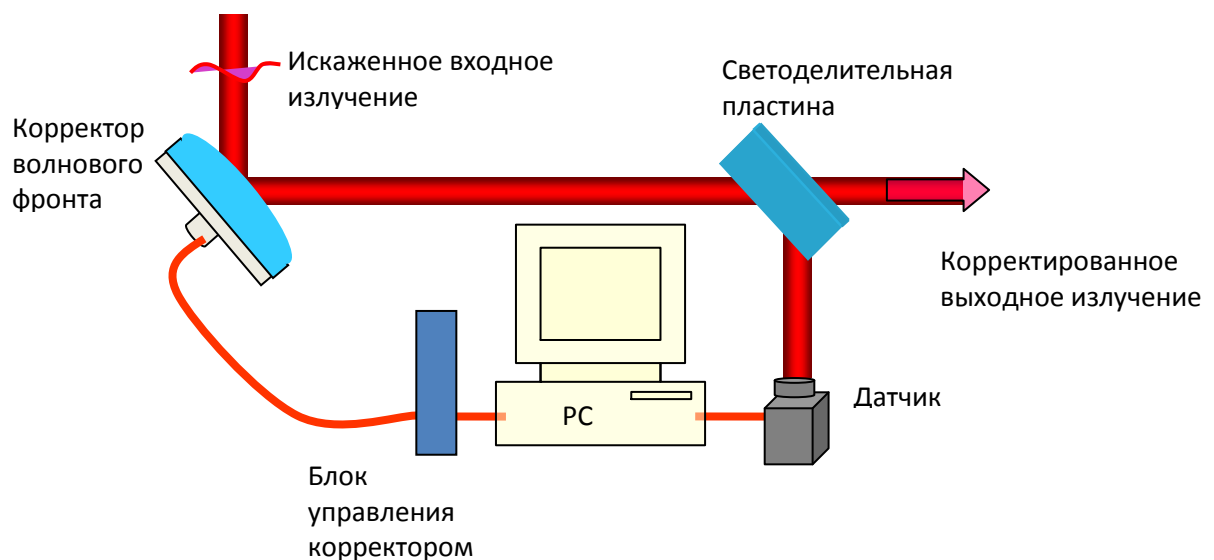


Рисунок 1 – Функциональная схема лазерной установки с коррекцией волнового фронта.

В основе функционирования установки лежит принцип фазового сопряжения, заключающийся в следующем. Под управлением сигналов от контроллера поверхность БДЗ принимает форму, которая должна быть сопряжена с формой волнового фронта входящего лазерного пучка.

Лазерный пучок при входе в АОС отражается от БДЗ и поступает на ДВФ. Сигнал с ДФВ, содержащий информацию о форме волнового фронта, поступает в компьютер. На основе результатов обработки этой информации программными средствами СУ генерирует управляющие напряжения для БДЗ, под влиянием которых БДЗ изменяет свою форму. Форма БДЗ подбирается таким образом, чтобы при отражении от него в волновой фронт лазерного излучения вносились такие искажения, которые компенсируют искажения волнового фронта до входа в АОС. В результате волновой фронт излучения на выходе из АОС должен быть максимально приближен к плоскому.

В состав установки входят:

- датчик волнового фронта ДВФ-35;
- кабель для соединения ДВФ с компьютером;
- корректор волнового фронта КВФ-40-32;
- блок управления корректором ЭСУ-32-300;
- кабели для соединения блока управления с КВФ и с компьютером;
- кабель питания блока управления;
- M^2 -датчик;
- кабель для соединения M^2 -датчика с компьютером;
- комплект оптомеханических приспособлений для установки и юстировки системы;
- набор фазовых пластин;
- источник излучения со сферическим волновым фронтом – He-Ne лазер;
- программное обеспечение;
- персональный компьютер;
- техническое описание и инструкция пользователя.

Характеристики и состав ДВФ, КВФ и M^2 -датчика приведены в инструкции пользователя.

В соответствии с техническим описанием программное обеспечение АОС позволяет:

- осуществлять управление КВФ за счёт подачи электрического напряжения на его электроды с возможностью ручной подстройки, а также осуществлять контроль состояния напряжении на электродах посредством визуализации;
- восстанавливать форму волнового фронта излучения, а также выполнять визуализацию волнового фронта в виде полиномов Цернике и карты уровней равной фазы.

Подробно интерфейс программы описан в инструкции пользователя.

Задание к работе.

Практически освоить базовые операции по работе с системой динамической коррекции волнового фронта.

Порядок выполнения работы.

1. Изучить инструкцию пользователя, особое внимание обратив на предупреждения по обеспечению безопасности работы с системой.

2. Получить инструктаж от преподавателя или лаборанта по работе с системой.

3. Выполнить процедуру включения системы (подключение сигнальных кабелей, кабелей питания, включение ПК, включение электронного блока управления, запуск программного обеспечения для датчиков Шака-Гартмана и M^2 , включение блоков питания датчиков и источника излучения).

4. С помощью программного обеспечения наблюдать в реальном времени динамику изменения волнового фронта и полиномов Цернике.

5. Выполнить процедуру получения функций отклика КВФ. Обратить внимание на звуки, исходящие от КВФ.

6. Запустить режим коррекции волнового фронта с использованием датчика Шака-Гартмана. Наблюдать процесс исправления волнового фронта. Поместить в оптический тракт перед КВФ элемент, вносящий дополнительные искажения. Наблюдать реакцию системы, включая значения полиномов Цернике и отношения peak-to-value (PV). Отключить режим.

7. Запустить режим коррекции волнового фронта с использованием M^2 -датчика. Наблюдать процесс исправления волнового фронта. Поместить в оптический тракт перед КВФ элемент, вносящий дополнительные искажения. Наблюдать реакцию системы, включая значения полиномов Цернике и отношения peak-to-value (PV). Сравнить качество коррекции в рассмотренных режимах на основе сравнения полиномов Цернике и отношения peak-to-value (PV). Отключить режим.

8. Отключить в приложении высокое напряжение на адаптивном зеркале.

9. Убедиться, что на электронном блоке управления не горит индикатор высокого напряжения. Только в этом случае выключить электронный блок управления. В противном случае выполнить предыдущий пункт. Невыполнение данной инструкции может привести к выходу КВФ из строя!

10. Лабораторная работа имеет ознакомительный характер и выполняется без представления отчёта и защиты результатов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 «Вычисление полиномов Цернике»

Цель работы: изучить и практически освоить математический аппарат полиномов Цернике для описания формы волнового фронта.

Краткая теория.

Для того чтобы обеспечить функциональность адаптивной оптической системы, в первую очередь требуется уметь измерять и описывать форму волнового фронта. Если первая задача решается различными аппаратными методами (датчики гартмановского или интерференционного типа), то решение второй никак не может быть найдено без привлечения некоторого математического аппарата. Математически форму волнового фронта $W(\rho)$ описывают в виде разложения по некоторому базису от координат апертуры:

$$W(\rho) = \sum_k c_k \cdot P_k(\rho), \quad (1)$$

где $P_k(\rho)$ - функция базиса.

Аналогичное представление используют при рассмотрении аберраций. Для описания аберраций оптических систем используется два вида базисов. *Степенной базис* состоит из функций $\rho_x^i \rho_y^j$, но чаще выражается в полярных координатах:

$$W(\rho) = \sum_i \sum_j W_{ij} \cdot \rho^i \cdot \cos^i \varphi, \quad (2)$$

где $i \geq j, i + j = 2k$.

Второй вид - *ортогональный базис* в виде полиномов Цернике. Полиномы Цернике – это полиномы, ортогональные на круге единичного радиуса. Они могут быть получены из формулы следующего вида для чётных $n - m$:

$$R_n^m(\rho) = \sum_{k=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! \cdot ((n+m)/2 - k)! \cdot ((n-m)/2 - k)!} \cdot \rho^{n-2k}, \quad (3)$$

где n – степень полинома; m – параметр угловой зависимости ($n \geq m$); ρ – нормированное радиальное расстояние ($0 \leq \rho \leq 1$). Радиальные полиномы $R_n^m(\rho)$ тождественно равны нулю для нечётных $n - m$.

Сами полиномы имеют вид:

$$\begin{aligned} Z_n^m(\rho, \varphi) &= R_n^m(\rho) \cos(m\varphi), \quad (\text{чётные полиномы}) \\ Z_n^{-m}(\rho, \varphi) &= R_n^m(\rho) \sin(m\varphi), \quad (\text{нечётные полиномы}) \end{aligned} \quad (4)$$

Полиномы Цернике ограничены в диапазоне от -1 до +1:

$$|Z_n^m(\rho, \varphi)| \leq 1. \quad (5)$$

Тогда любую функцию волнового фронта $W(\rho, \varphi)$ можно представить в виде линейной комбинации круговых полиномов Цернике:

$$W(\rho, \varphi) = \sum_{n,m} C_n^{\pm m} Z_n^{\pm m}(\rho, \varphi). \quad (6)$$



С учётом ограничений на соотношение индексов n и m и равенства нулю радиальных полиномов при $n - m$, получается следующая последовательность полиномов Цернике: $Z_0^0, Z_1^{-1}, Z_1^1, Z_2^{-2}, Z_2^0, Z_2^2, Z_3^{-3}, Z_3^{-1}, Z_3^1, Z_3^3, Z_4^{-4}, Z_4^{-2}, Z_4^0$, и т.д. Для удобства обозначения и обработки иногда используют иной способ индексации (соответственно): $Z_0, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7, Z_8, Z_9, Z_{10}, Z_{11}, Z_{12}$, и т.д. В результате выражение (6) можно переписать в виде, аналогичном (1):

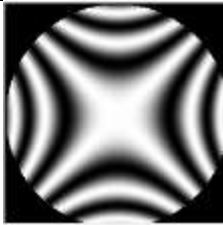
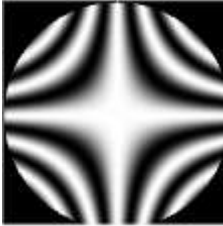

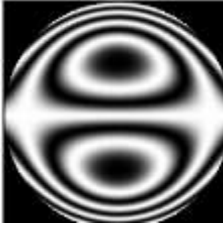
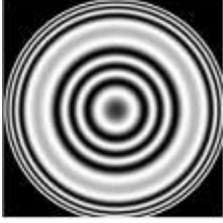
$$W(\rho, \varphi) = \sum_i C_i Z_i(\rho, \varphi). \quad (7)$$

Одно из преимуществ использования полиномов Цернике для представления волнового фронта заключается в том, что каждый полином, каждый член разложения представляет собой оптимальную форму классической аберрации (табл. 1).

Таблица 1

Представление аберраций полиномами Цернике

<i>№</i>	<i>Радиальный полином</i>	<i>Аберрация</i>	<i>Изображение</i>
R_1^1	$\rho \cdot \sin \theta$	Наклон по оси x	
R_1^{-1}	$\rho \cdot \cos \theta$	Наклон по оси y	

R_2^2	$\rho^2 \cdot \sin 2\theta$	Астигматизм $\pm 45^\circ$	
R_2^{-2}	$\rho^2 \cdot \cos 2\theta$	Астигматизм 90°	
R_3^1	$(3\rho^3 - 2\rho) \cdot \sin \theta$	Кома 3-го порядка по оси x	
R_3^{-1}	$(3\rho^3 - 2\rho) \cdot \cos \theta$	Кома 3-го порядка по оси y	
R_4^0	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	Сферическая абберация 3-го порядка	

Коэффициенты C_i при полиномах Цернике служат численным представлением aberrаций для данной точки предмета и данной длины волны излучения. Изображения (модельные aberrации), приведённые в таблице, получены именно по этому принципу: для наклонов по осям первый или второй коэффициенты устанавливались в значение 1, для астигматизмов – третий или четвёртый, для ком – пятый или шестой, для сферической aberrации – седьмой, а остальные коэффициенты соответственно устанавливались в значение 0.

Для представления фазового распределения в виде интерференционной картины необходимо рассчитать значение фазы в каждой точке декартовой системы координат. Значение фазы в точке (x, y) может быть вычислено по формуле:

$$\varphi(x, y) = \sum_{i=1}^N C_i Z_i(x, y), \quad (8)$$

где N – число используемых полиномов Цернике;

C_i – коэффициенты при полиномах Цернике;

$Z_i(x, y)$ – значение i -го полинома в точке (x, y) .

А непосредственно распределение интенсивности в каждой точке вычисляется по формуле:

$$I(x, y) = 127.5 \cdot [1 + \cos(\frac{2\pi}{\lambda} \varphi(x, y))], \quad (9)$$

где λ – длина волны излучения.

Задание к работе.

Работа состоит из двух частей:

а) расчёт и визуализация полиномов Цернике; требуется вычислить и визуализировать в системе MATLAB (либо с помощью других средств по выбору студента) полиномы Цернике Z_1, \dots, Z_9 ;

б) расчёт и визуализация суперпозиционной формы волнового фронта; необходимо на основе вычисленных полиномов смоделировать сложную aberrацию волнового фронта, используя формулы (7) или (8).

Порядок выполнения работы.

11. Изучить способ моделирования формы волнового фронта в виде суперпозиции полиномов Цернике.

12. Описать в системе MATLAB функцию (или набор функций) для расчёта полиномов Цернике. Здесь возможны два подхода. Можно описать отдельные функции для каждого из полиномов, используя формулы (4) и любой из вариантов нумерации полиномов (с двумя индексами или с одним). Недостаток такого подхода состоит в том, что при необходимости аппроксимации волнового фронта разным количеством полиномов программа оказывается очень негибкой и требующей трудоёмкой модификации. Более практичной альтернативой является написание одной функции, использующей нумерацию полиномов одним индексом. трудность такой реализации состоит в необходимости пересчёта этого индекса в пару индексов n и m , да ещё и с правильным знаком при m . Решение этой подзадачи студенту необходимо найти самостоятельно (либо вывести соотношения, либо использовать литературные источники). Предпочтительно, чтобы функции зависели от круговых координат ρ и φ , однако допустима и зависимость от декартовых координат x и y .

13. Описать главную программу. В первую очередь создать переменные, задающие дискретную сетку в декартовой и круговой системах координат. Учесть границы области определения полиномов Цернике: $0 \leq \rho \leq 1$, $0 \leq \varphi < 2\pi$. Выполнить расчёт полиномов Цернике на заданной области, используя описанные ранее функции. Визуализировать результаты с помощью трёхмерного представления и с помощью линий уровня, как это показано на рисунке 1.

14. Дополнить главную программу вычислением суперпозиции полиномов Цернике по формуле (7) либо (8). Ограничиться использованием полиномов, рассчитанных в первой части работы. При задании коэффициентов C_i соблюдать условие нормировки: $\sum_{i=1}^9 |C_i| = 1$.

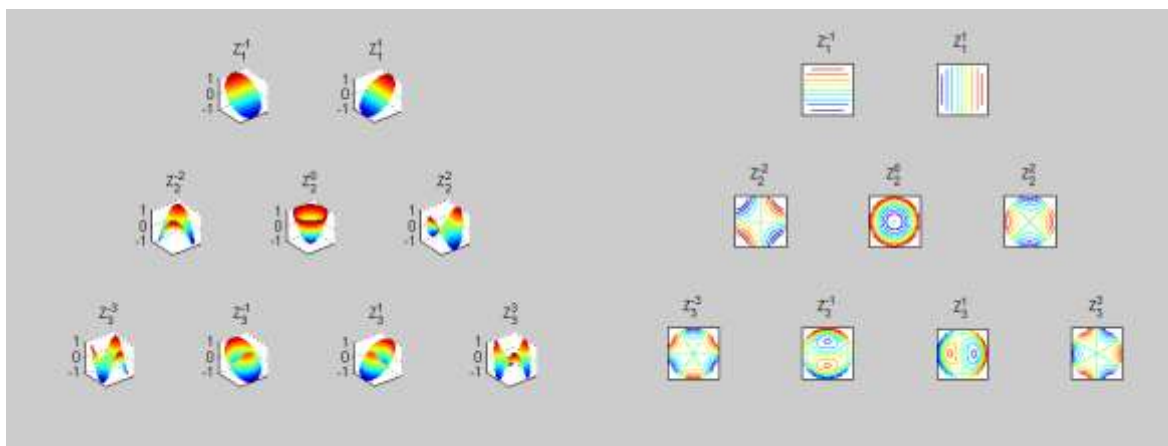


Рисунок 1 – Пример визуализации полиномов Цернике.

15. Провести серию экспериментов, состоящих в подстановке различных комбинаций коэффициентов C_i . Сохранить результаты в графические файлы или непосредственно в файл с отчётом по лабораторной работе.

16. Оформить отчёт по лабораторной работе. В отчёте сделать вывод о сложностях и эффективных путях программной реализации расчёта полиномов Цернике. Защитить результаты.

Контрольные вопросы.

1. Формулы для расчёта полиномов Цернике.
2. Преимущества использования полиномов Цернике для описания aberrаций волнового фронта.
3. Варианты нумерации полиномов Цернике.
4. Форма волнового фронта как суперпозиция полиномов Цернике.

5. Пояснить программный код, созданный в ходе выполнения работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

«Разложение волнового фронта по полиномам Цернике»

Цель работы: изучение и программная реализация метода разложения волнового фронта по полиномам Цернике.

Краткая теория.

В предыдущей лабораторной работе решалась задача моделирования aberrаций волнового фронта в виде суперпозиции полиномов Цернике. В реальной адаптивной оптической системе обычно решается обратная задача: после получения формы волнового фронта происходит поиск весовых коэффициентов C_i для выбранного набора полиномов. В основе методов такого поиска лежит свойство ортогональности полиномов Цернике на единичном круге.

Ортогональность полиномов в радиальной части записывается равенством

$$\int_0^1 \rho \sqrt{2n+2} R_n^m(\rho) \sqrt{2n'+2} R_{n'}^m(\rho) d\rho = \delta_{n,n'}. \quad (1)$$

Ортогональность в угловой части представляется набором равенств

$$\int_0^{2\pi} \cos(m\varphi) \cos(m'\varphi) d\varphi = \varepsilon_m \pi \delta_{|m|,|m'|}, \quad (2a)$$

$$\int_0^{2\pi} \sin(m\varphi) \sin(m'\varphi) d\varphi = (-1)^{m+m'} \pi \delta_{|m|,|m'|}, \quad m \neq 0, \quad (2б)$$

$$\int_0^{2\pi} \cos(m\varphi) \sin(m'\varphi) d\varphi = 0, \quad (2в)$$

где параметр ε_m (его иногда называют множителем Неймана) полагают равным 2, если $m = 0$, и равным 1, если $m \neq 0$.

Произведение угловой и радиальной частей устанавливает ортогональность функций Цернике по обоим переменным при интегрировании по единичному кругу:

$$\int Z_n^m(\rho, \varphi) Z_{n'}^{m'}(\rho, \varphi) d^2r = \frac{\varepsilon_m \pi}{2n+2} \delta_{n,n'} \delta_{m,m'}, \quad (3)$$

где $d^2r = \rho d\rho d\varphi$ – якобиан полярной системы координат, а оба числа $n - m$ и $n' - m'$ – четные.

Предположим теперь, что волновой фронт есть суперпозиция полиномов Цернике со своими весовыми коэффициентами (см. лабораторную работу №1):

$$W(\rho, \varphi) = \sum_{n,m} C_n^{\pm m} Z_n^{\pm m}(\rho, \varphi). \quad (4)$$

Смысл ортогональности состоит в том, что интеграл произведения двух ортогональных функций по независимым параметрам отличен от нуля только в том случае, когда функция умножается сама на себя. Отталкиваясь от этого свойства, найдём интеграл произведения произвольной функции (4) на некоторый полином Цернике $Z_{n'}^{m'}$.

$$\begin{aligned} & \iint Z_{n'}^{m'}(\rho, \varphi) \sum_{n,m} (C_n^m Z_n^m(\rho, \varphi)) \rho d\rho d\varphi = \\ & = \sum_{n,m} \iint Z_{n'}^{m'}(\rho, \varphi) C_n^m Z_n^m(\rho, \varphi) \rho d\rho d\varphi = \\ & = \sum_{n,m} C_n^m \iint Z_{n'}^{m'}(\rho, \varphi) Z_n^m(\rho, \varphi) \rho d\rho d\varphi = C_{n'}^{m'} \frac{\varepsilon_{m'} \pi}{2n' + 2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, весовой коэффициент при полиноме Цернике $Z_{n'}^{m'}$ может быть найден по формуле:

$$C_{n'}^{m'} = \frac{2n' + 2}{\varepsilon_{m'} \pi} \iint Z_{n'}^{m'}(\rho, \varphi) W(\rho, \varphi) \rho d\rho d\varphi. \quad (6)$$

Очевидно, что точность аппроксимации волнового фронта с помощью суперпозиции (4) в общем случае тем выше, чем большее количество полиномов Цернике будет учтено. Однако в реальной ситуации ограничиваются лишь некоторым их набором. При этом важно отметить, что значение отдельных коэффициентов C_i (C_n^m) в силу выражения (6) не зависит от используемого для аппроксимации количества полиномов. В адаптивных оптических системах для оценки необходимого количества полиномов Цернике выполняют сравнительную оценку значений весовых коэффициентов. Сравнение происходит в динамике на некотором интервале времени. Если оказывается, что начиная с некоторого полинома весовой коэффициент на три-четыре порядка меньше по сравнению с предыдущими полиномами, то принимают решение об ограничении набора учитываемых полиномов. Здесь возникает важное обстоятельство. С одной стороны, большое количество аппроксимирующих полиномов повышает качество восстановления формы волнового фронта. С другой стороны, это влечёт за собой уменьшение быстродействия системы из-за повышения

вычислительной сложности работы программного обеспечения. Данная задача практически всегда решается эмпирическим путём и требует определённого мастерства от наладчика адаптивной системы и её пользователей.

Задание к работе.

Написать программу в системе MATLAB (или используя иные средства по усмотрению студента), реализующую поиск весовых коэффициентов при разложении волнового фронта по полиномам Цернике.

Порядок выполнения работы.

1. Изучить метод разложения волнового фронта по полином Цернике.
2. Модифицировать программный код, созданный в ходе выполнения лабораторной работы №2. Поскольку для проверки корректности реализации разложения волнового фронта по полиномам Цернике требуются некоторые известные тестовые данные, то лучше всего эти данные сформировать самостоятельно, чтобы иметь возможность их изменять и анализировать влияние отдельных исходных данных на результат. В код первой лабораторной работы следует добавить сохранение волнового фронта в отдельный файл с целью его загрузки в качестве исходных данных в новой программе. В системе MATLAB для этого предназначена команда `save`.
3. Написать новый программный файл, реализующий метод разложения волнового фронта по полиномам Цернике. Структура этого файла во многом повторяет структуру основного файла лабораторной работы №2. Требуется задать сетку в круговом (и, возможно, декартовом) пространстве, совпадающую с сеткой из лабораторной работы №2. Затем загрузить данные о форме волнового фронта из файла (команда `load`). Затем выполнить расчёт некоторого количества полиномов Цернике с помощью вспомогательных функций из лабораторной работы №2. Наконец, реализовать интегрирование произведения каждого из полиномов на загруженную функцию волнового фронта и найти весовые коэффициенты, используя формулу (6). В системе MATLAB для решения данной задачи могут оказаться полезными функции `interp2()` и `dblquad()`.
4. По найденным коэффициентам восстановить форму волнового фронта.
5. Добавить вычисление абсолютной и относительной погрешностей алгоритма на основе сравнения загруженного из файла волнового фронта и восстановленного.
6. Задать весовые коэффициенты в модифицированной копии программы лабораторной работы №2. Выполнить запуск программы с целью

сохранения результатов расчёта в файл. Запустить новую программу и сохранить найденные значения весовых коэффициентов. Провести данный эксперимент несколько раз, задавая различные значения весовых коэффициентов полиномов Цернике в суперпозиции (4), а также различное количество аппроксимирующих полиномов, и анализируя погрешность аппроксимации. Например, можно задать изначально весовые коэффициенты при полиномах Z_1, Z_3, Z_5, Z_7, Z_9 , а аппроксимацию выполнить, ограничиваясь тремя, пятью, семью и девятью полиномами.

7. Оформить отчёт по лабораторной работе. В отчёте сделать вывод о сложностях и эффективных путях программной реализации разложения волнового фронта по полиномам Цернике. Защитить результаты.

Контрольные вопросы.

1. Доказать ортогональность полиномов Цернике на единичном круге.
2. Обосновать математически и физически метод разложения волнового фронта по полиномам Цернике.
3. Какие факторы влияют на точность восстановления формы волнового фронта на основе полиномов Цернике?
4. Пояснить программный код, созданный в ходе выполнения работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 «Восстановление формы волнового фронта для датчика Шака-Гартмана»

Цель работы: изучение и практическая реализация метода восстановления формы волнового фронта на основе данных, получаемых с помощью датчиков волнового фронта гартмановского типа.

Краткая теория.

Как было отмечено выше, значения полиномов Цернике представляют ту или иную волновую aberrацию, в то время как их производные по пространственным координатам определяют локальные наклоны волнового фронта. На рисунке 1 схематично изображена одиночная линза микролинзового раstra ПЗС-камеры и смещение фокального пятна от референсного положения вследствие локального наклона волнового фронта, причиной которого являются искажения пучка света.

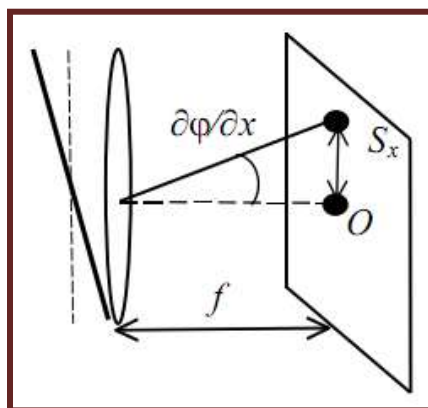


Рисунок 1 – Локальный наклон волнового фронта.

Из рисунка видно, что смещение центра фокального пятна по оси x пропорционально тангенсу угла наклона волнового фронта, то есть $\frac{\partial \varphi}{\partial x}$. Для смещения по оси y всё аналогично.

Восстановление информации о форме волнового фронта $\varphi(x, y)$ по рассчитанным на основе смещений фокальных пятен значениям наклона $s_x^{(ij)}$ и $s_y^{(ij)}$ выполняется на основе численных методов. Постановка задачи зависит от конфигурации используемой сетки на расчётной области, иными словами, от положения точек, в которых измеряется наклон волнового фронта, относительно точек, в которых рассчитывается фаза. Различные конфигурации сеток представлены на рисунке 2.

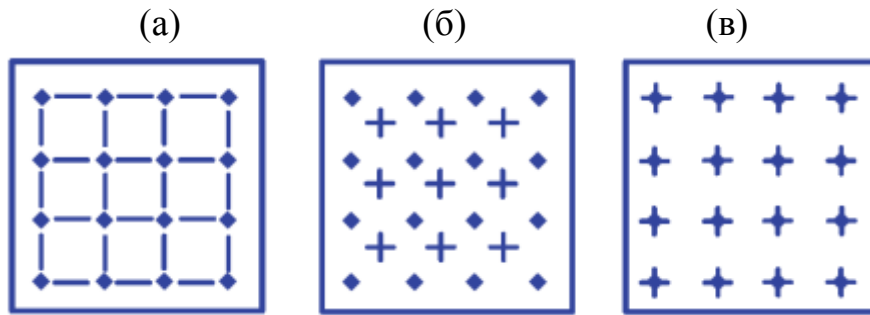


Рисунок 2 – Различные конфигурации сеток измерения наклонов волнового фронта и расчёта фазы. Горизонтальные и вертикальные линии обозначают позиции, в которых осуществляется измерение наклона волнового фронта в направлениях x и y соответственно. Маркеры \blacklozenge обозначают точки, в которых осуществляется расчёт фазы.

Сетка, представленная на рисунке 2а, используется, когда наклоны по осям x и y измеряются независимо друг от друга в разных точках. Сетка на рисунке 2б используется, когда оба наклона измеряются в одной и той же точке, несовпадающей при этом с точкой, в которой рассчитывается фаза. То есть сетка наклонов сдвинута на некоторую величину относительно сетки измеряемых фаз. На рисунке 2в представлена сетка, описывающая случай, когда оба наклона измеряются в одной и той же точке, совпадающей с точкой, в которой рассчитывается фаза.

Восстановление формы волнового фронта сводится к построению системы разностных уравнений, связывающей локальные наклоны с фазой. Рассмотрим принцип получения таких уравнений и их вид для каждой из конфигураций расчётной сетки, показанных на рисунке 2. Будем полагать, что расчётная область является квадратной, а количество точек расчёта фазы по каждой из координатных осей одинаково и равно N .

В конфигурации, описываемой сеткой на рисунке 2а, мы имеем N^2 точек расчёта фазы (маркеры \blacklozenge на рисунке) и $2N(N-1)$ точек измерения наклона (горизонтальные и вертикальные линии на рисунке). Для понимания хода построения разностной схемы рассмотрим сначала изменение фазы вдоль одной непрерывной координаты x . Зависимость $\varphi(x)$ может быть представлена в форме многочлена $\varphi(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + \dots$. При этом наклон, определяемый как $s(x) = \partial\varphi/\partial x$, будет задаваться многочленом $s(x) = c_1 + 2c_2x + \dots$. Поскольку мы выполняем однократное измерение наклона в центре интервала между двумя фазовыми точками, мы ограничиваемся только первым порядком в многочленах (слагаемыми с коэффициентом c_1). В этом случае можем переписать $s(x) = s = c_1$ и

$\varphi(x) = c_0 + sx$, где $\varphi(x)$ – искомое значение фазы, c_0 – значение фазы в некоторой заданной точке.

Для одномерной дискретной модели можем переписать последнее (непрерывное) выражение для нахождения значения фазы в точке, отстоящей от точки с заданной фазой на расстояние l , в виде $\varphi_{i+1} = \varphi_i + s_x^{(i)}l$. Таким образом, разностная схема, связывающая значения фазы с наклоном волнового фронта, в одномерной задаче принимает следующий вид: $s_x^{(i)} = (\varphi_{i+1} - \varphi_i)/l$, где $i = 1, \dots, (N-1)$. Можно экстраполировать полученный результат на задачу восстановления формы двумерного волнового фронта. Разностная схема в этом случае будет выглядеть следующим образом:

$$s_x^{(ij)} = \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}}{l}, \quad i = 1, \dots, (N-1), \quad j = 1, \dots, N \quad (1a)$$

$$s_y^{(ij)} = \frac{\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j}}{l}, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, (N-1) \quad (1б)$$

В конфигурации, показанной на рисунке 2б, точки, в которых рассчитывается фаза, смещены относительно точек, в которых измеряется наклон, на половину шага l по обеим осям, x и y . Разностная схема для данной конфигурации выглядит следующим образом:

$$s_x^{(ij)} = \frac{1}{2l} [(\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}) + (\varphi_{i+1,j+1} - \varphi_{i,j+1})], \quad (2a)$$

$$s_y^{(ij)} = \frac{1}{2l} [(\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j}) + (\varphi_{i+1,j+1} - \varphi_{i+1,j})], \quad (2б)$$

В обоих случаях диапазоны изменения индексов i и j одинаковые: $i = 1, \dots, (N-1)$, $j = 1, \dots, (N-1)$.

В конфигурации, показанной на рисунке 2в, фаза рассчитывается в тех же точках, в которых измеряется наклон. Разностная схема принимает вид:

$$\frac{s_x^{(i+1,j)} - s_x^{(ij)}}{2} = \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}}{l}, \quad i = 1, \dots, (N-1), \quad j = 1, \dots, N \quad (3a)$$

$$\frac{s_y^{(i,j+1)} - s_y^{(ij)}}{2} = \frac{\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j}}{l}, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, (N-1) \quad (3б)$$

В матричной форме задачу восстановления формы волнового фронта можно записать следующим образом:

$$\mathbf{s} = \mathbf{A}\varphi, \quad (4)$$

где \mathbf{s} – вектор измеренных наклонов волнового фронта, φ – вектор искомых значений фазы, \mathbf{A} – прямоугольная матрица коэффициентов. Решение

данной системы уравнений и даст восстановленную форму волнового фронта.

Следует обратить внимание, что описанные выше разностные уравнения используют индексацию величин наклонов и фаз по нескольким параметрам: i, j, x, y . В то же время решение системы (4) требует более компактной нумерации. Поэтому подготовительным этапом, предшествующим написанию программного кода, должно стать выявление закономерностей пересчёта систем индексов. Рассмотрим эту подзадачу на примере разностных уравнений (1).

В первую очередь переобозначим фазы волнового фронта. Если следовать индексации, указанной в уравнениях (1), то можно получить следующую последовательность неизвестных фаз: $\varphi_{1,1}, \varphi_{1,2}, \dots, \varphi_{1,N}, \varphi_{2,1}, \varphi_{2,2}, \dots, \varphi_{2,N}, \dots, \varphi_{N,1}, \varphi_{N,2}, \dots, \varphi_{N,N}$. Введём, соответственно, индексацию от одного индекса: $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N, \varphi_{N+1}, \varphi_{N+2}, \dots, \varphi_{2N}, \dots, \varphi_{N(N-1)+1}, \varphi_{N(N-1)+2}, \dots, \varphi_{N^2}$. Проанализировав два способа индексации, можно вывести следующую закономерность пересчёта:

$$\varphi_{i,j} \rightarrow \varphi_k, k = (i-1)N + j. \quad (5)$$

Обратный пересчёт описывается выражениями:

$$\varphi_k \rightarrow \varphi_{i,j}, i = \lfloor (k-1)/N \rfloor + 1, j = k - N(i-1). \quad (6)$$

В выражениях (6) обозначение $\lfloor \ \rfloor$ соответствует целой части числа.

Теперь выполним переобозначение наклонов. Последовательность их нумерации в случае, если сначала использовать уравнение (1а), а затем (1б):

$$s_x^{(1,1)}, s_x^{(1,2)}, \dots, s_x^{(1,N)}, s_x^{(2,1)}, s_x^{(2,2)}, \dots, s_x^{(2,N)}, \dots, s_x^{(N-1,1)}, s_x^{(N-1,2)}, \dots, s_x^{(N-1,N)},$$

$$s_y^{(1,1)}, s_y^{(1,2)}, \dots, s_y^{(1,N-1)}, s_y^{(2,1)}, s_y^{(2,2)}, \dots, s_y^{(2,N-1)}, \dots, s_y^{(N,1)}, s_y^{(N,2)}, \dots, s_y^{(N,N-1)}.$$

Как и выше, введём соответствующую нумерацию по одному индексу: $s_1, s_2, \dots, s_N, s_{N+1}, s_{N+2}, \dots, s_{2N}, \dots, s_{N(N-2)+1}, s_{N(N-2)+2}, \dots, s_{N(N-1)}, s_{N(N-1)+1}, s_{N(N-1)+2}, \dots, s_{N(N-1)+N-1}, s_{N(N-1)+(N-1)+1}, s_{N(N-1)+(N-1)+2}, \dots, s_{N(N-1)+2(N-1)}, \dots, s_{N(N-1)+(N-1)(N-1)+1}, s_{N(N-1)+(N-1)(N-1)+2}, \dots, s_{2N(N-1)}$. Получим формулы пересчёта индексов:

$$s_x^{(i,j)} \rightarrow s_m, m = (i-1)N + j. \quad (7a)$$

$$s_y^{(i,j)} \rightarrow s_p, p = N(N-1) + (i-1)(N-1) + j. \quad (7б)$$

Обратный пересчёт для значений наклона не требуется, так как эти величины используются только для описания системы уравнений, тогда как фазы являются её неизвестным заранее решением. После решения системы потребуется применить найденные значения φ_k к прямоугольной сетке с двумя индексами.

Остаётся выявить закономерность формирования матрицы коэффициентов \mathbf{A} . Для этого запишем явным образом систему уравнений, используя переиндексированные значения фаз и наклонов.

$$\begin{aligned}
-\frac{1}{l}\varphi_1 + \frac{1}{l}\varphi_{N+1} &= s_1, \\
-\frac{1}{l}\varphi_2 + \frac{1}{l}\varphi_{N+2} &= s_2, \\
-\frac{1}{l}\varphi_3 + \frac{1}{l}\varphi_{N+3} &= s_3, \\
&\dots \\
-\frac{1}{l}\varphi_{N(N-1)} + \frac{1}{l}\varphi_{N^2} &= s_{N(N-1)}, \\
-\frac{1}{l}\varphi_1 + \frac{1}{l}\varphi_2 &= s_{N(N-1)+1}, \\
-\frac{1}{l}\varphi_2 + \frac{1}{l}\varphi_3 &= s_{N(N-1)+2}, \\
&\dots \\
-\frac{1}{l}\varphi_{N-1} + \frac{1}{l}\varphi_N &= s_{N(N-1)+(N-1)}, \\
-\frac{1}{l}\varphi_{N+1} + \frac{1}{l}\varphi_{N+2} &= s_{N(N-1)+(N-1)+1}, \\
-\frac{1}{l}\varphi_{N+2} + \frac{1}{l}\varphi_{N+3} &= s_{N(N-1)+(N-1)+2}, \\
&\dots \\
-\frac{1}{l}\varphi_{N+(N-1)} + \frac{1}{l}\varphi_{2N} &= s_{N(N-1)+2(N-1)}, \\
&\dots \\
-\frac{1}{l}\varphi_{N(N-1)+1} + \frac{1}{l}\varphi_{N(N-1)+2} &= s_{N(N-1)+(N-1)^2+1}, \\
-\frac{1}{l}\varphi_{N(N-1)+2} + \frac{1}{l}\varphi_{N(N-1)+3} &= s_{N(N-1)+(N-1)^2+2}, \\
&\dots \\
-\frac{1}{l}\varphi_{N(N-1)+(N-1)} + \frac{1}{l}\varphi_{N^2} &= s_{2N(N-1)},
\end{aligned} \tag{8}$$

Анализ системы (8) позволяет записать следующие выражения для заполнения матрицы \mathbf{A} :

$$A_{i,i} = -\frac{1}{l}, \quad A_{i,i+N} = \frac{1}{l}, \quad i = 1, \dots, N(N-1); \quad (9a)$$

$$A_{i,j} = -\frac{1}{l}, \quad A_{i,j+1} = \frac{1}{l}, \quad i = j - (t-1) + N(N-1), \quad (9б)$$

$$j = N(t-1) + 1, \dots, N(t-1) + (N-1),$$

$$t = 1, \dots, (N-1).$$

Выражения (5), (7), (9) позволяют сформировать систему разностных уравнений в матричной форме, после чего решение может быть найдено любым подходящим численным методом, а вычисленные значения фазы должны быть переведены на прямоугольную сетку.

Задание к работе.

Для заданной преподавателем конфигурации сетки измерения наклонов волнового фронта написать программу в системе MATLAB (или используя иные средства по усмотрению студента), реализующую метод восстановления формы волнового фронта.

Порядок выполнения работы.

1. Изучить метод восстановления формы волнового фронта для датчиков гартмановского типа.

2. Создать сценарий в системе MATLAB. В первой части программы необходимо подготовить исходные тестовые данные для реализации восстановления волнового фронта. В качестве таких данных следует использовать волновой фронт, формируемый в лабораторной работе №2. В силу безразмерности будем считать расстояние между точками расчёта фазы равным 1 (то есть $l=1$). При необходимости следует модифицировать код лабораторной работы №2 так, чтобы получить значения волнового фронта на равномерной прямоугольной сетке. Рассчитать матрицы наклонов по осям x и y , используя функцию `diff`.

3. Во второй части программы матрицы наклонов будут являться основой для описания вектора свободных членов системы уравнений (4) с помощью выражений (7). Матрица коэффициентов заполняется на основе выражений (9) с учётом допущения на значение l .

4. После создания матриц следует решить матричное уравнение (4) с помощью стандартных средств математического пакета.

5. Выполнить пересчёт найденных значений фазы на координатную сетку с помощью выражения (6). Визуализировать полученный результат.

6. Вычислить и визуализировать погрешность между исходным волновым фронтом и восстановленным на основе матриц наклонов.

7. Оформить отчёт по лабораторной работе. В отчёте сделать вывод о причинах погрешности метода и предложения о путях уменьшения данной погрешности. Защитить результаты.

Контрольные вопросы.

1. Описать конфигурации сеток измерения наклонов волнового фронта и расчёта фазы.

2. Вывести разностные уравнения для расчёта фазы для каждой из конфигураций.

3. Сравнить конфигурации по качеству восстановления волнового фронта.

4. Пояснить программный код, созданный в ходе выполнения работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 «Алгоритм фазового сопряжения»

Цель работы: изучение и практическая реализация алгоритма фазового сопряжения для биморфного адаптивного зеркала.

Краткая теория.

Основной задачей программного ядра адаптивной оптической системы является определение набора управляющих воздействий на адаптивное зеркало, приводящих к изменению его поверхности и компенсации фазовых искажений волнового фронта. В случае биморфного адаптивного зеркала воздействие реализуется в виде управляющих напряжений, подаваемых на электроды. Модуль управления должен выполнять расчёт этих напряжений на основе исходных данных о свойствах зеркала и на основе текущих данных о форме искажённого волнового фронта.

Для описания свойств адаптивного зеркала используются функции отклика электродов.

Функция отклика электрода представляет собой результат деформации поверхности адаптивного зеркала от приложения единичного напряжения только к данному электроду. Как только профиль поверхности зеркала изменяется, датчик волнового фронта фиксирует смещение фокальных пятен от референсных положений. Именно этими смещениями по двум осям и характеризуются функции отклика.

Таким образом, последовательным приложением напряжений ко всем электродам адаптивного зеркала вычисляются смещения фокальных пятен для всех функций отклика.

Графически функции отклика можно представить в виде интерферограмм – двумерных изображений линий равной фазы профиля волнового фронта светового излучения. Две функции отклика для двух электродов зеркала с 33 электродами представлены на рисунке 1.

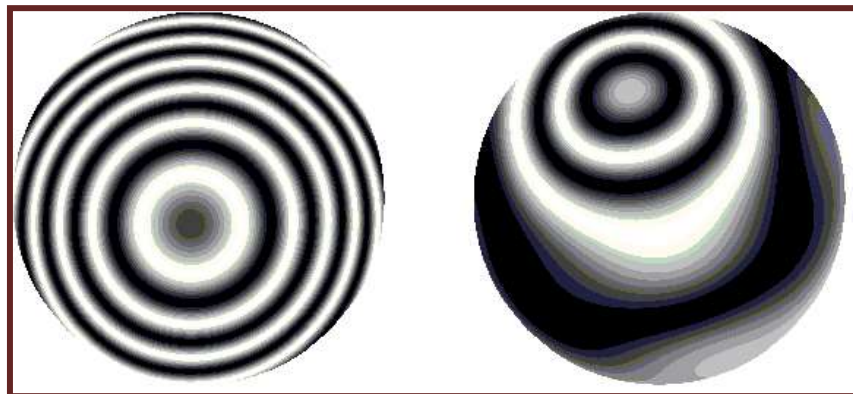


Рисунок 1 – Функция отклика для первого (слева)
и для семнадцатого (справа) электродов.

Сформированные в виде массива смещений функции отклика сохраняются в отдельный файл. Также, помимо функций отклика, в этот файл записывается информация о референсе (массив центров фокальных пятен референсного волнового фронта), о координатах прямоугольных окрестностей фокальных пятен для сетки, о радиусе пучка излучения и о технических характеристиках системы, таких как количество электродов адаптивного зеркала, фокусное расстояние линзового раstra, размер пикселя ПЗС-камеры, длина волны излучения.

Известный и используемый алгоритм вычисления управляющих напряжений заключается в следующем. Любое искажение волнового фронта, представленное в виде смещений центров фокальных пятен, может быть представлено как суперпозиция функций отклика электродов адаптивного зеркала:

$$S = \sum_{j=1}^{NE} U_j \cdot RF_j, \quad (1)$$

где NE – число электродов адаптивного зеркала;

S – матрица смещений фокальных пятен для компенсируемого волнового фронта;

U – вектор управляющих напряжений;

RF – матрица функции отклика.

Коэффициентами для этого разложения будут являться управляющие напряжения, которые необходимо найти.

Так как смещения функций отклика обычно измеряются в величинах $\frac{\text{пиксель}}{\text{Вольт}}$, смещения фокальных пятен – в пикселях, а искомые напряжения – в вольтах, то в единицах измерения правой и левой частей разногласий нет.

Алгоритм фазового сопряжения для поиска управляющих напряжений основывается на использовании смещений фокальных пятен. Однако смещения – это производные функции профиля волнового фронта.

Предположим, что все предварительные вычисления, как то – определение центров референса, центров искажённого волнового фронта, расчёт смещений фокальных пятен, считывание данных о функциях отклика электродов и расчёт коэффициентов при полиномах Цернике для текущего искажённого фронта и для всех функций отклика – были сделаны.

Поскольку в любом случае в вычислении управляющих напряжений участвуют смещения фокальных пятен и функции отклика электродов, то

можно представить их не в виде смещений, а в виде значений фазы. То есть необходимо сделать следующее.

1) Для каждого центра фокального пятна гартнограммы искажённого волнового фронта вычислить значение фазы.

2) Для каждой функции отклика электродов рассчитать значение фазы в каждом фокальном пятне.

Таким образом, получится система с вектором фаз для корректируемого волнового фронта в левой части и матрицей фаз для функций отклика в правой. Коэффициентами разложения по-прежнему будут являться искомые управляющие напряжения:

$$\begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_1^1 & \varphi_1^2 & \cdots & \varphi_1^{NE} \\ \varphi_2^1 & \varphi_2^2 & \cdots & \varphi_2^{NE} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_N^1 & \varphi_N^2 & \cdots & \varphi_N^{NE} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_{NE} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где φ_i – значение фазы для i -й точки гартнограммы искажённого волнового фронта;

U_i – управляющее напряжение на i -м электроде;

φ_i^j – значение фазы в i -й точке j -й функции отклика;

N – число фокальных пятен;

NE – число функций отклика (число электродов).

Таким образом, значения смещений будут заменены наборами значений фаз, и методом наименьших квадратов будет минимизироваться уже функционал разности значений функции профиля волнового фронта.

После нахождения управляющих напряжений на электродах адаптивного зеркала необходимо проверить качество коррекции волнового фронта. Умножив смещения одного фокального пятна для каждой функции отклика на соответствующие вычисленные управляющие напряжения и просуммировав значения по всем функциям отклика, получим «корректирующие» смещения для данного фокального пятна. Аналогичную процедуру необходимо проделать со всеми остальными фокальными пятнами.

Таким образом, «корректирующие» смещения будут найдены, и если вычесть из смещений фокальных пятен анализируемой гартнограммы (гартнограммы с искажённым волновым фронтом) «корректирующие» смещения, то результатом будут смещения центров фокальных пятен для скорректированного волнового фронта от референсного:

$$\begin{pmatrix} S_1^{corrected} \\ S_2^{corrected} \\ \vdots \\ S_N^{corrected} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1^{phase} - \sum_{i=1}^{NE} U_i \cdot S_{i1}^{resp} \\ S_2^{phase} - \sum_{i=1}^{NE} U_i \cdot S_{i2}^{resp} \\ \vdots \\ S_N^{phase} - \sum_{i=1}^{NE} U_i \cdot S_{iN}^{resp} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $S_i^{corrected}$ – «скорректированные» смещения i -го фокального пятна;

S_i^{phase} – значения смещений для i -го фокального пятна анализируемой гартманогаммы;

U_i – управляющее напряжение на i -м электроде;

S_{ij}^{resp} – смещения j -го фокального пятна i -й функции отклика;

N – число фокальных пятен;

NE – число функций отклика.

На основании полученных смещений можно найти коэффициенты при полиномах Цернике для скорректированного волнового фронта и построить картину распределения интенсивности (см. предыдущие лабораторные работы).

В идеале она должна быть плоской, но в связи с тем, что напряжение на электродах измеряется с точностью до 1 вольта и в связи с явлением гистерезиса адаптивного зеркала приемлемые корректирующие напряжения находятся, как правило, за 3-4 итерации.

Задание к работе.

Реализовать в системе MATLAB (или используя иные средства по усмотрению студента) одну итерацию алгоритма фазового сопряжения для нахождения управляющих напряжений электродов биморфного адаптивного зеркала.

Порядок выполнения работы.

1. Получить у преподавателя набор файлов, хранящих функции отклика в виде матриц наклонов фазы волнового фронта.

2. Создать программный код лабораторной работы. В первой части реализовать расчёт функций отклика в виде значений фаз φ_i^j . Для этого использовать метод, изученный в рамках лабораторной работы №4.

3. Во второй части реализовать решение системы уравнений (2) для неизвестных управляющих напряжений, считая, что функции отклика получены при напряжении +1В. Строго говоря, это не является корректным подходом, поскольку в реальности функции отклика снимаются при других значениях напряжений в зависимости от конструкции адаптивного зеркала. В этом случае величины U_i , фигурирующие в выражениях (2) и (3), являются не управляющими напряжениями, а своего рода масштабными коэффициентами, на которые следует умножать напряжение, при котором получены функции отклика. Данные произведения и являются управляющими напряжениями.

4. В предположении, что управляющие напряжения могут изменяться только дискретно с шагом $\pm 1В$, округлить найденные значения U_i до ближайшего целого.

5. По аналогии с правой частью выражения (3) вычислить матрицу разностей фаз исходного волнового фронта и волнового фронта, формируемого при подаче целочисленных управляющих напряжений. Визуализировать результаты.

6. Оформить отчёт по лабораторной работе. В отчёте сделать вывод о причинах погрешности метода и предложения о путях уменьшения данной погрешности. Защитить результаты.

Контрольные вопросы.

1. Объяснить физический смысл функций отклика биморфного адаптивного зеркала.

2. Описать способы представления функций отклика.

3. Описать суть алгоритма фазового сопряжения.

4. Каковы источники погрешности алгоритма фазового сопряжения? Каковы способы уменьшения этой погрешности?

5. Пояснить программный код, созданный в ходе выполнения работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

«Алгоритмы выделения интерференционных полос для восстановления формы волнового фронта на основе интерферограммы»

Цель работы: изучение и практическая реализация алгоритмов поиска интерференционных полос на интерферограммах.

Краткая теория.

В настоящее время все больше стало применяться автоматическое восстановление фазы интерферограмм (рисунок 1). Оно ведется либо на основе временной модуляции разности фаз интерферирующих волновых фронтов, либо на основе пространственной обработки интерферограмм. В первом случае на точность измерений не влияет изменение амплитуды и изменения пространственной частоты интерферограммы по полю наблюдения, однако сказываются механические вибрации интерферометра. Кроме того, первый подход сложно использовать при обработке интерферограмм быстропротекающих процессов (например, исследование поведения управляемого зеркала в динамике либо изменение показателя преломления активных лазерных сред).

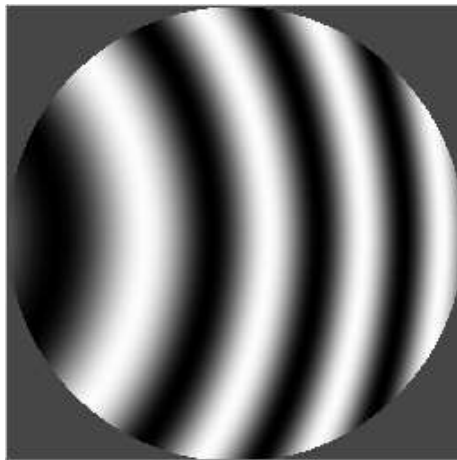


Рисунок 1 – Пример интерферограммы.

Что касается пространственной обработки, то можно выделить несколько основных способов.

1. Определение фазы интерферограммы в каждой точке поля зрения (например, взятие функции арккосинуса от значений интенсивности).
2. Определение фазы в некоторых точках или на некоторых линиях интерферограммы и последующая аппроксимация или интерполяция фазы.

3. Выделение средних линий интерференционных полос или линий экстремумов интенсивности (хребтовых линий) с последующим анализом их расположения и интерполяцией фазы на все поле зрения.

Высокая чувствительность к шумам изображения и нелинейности приемника методов первой группы обуславливает редкое использование этих методов.

Методы, отнесенные ко второй группе, используют только часть информации, поэтому к недостаткам метода можно отнести его нечувствительность к мелким локальным дефектам волнового фронта (например, из-за шероховатости отражающей поверхности).

Наиболее удобными в использовании являются методы третьей группы. К ним относится скелетизация интерференционных полос. Для обработки по этому методу интерферограмма преобразуется в двоичную картину: тем точкам изображения, интенсивность которых выше некоторого порога (например, среднего значения интенсивности по полю зрения), присваивается значение "1", остальным - значение "0". Затем осуществляется просмотр всей двоичной картины, и каждая единица заменяется на ноль, если лежит на границе полосы. Эта операция повторяется до тех пор, пока полоса не превратится в цепочку единиц, расположенных на средней линии («скелете») полосы.

Таким образом, интерферограмма преобразуется к набору линий, разность фаз интерферирующих пучков на которых различается на π , при этом процедура скелетизации повторяется как для тёмных, так и для светлых полос. Восстановление фазы интерферограммы сводится к интерполяции между найденными линиями. Это достаточно быстрый метод, но у него есть определённые недостатки.

При сильной модуляции интенсивности интерферирующих пучков по полю зрения и неудачном выборе порога бинаризации часть полос интерферограммы может быть потеряна, а при сильных высокочастотных шумах возможно обнаружение ложных полос. Поэтому скелетизацию необходимо дополнять ручной ретушью, что затрудняет автоматизацию обработки. Кроме того, при несимметричном профиле интенсивности центр полосы не будет совпадать с максимумом интенсивности на полосе. Поэтому, строго говоря, разность фаз между соседними линиями скелета не равна в точности π .

Эти недостатки устранены в алгоритме трассировки полос (рисунок 2). Для нахождения линии максимумов интенсивности (хребтовой линии) на изображении выбирается точка 1 – локальный максимум интенсивности. Пусть в этой точке вектор локального направления (наклона) полосы t_1 и

локальное направление нормали n_1 . Линия максимальной интенсивности, проходящая через точку 1, находится следующим способом. Рассмотрим точку 1_0 изображения (предиктор), лежащую на линии локального наклона полосы на расстоянии δ от точки 1. Величина δ определяется из локальной ширины полосы и скорости изменения локального наклона (угла между t_n и t_{n-1}). Найдем направление нормали n_2 в этой точке и выберем на нормали ближайший локальный максимум интенсивности – точку 2 (корректор). Она и будет следующей точкой хребтовой линии интерференционной полосы. Найдя вектор локального наклона t_2 в новой точке, полосу можно продолжать дальше, до края поля зрения.

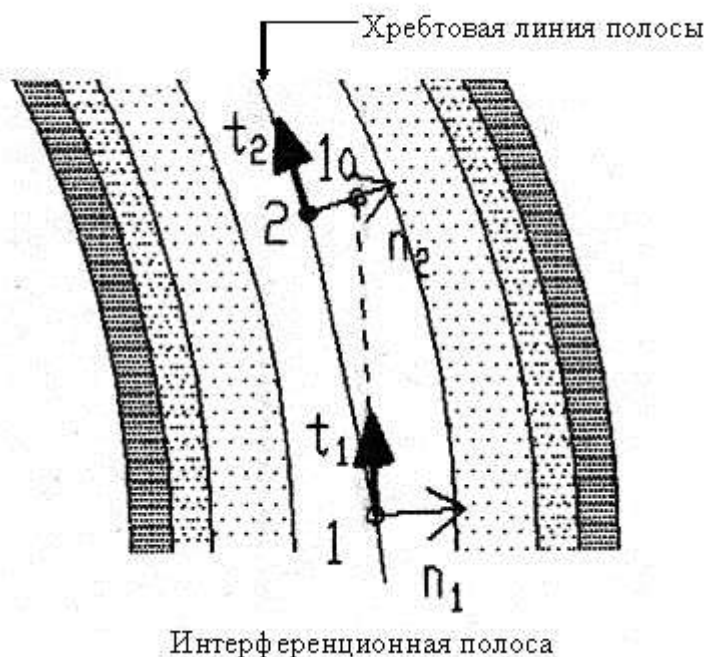


Рисунок 2 – Алгоритм трассировки полос.

Точность восстановления фазы при трассировке полос методом предиктора-корректора выше, чем при скелетизации. При этом положение линий с относительной разностью фаз π вычисляется точнее. Как и при использовании предыдущего алгоритма, восстановление всей интерференционной картины выполняется с помощью интерполяции.

Задание к работе.

Реализовать в системе MATLAB (или используя иные средства по усмотрению студента) алгоритмы скелетизации и трассировки интерференционных полос. Выполнить их сравнительный анализ на основе полученных результатов.

Порядок выполнения работы.

1. Получить у преподавателя графический файл с интерферограммой.

2. Создать программный код лабораторной работы. В первой его части выполнить загрузку данных интерферограммы в матрицу, которая в дальнейшем будет обрабатываться. В системе MATLAB для импорта изображения использовать команду `imread`.

3. В следующей части программы реализовать алгоритм скелетизации интерференционных полос. Следует обратить внимание на несколько технических моментов. Во-первых, в файле интерферограммы интерференционные полосы находятся внутри круговой апертуры. Поэтому следует предусмотреть отсечение областей, находящихся за пределами этой апертуры. Расчёт порогового значения интенсивности должен происходить только для области внутри апертуры. Во-вторых, просмотр двоичной картины можно выполнять либо по горизонтали, либо по вертикали. Следует остановиться на одном из вариантов, предварительно убедившись, что просмотр будет выполняться вдоль оси наиболее частой смены экстремумов. Например, для интерферограммы на рисунке 1 это будет ось абсцисс. В реальной системе программа разрабатывается таким образом, чтобы автоматически распознавать правильное направление. В лабораторной работе допустима реализация только одного из вариантов и предварительная подготовка файла интерференционной картины таким образом, чтобы соответствовать данному варианту.

4. В третьей части программы реализовать алгоритм трассировки интерференционных полос. Для поиска локального направления полосы рекомендуется анализировать по две соседних строки (или столбца при вертикальном просмотре) пикселей интерферограммы. Направляющая прямая, проходящая через точку 1 (см. рисунок 2), будет параллельна отрезку, соединяющему локальные максимумы (минимумы) интенсивности в соседних строках. Исходя из правил подобия треугольников, координаты точки 1_0 вычисляются следующим образом (см. рисунок 3). Находим длину L отрезка, соединяющего точки (x_1, y_1) и (x_2, y_2) . Находим отношение величины смещения δ к длине L : $k = \delta/L$. Тогда смещения по координатам между точками 1 и 1_0 составят: $\delta x = k(x_2 - x_1)$, $\delta y = k(y_2 - y_1)$. Для смещения в противоположном направлении (вниз на рисунке 3) необходимо взять величины δx и δy с противоположными знаками. Точка 1_0 может не соответствовать реальному пикселю на интерферограмме, а лишь является отправной для поиска в её окрестности «хребтовой» линии (см. рисунок 2). Для поиска точки 2 следует проанализировать окрестности точки 1_0 и найти локальный максимум (или

РЕКОМЕНДОВАННЫЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаптивная Оптическая Система для коррекции излучения лазера. Техническое описание. Инструкция пользователя. – М.: ООО «Институт Адаптивной Оптики», 2014. – 63 с.
2. Шанин О.И. Адаптивные оптические системы коррекции наклонов. Резонансная адаптивная оптика. – М.: Техносфера, 2013. – 296с., ISBN 978-5-94836-347-9 (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»)
3. Jin-Seok Lee. Wavefront error measurement of high-numerical-aperture optics with a Shack-Hartmann sensor and a point source / Ho-Soon Yang, Jae-Won Hahn // Applied Optics. - 2007. - Vol. 46. - P. 1411-1415.
4. Thorlabs. Optical Wavefront Sensors (Shack-Hartmann Sensors). WFS Series. Operation Manual [Text]. - Version: 3.5. - Thorlabs GmbH, Date: March 27, 2012. - 152 pp.
5. Ермолаева Е.В., Зверев В.А., Филатов А.А. Адаптивная оптика. // Учебное пособие. СПб: ИТМО, 2012.
6. Ф.Ю.Канев, В.П.Лукин. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования.// Изд. Института оптики атмосферы СО РАН, 250 с., 2005.
7. Ю.В.Шелдакова, А.В.Кудряшов, А.Л.Рукоусев, Т.Ю.Черезова, Использование гибридного алгоритма управления биморфным зеркалом для фокусировки светового излучения.// Оптика атмосферы и океана, том 20, № 4, сс.380-383 (2007).
8. Е.Р. Алексеев, О.В. Чеснокова. Решение задач вычислительной математики в пакетах Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9. Серия: Самоучитель. Издательство: НТ Пресс, 2006г. Мягкая обложка, 496 с.
9. Поршнева С.В. MATLAB 7. Основы работы и программирования. Учебник. ISBN: 5-9518-0137-0. Издательство "Бином. Лаборатория знаний" 2006г. 320 стр.