

УДК 53.08

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА С ДВУХКАНАЛЬНОЙ МУАРОВОЙ ДЕФЛЕКТОМЕТРИЕЙ И ГРАФИЧЕСКИМ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИМ ИНТЕРФЕЙСОМ МАТЛАВ*

© М. Dashti¹, S. Rasouli^{2,3}

¹Department of Physics, Zanjan Branch, Islamic Azad University,
45156-58145, Arazi St., Daneshjoo Blv., Zanjan, Iran

²Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS),
45137-66731, Gavazang St., Prof. Yousef Sobouti Blv., Zanjan, Iran

³Optics Research Center, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS),
45137-66731, Gavazang St., Prof. Yousef Sobouti Blv., Zanjan, Iran
E-mail: dashti.iauz@gmail.com, rasouli@iasbs.ac.ir

Разработана экспериментальная установка двухканального датчика волнового фронта (ДВФ) на основе муаровой дефлектометрии. Возможности этого ДВФ были протестированы при измерениях атмосферной турбулентности. Как и другие ДВФ, он может быть использован в различных областях. Разработана программа с графическим интерфейсом МАТЛАВ, позволяющая легко её освоить любому пользователю. Эта программа принимает одновременные горизонтальные и вертикальные муаровые узоры в качестве входных данных и восстанавливает соответствующую карту волнового фронта и её значения аберраций. Пошагово объясняется алгоритм этого процесса. Для типичного входного муарового рисунка вычисляются такие результаты, как форма волнового фронта и соответствующие первые десять коэффициентов Цернике, и отображаются в качестве выходных данных. Кроме того, в программе для приложений с атмосферной турбулентностью есть специальная часть, которая вычисляет величину силы турбулентности (C_n^2) и временную эволюцию угла прибытия.

Ключевые слова: датчик волнового фронта, программа МАТЛАВ, муаровые полосы, аберрации волнового фронта.

DOI: 10.15372/AUT20220306

Введение. Датчики волнового фронта (ДВФ) находят множество применений в оптической метрологии [1], адаптивной оптике [2], офтальмологии [3] и т. д. [4, 5]. Методы измерений ДВФ различны. Некоторые из них, например датчик кривизны, измеряют кривизну волнового фронта [6]. Датчик Шека — Гартмана — один из наиболее часто используемых [7], измеряет наклоны волнового фронта. Он содержит матрицу линз, фокусирующую падающий световой луч на такой детектор, как ПЗС-матрица. Искажения на падающем волновом фронте вызывают движение этих пятен. По смещениям пятен на ПЗС-матрице вычисляются фазовые наклоны и соответствующие аберрации волнового фронта.

Новый датчик волнового фронта на основе двухканальной муаровой дефлектометрии (ДКМД) был предложен в [8]. Он используется при измерениях турбулентности [9, 10], но, как и другие ДВФ, его можно применять в различных приложениях. Экспериментальные установки такого ДВФ даны на рис. 1 и 2. Установка, показанная на рис. 1, состоит из двух муаровых дефлектометров в двух каналах. В каждом канале есть две одинаковые

*На английском языке статья опубликована в журнале *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* в 2021 г. № 6.

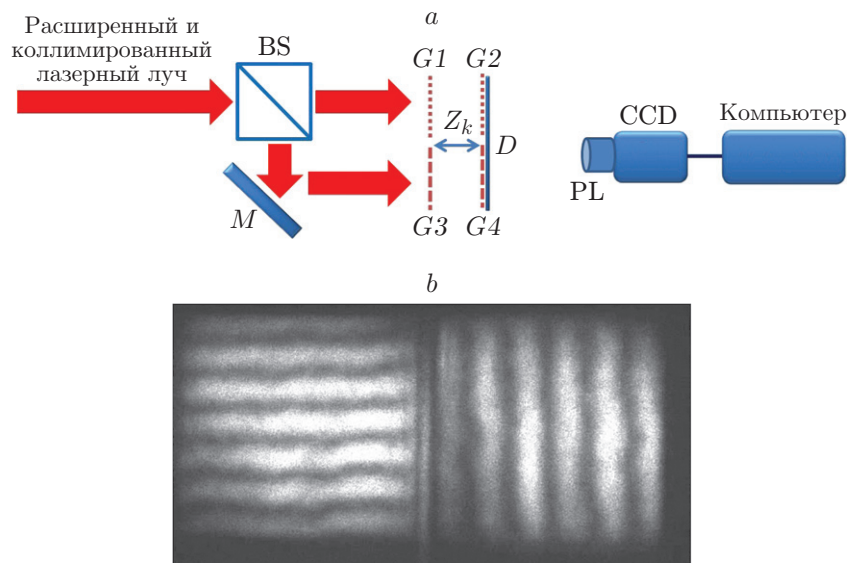


Рис. 1. Установка ДКМД: *a* — принципиальная схема (BS — светоделитель, *M* — зеркало, Z_k — расстояние Тэлбота, *D* — рассеиватель, PL — проекционная линза, *G1*, *G2*, *G3* и *G4* — решётки); *b* — типичные записанные муаровые узоры

решётки, разделённые расстоянием Тэлбота. Соответствующая система координат выбирается таким образом, чтобы в первом канале направляющие решётки находились почти в направлении y , а во втором канале — почти в направлении x . Когда первые решётки освещаются расширенным и коллимированным лазерным лучом, на вторых решётках формируются их собственные изображения, и в результате в обоих каналах образуются муаровые полосы. Типичный записанный муаровый узор с использованием этой настройки показан на рис. 1, *b*. Основным ограничением настройки является размер решёток. Чтобы преодолеть это ограничение, к установке необходимо добавить телескоп и коллимирующую линзу (см. рис. 2, *a*). В этом случае при расчётах следует учитывать увеличение изображения между первыми решётками и входной плоскостью телескопа [10]. Типичный записанный муаровый узор с использованием такой настройки показан на рис. 2, *b*. Из-за области затемнения телескопа в центре муаровых узоров создаётся тёмная зона.

Как и ДВФ Шека — Гартмана, искажения на падающем волновом фронте вызывают искажения на муаровых полосах. По отклонениям муаровых узоров можно определить фазовые наклоны и соответствующие значения аберрации. Муаровые полосы анализируются с помощью метода, который будет подробно описан далее. Представим пакет графического пользовательского интерфейса MATLAB, который может помочь любому пользователю применять ДВФ в широком спектре приложений.

Рассмотрим шесть основных частей в программе графического интерфейса.

1. Использование этой программой двух наборов муаровых узоров: при отсутствии и наличии образца.
2. Удаление высоких пространственных частот из распределения интенсивности муаровых узоров, чтобы эти узоры получились чёткими.
3. Определение следов муаровых полос на снятых муаровых узорах.
4. Нахождение точек пересечения горизонтальных и вертикальных следов для заданной пары муаровых узоров.
5. Вычисление наклонов волнового фронта и соответствующих значений фазы по смещениям точек пересечения.

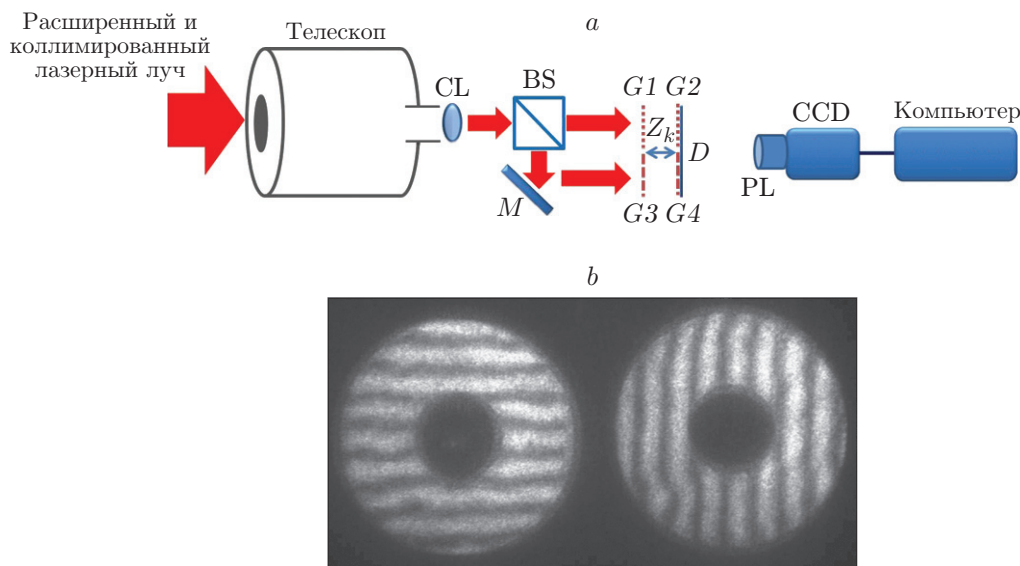


Рис. 2. Датчик волнового фронта ДКМД на телескопе: *a* — принципиальная схема (CL — коллимирующая линза, остальные обозначения как на рис. 1); *b* — типичные записанные муаровые узоры

6. Разложение волнового фронта на первичные моды Цернике.

Кроме того, рассмотрена специальная часть программы для приложений, связанных с атмосферной турбулентностью. Одним из физических эффектов, наблюдаемых при распространении светового луча в турбулентной атмосфере, являются колебания направления распространения света, которые называются колебаниями угла прибытия (УП). Вычисляя дисперсию флуктуаций УП, можно определить величину оптической турбулентности C_n^2 . Используя процедуру из [11], программа вычисляет временную эволюцию УП и значение C_n^2 .

1. Анализ данных. Для датчика волнового фронта ДКМД потребуются два набора муаровых узоров: муаровые узоры при отсутствии образца (эталонные) и в присутствии образца (отклонённые). В некоторых приложениях исследуются динамические среды (например, атмосферная турбулентность), в которых муаровые полосы испытывают случайную временную эволюцию. В этих случаях муаровые узоры с длительным временем экспозиции записываются и используются в качестве эталонных. Из-за искажений волнового фронта муаровые полосы отклоняются от своих эталонных форм. Опишем, как можно измерить эти отклонения.

1.1. Получение низкочастотного освещения. Низкая пространственная частота в записанном распределении интенсивности определяет полосы муара. Чтобы получить более чёткие узоры муара, можно удалить высокие пространственные частоты в распределении интенсивности с помощью метода преобразования Фурье. Для этого необходимо вычислить преобразование Фурье распределения интенсивности и в пространственной частотной области удалить высокие частоты спектра, а затем найти обратное преобразование Фурье. На рис. 3 показаны полосы муара до и после удаления высоких пространственных частот в распределении интенсивности и представлены соответствующие профили интенсивности вдоль белой линии в узоре муара.

1.2. Трассировка муаровых полос. Местоположение всех точек с максимальной интенсивностью вдоль заданной яркой полосы назовём ярким следом, а местоположение всех точек с минимальной интенсивностью вдоль заданной тёмной полосы — тёмным следом.

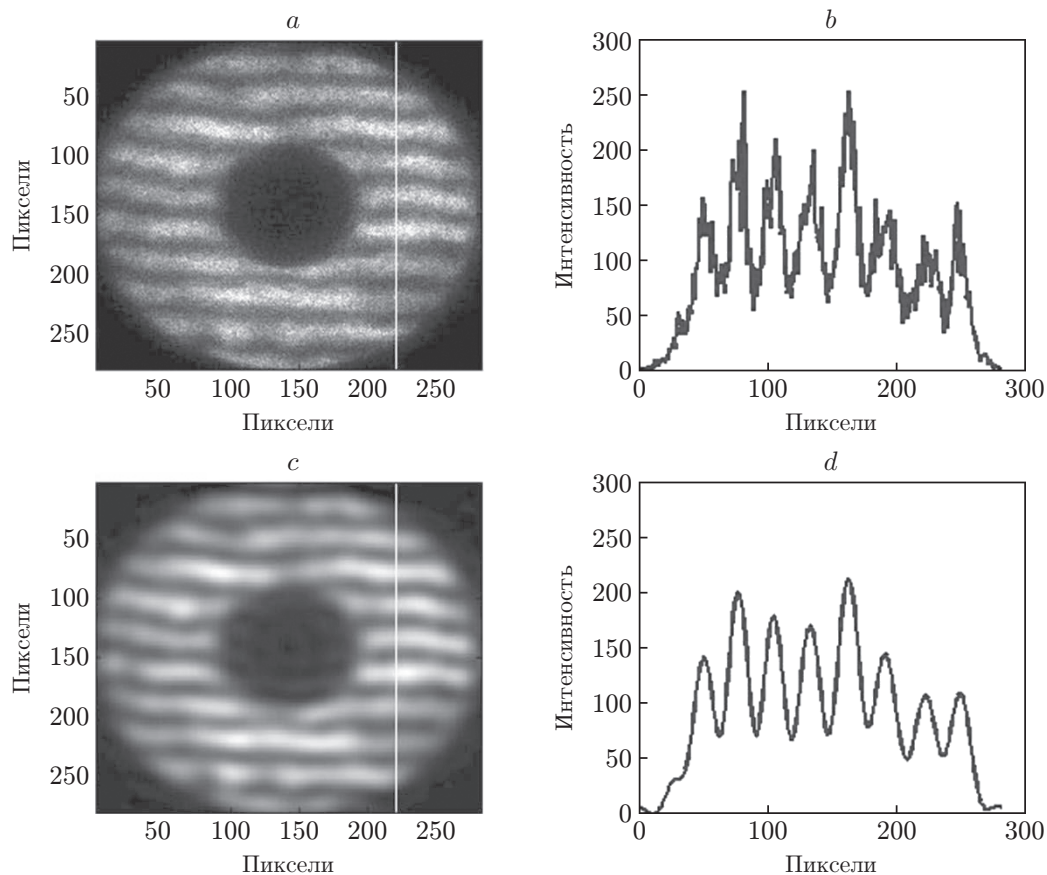


Рис. 3. Типичные муаровые полосы при исследовании атмосферной турбулентности: *a* и *b* — до и после удаления высоких пространственных частот в распределении интенсивности соответственно, *c* и *d* — профили интенсивности вдоль иллюстрированных белых линий до и после удаления высоких пространственных частот соответственно

Для определения следа данной муаровой бахромы можно использовать два разных метода. В первом методе прямоугольная рамка была выбрана для заданной муаровой бахромы таким образом, чтобы внутри рамки была только желаемая бахрома (рис. 4, *a*). Значения интенсивности в рамке сохраняются в виде матричных данных. Для горизонтальной яркой полосы вычисляются местоположения максимума для всех столбцов матрицы, а для вертикальной яркой полосы — местоположения максимума для всех строк матрицы. Местоположение максимальных точек — это след бахромы. Для трассировки тёмных полос достаточно вычислить минимальную интенсивность в процессе трассировки. В программе этот метод назван методом выбора поля. Согласно рис. 4, *b*, если невозможно выбрать рамку, в которой будет отображаться только муаровая бахрома, вышеописанный метод не подойдёт для трассировки муаровой бахромы. В этом случае необходимо использовать другой алгоритм для поиска следа. Второй метод предполагает выбор двух точек для каждой муаровой бахромы: одной — в начале, а другой — в конце заданной границы. Значение интенсивности первой точки для вертикальной полосы сравнивается со значениями пикселей справа и слева от этой точки, а для горизонтальной полосы — со значениями пикселей сверху и снизу от этой точки. Затем вычисляется максимальное или минимальное значение этих трёх точек. Точка с минимальным или максимальным значением выбирается за начало координат. Далее перемещаемся на один пиксель вниз в случае вертикальной поло-

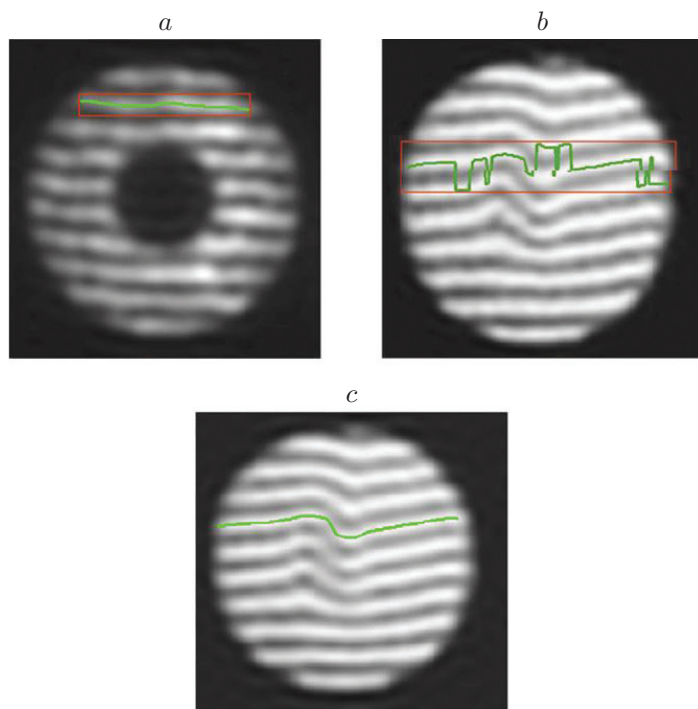


Рис. 4. Трассировка муаровой полосы: *a* — с использованием метода выделения рамки, *b* — некорректная трассировка с использованием метода выделения рамки, *c* — трассировка с использованием попиксельного метода

сы и на один пиксель вправо в случае горизонтальной полосы и повторяем процедуру, пока не достигнем конечной точки полосы (рис. 4, *c*). В программе это — попиксельный метод. Чтобы увеличить пространственное разрешение этой работы для данного муарового узора, введём новую концепцию, которую назовём «виртуальными следами». Здесь можно удалить высокие пространственные частоты с помощью быстрого преобразования Фурье. В результате профиль интенсивности муаровых полос в направлении, перпендикулярном муаровым полосам, может быть записан как

$$I(y) = \left[\left(\frac{I_b + I_d}{2} \right) + \left(\frac{I_b - I_d}{2} \right) \cos \frac{2\pi}{d_m} (y + y_{0b}) \right], \quad (1)$$

где d_m — расстояние между муаровыми полосами, I_b, I_d — интенсивности ярких и тёмных полос, y_{0b} — положение эталонного яркого следа соответственно. Из уравнения (1) видно, что средние точки между соседними светлыми и тёмными полосами имеют интенсивность, равную $I_{vir}^{(1)} = ((I_b + I_d)/2)$. Теперь для случая искажённого муарового рисунка следы точек с интенсивностями, равными средней интенсивности соседних светлых и тёмных полос $I_{vir}^{(1)} = ((I'_b + I'_d)/2)$, должны быть определены как виртуальный след первого порядка, который можно найти, используя следующее уравнение во всех столбцах распределения интенсивности муарового узора:

$$I_{vir}^{(1)} = \left(\frac{I_b + I_d}{2} \right) = I'(y_{vir}^{(1)}) \rightarrow y_{vir}^{(1)} = y \left(\frac{I'_b + I'_d}{2} \right). \quad (2)$$

Потенциально можно создать большое количество виртуальных следов между двумя соседними светлыми и тёмными полосами, используя их интенсивность и местоположение [12].

Чтобы указать все следы в одной и той же системе координат, следует выбрать систему координат для всех записанных муаровых узоров.

1.3. Точки пересечения. Подобно массиву фокальных пятен в ДВФ Шека — Гартмана в ДВФ ДКМД используется массив точек пересечения горизонтальных и вертикальных трасс. На практике эти точки пересечения могут быть получены путём рассмотрения двух наборов вертикальных и горизонтальных муаровых следов в одной системе координат x, y . Эта работа должна быть выполнена как для эталонных, так и для отклонённых муаровых узоров. Для вычисления координат точек пересечения использовался код MATLAB (`intersections.m`), написанный Д. Шварцем [13]. Можно использовать такие функции, как `polyxpoly`, определённые в MATLAB toolbox, но эффективность `intersections.m` и так очень высока. В программе координаты x и y всех точек пересечения задаются в матрицах $m \times n$ по отдельности, где m и n — общее количество горизонтальных и вертикальных следов соответственно. Эти матрицы введены для эталонных следов X_{I0} и Y_{I0} , а для отклонённых следов — X_I и Y_I . Например, X_{Iij} и Y_{Iij} являются координатами точки пересечения между i -м горизонтальным следом и j -м вертикальным следом, но если в каком-либо случае эти следы не пересекаются, то соответствующие элементы матриц задаются как NaN.

1.4. Векторы смещения и наклоны волнового фронта. Определим смещение матриц муаровых полос D_x и D_y в направлении x и y соответственно:

$$D_x = X_I - X_{I0}; \quad D_y = Y_I - Y_{I0}. \quad (3)$$

Матрицы наклона волнового фронта могут быть записаны через матрицы смещения следующим образом:

$$\left[\frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y} \right]_{ij} = \frac{d}{z_k} \left[\frac{D_y}{d_{mh}}, \frac{D_x}{d_{mv}} \right]_{ij}, \quad (4)$$

где U — функция волнового фронта, d — период решётки, d_{mh} — расстояние между горизонтальными муаровыми полосами, d_{mv} — расстояние между вертикальными муаровыми полосами и z_k — k -е расстояние Тэлбота соответственно. Различные алгоритмы, такие как геометрия Фрида [14], геометрия Хадгина [15] и геометрия Саутвелла [16], используются для определения значений фазы по наклонам волнового фронта.

1.5. Реконструкция волнового фронта. Поскольку наклоны волнового фронта определяются точно в точках пересечения, а не между двумя соседними точками пересечения, использовалась геометрия Саутвелла [16]. В этой геометрии соотношения между значениями фазы и наклонами волнового фронта определяются следующим образом:

$$\frac{1}{2}(S_{ij}^x + S_{ij+1}^x) = \frac{U_{ij+1} - U_{ij}}{l}; \quad \frac{1}{2}(S_{ij}^y + S_{i+1j}^y) = \frac{U_{i+1j} - U_{ij}}{l}, \quad (5)$$

где $S_{ij}^x = \partial U_{ij} / \partial x$, $S_{ij}^y = \partial U_{ij} / \partial y$ и l равно расстоянию между двумя соседними точками пересечения в плоскости решёток. Рассматривая эти уравнения для всех точек пересечения, получим матричное уравнение $\mathbf{S} = \mathbf{P}\mathbf{U}$, где \mathbf{S} — вектор, содержащий все измерения наклона, \mathbf{P} — матрица взаимодействия, а \mathbf{U} — вектор неизвестных значений волнового фронта. При решении этого уравнения получаются значения функции волнового фронта, а значения фазы могут быть вычислены по формуле $\Phi = (2\pi/\lambda)\mathbf{U}$ (рис. 5).

Чтобы определить значения аберрации, мы расширяем фазовую функцию как сумму полиномов Цернике [17]:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{\infty} a_i Z_i. \quad (6)$$

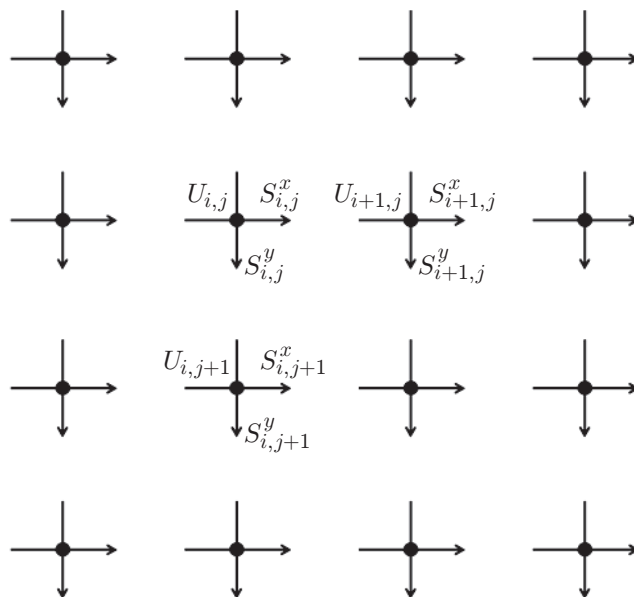


Рис. 5. Геометрия Саутвелла [16]

Рассмотрим вышеприведённое уравнение как векторное матричное умножение [18]:

$$\Phi = \mathbf{Z}\mathbf{A}, \quad (7)$$

где Φ — матрица столбцов значений фазы, \mathbf{Z} — матрица, в которой каждый столбец является одним из многочленов Цернике, \mathbf{A} — вектор столбцов коэффициентов Цернике. Программа показывает карту волнового фронта, соответствующую карту полиномов Цернике и их коэффициенты в главном окне.

2. Использование программы. Программу можно запустить, открыв TChMD.m из окна редактора MATLAB. Структура программы в виде блок-схемы проиллюстрирована на рис. 6. Далее представим различные части программы в главном окне.

2.1. Главное окно программы показано на рис. 7. Когда пользователь запускает программу, появляется главное окно с именем TChMD. Муаровые полосы, карта волнового фронта и карта аберраций отображаются на разных панелях главного окна.

Так, на панели Муаровая бахрома представлены желаемые муаровые узоры. Предполагаем, что муаровые узоры записываются под определённым именем, состоящим из двух частей: первая часть — это слово, а вторая часть — номер кадра. В главном окне пользователь вводит номер кадра желаемых муаровых узоров, чтобы увидеть соответствующую карту волнового фронта и её аберрации.

При нажатии на кнопку Построить на панели появится карта волнового фронта выбранной муаровой каймы. Пользователь может переключаться между двумерным и трёхмерным построением карты волнового фронта.

После щелчка по нижней части графика программа также вычисляет значения аберраций и отображает на панели первые 10 полиномов Цернике, за исключением одного члена.

2.2. Меню.

2.2.1. Меню файлов. Первое, что следует сделать при запуске программы, — указать путь, по которому находится папка с муаровыми полосами. Когда пользователь нажимает на кнопку Путь к изображениям в меню Файл, откроется небольшое окно, в котором пользователь может указать адрес папки с записанными муаровыми полосами. Кроме того, он

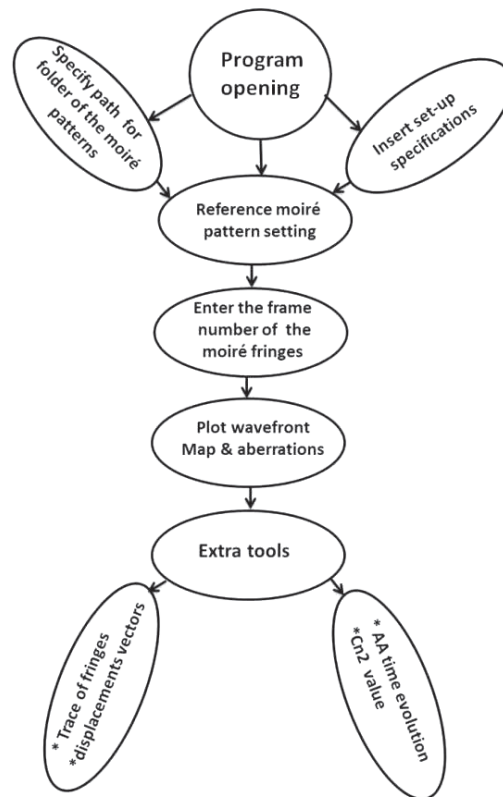


Рис. 6. Блок-схема структуры программы

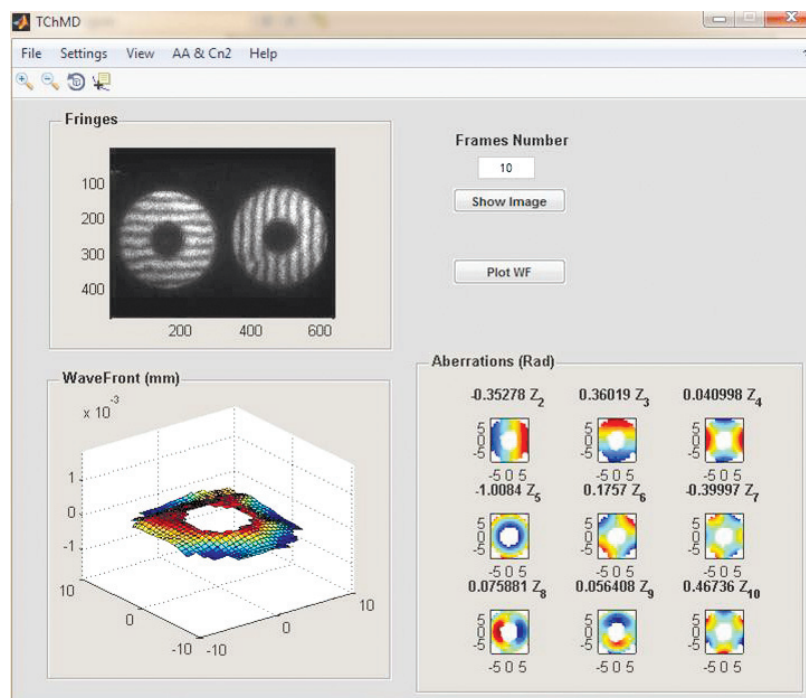


Рис. 7. Снимок главного окна

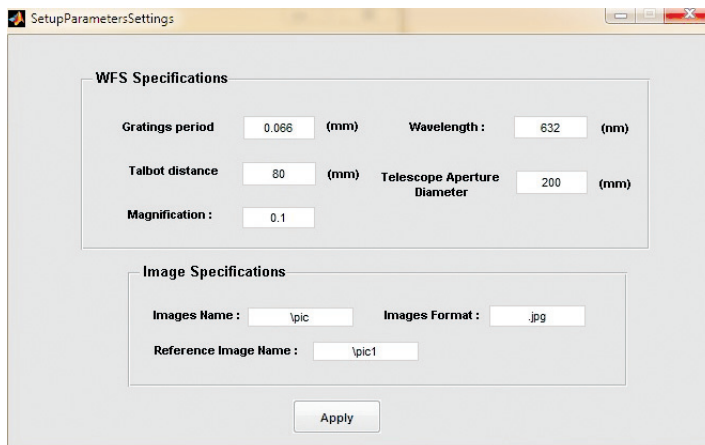


Рис. 8. Снимок подокна Настройки параметров

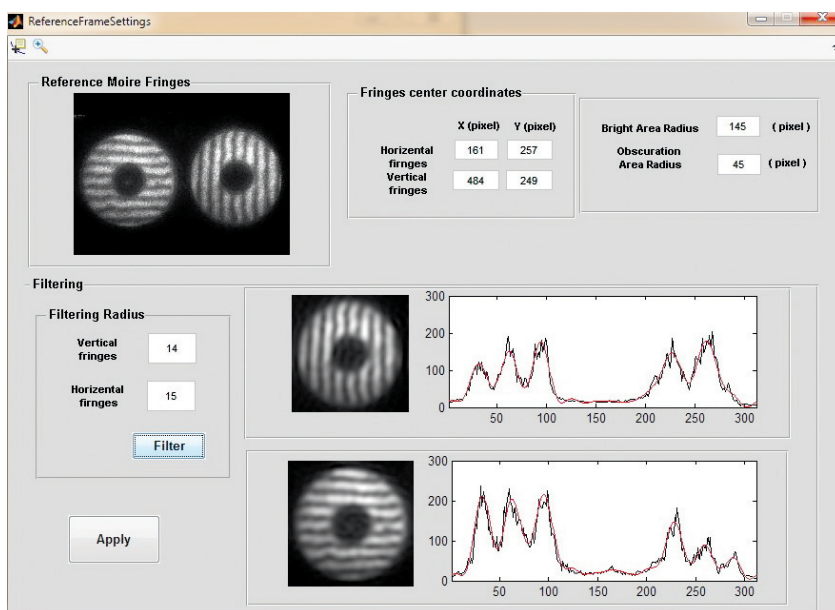


Рис. 9. Снимок подокна Настройки опорного кадра

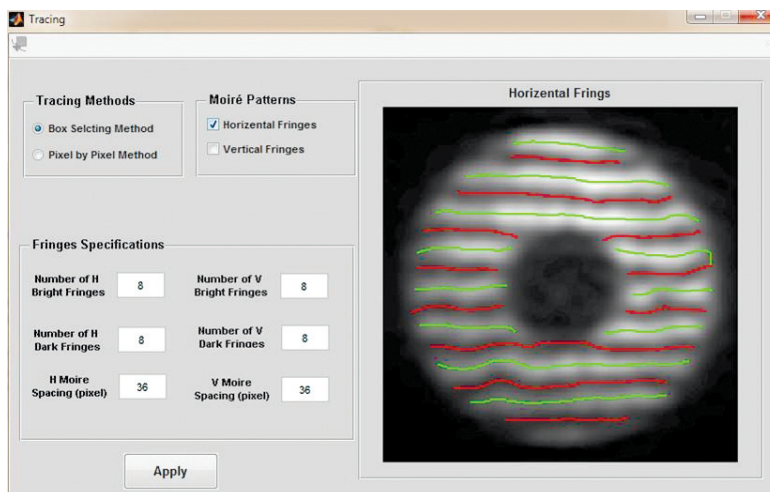


Рис. 10. Снимок подокна Отслеживание

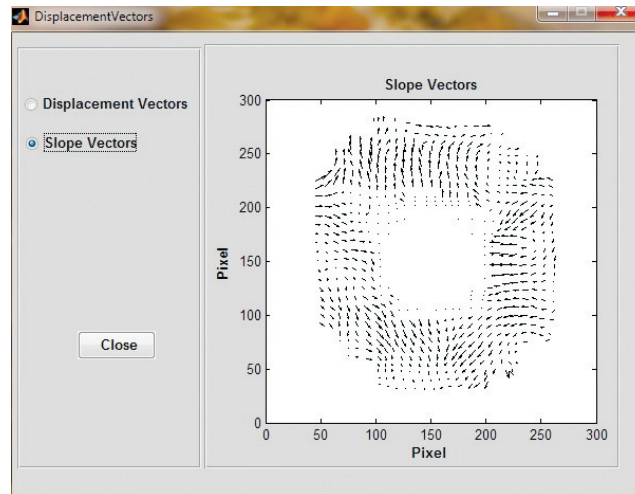


Рис. 11. Снимок подокна Векторы смещения

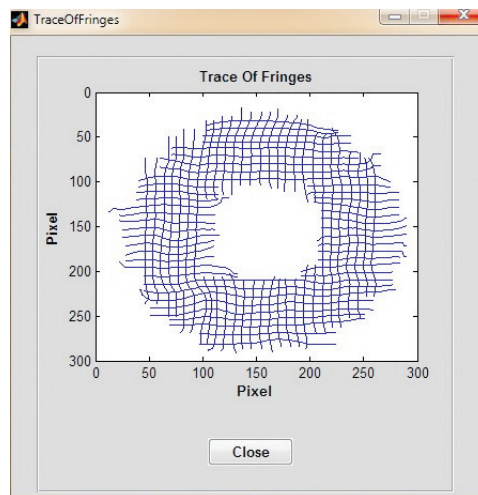


Рис. 12. Снимок подокна Трассировка полос

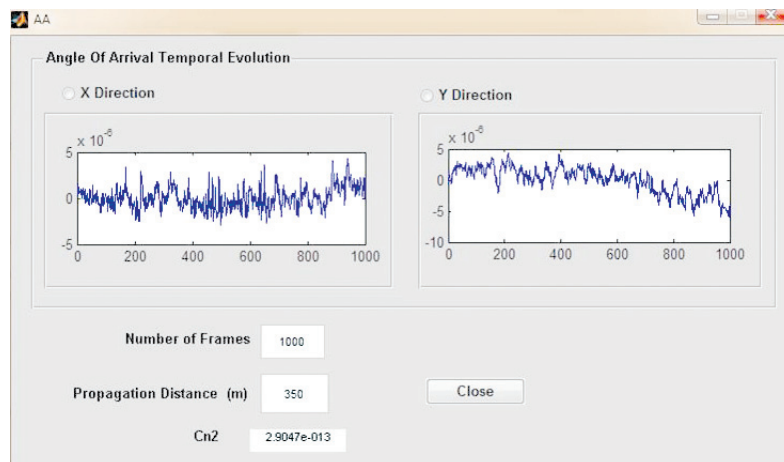


Рис. 13. Снимок подокна AA

может сохранить карту волнового фронта и карты аберраций, нажав на опцию Сохранить в меню Файл.

2.2.2. Меню настроек. В этом меню доступны два подокна. Первое из них — это Настройка параметров. Пользователь может ввести спецификации ДВФ, такие как период решёток, расстояние Тэлбота, диаметр апертуры телескопа, увеличение между первыми решётками и входной плоскостью телескопа и т. д.

Второе подокно — это Настройка системы координат, в котором пользователь может задать характеристики эталонных муаровых полос, таких как расстояние между горизонтальными и вертикальными муаровыми полосами, радиус тёмной области, радиус светлой области и т. д. Как упоминалось в разд. 1.1, для определения следа полосы высокие частоты распределения интенсивности могут быть устранены. Пользователь устанавливает радиус фильтрации в качестве пространственной частоты отсечки в распределении интенсивности. Профиль интенсивности в направлении, перпендикулярном муаровой кайме, наносится до и после процесса устранения шума, поэтому пользователь может определить величину подходящего радиуса. После нажатия на кнопку Применить появляется подокно Слежение, в котором пользователь находит следы эталонных муаровых полос. Существует два варианта метода отслеживания. Далее, указав количество горизонтальных и вертикальных светлых и тёмных муаровых полос, можно начать процесс трассировки. Эти подокна показаны на рис. 8–10.

2.2.3. Обзорное меню. В данном меню пользователь может видеть подокно Векторы смещения (рис. 11) и подокно Трассировка полос (рис. 12).

2.2.4. Меню AA и C_n^2 . Эта часть программы предназначена только для приложений, изучающих турбулентность. Когда пользователь нажимает в меню на кнопку AA & C_n^2 , он может увидеть эволюцию угла прибытия в последовательных муаровых полосах. Кроме того, пользователь может ввести количество кадров и расстояние распространения, чтобы увидеть величину силы турбулентности C_n^2 . Это подокно показано на рис. 13.

2.2.5. Меню Помощь — справочный файл в формате PDF, чтобы легко использовать программное обеспечение, доступное в меню справки.

3. Особенности программы.

— Можно изменять спецификации настройки для различных параметров эксперимента.

— Для отслеживания муаровых полос используются два разных алгоритма: один подходит для небольшого отклонения, а другой — для большого отклонения муаровых полос.

— Муаровые полосы, соответствующий волновой фронт и его аберрации отображаются одновременно в главном окне программы, чтобы пользователь мог интуитивно видеть, как изменения в муаровых полосах вызывают искажения волнового фронта.

— Для приложений с турбулентностью есть специальная часть программы, которая вычисляет силу турбулентности C_n^2 и временную эволюцию угла прибытия.

Заключение. Разработанная программа значительно повышает удобство экспериментального измерения волновых фронтов и последующей обработки результатов этого измерения. Она применима не только для измерения турбулентности [10, 19, 20], но также может быть использована в различных приложениях ДВФ [21, 22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Forest C., Canizares C. R., Neal D. R. et al. Metrology of thin transparent optics using Shack — Hartmann wavefront sensing // Opt. Eng. 2004. **43**, Iss. 3. P. 742–753.
2. Roddier F. Adaptive Optics in Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 407 p.
3. Maeda N. Wavefront technology in ophthalmology // Curr. Opin. Ophthalmol. 2001. **12**, Iss. 4. P. 294–299.

4. **Murphy K., Burke D., Devaney N., Dainty C.** Experimental detection of optical vortices with a Shack — Hartmann wavefront sensor // *Opt. Express*. 2010. **18**, Iss. 15. P. 15448–15460.
5. **Rativa D., de Araujo R. E., Gomes A. S., Vohnsen B.** Hartmann — Shack wavefront sensing for nonlinear materials characterization // *Opt. Express*. 2009. **17**, Iss. 24. P. 22047–22053.
6. **Roddi E.** Curvature sensing and compensation: A new concept in adaptive optics // *Appl. Opt.* 1988. **27**, Iss. 7. P. 1223–1225.
7. **Platt B. C., Shack R.** History and principles of Shack — Hartmann wavefront sensing // *Journ. Refract. Surg.* 2001. **17**, N 5. S573.
8. **Rasouli S., Ramaprakash A. N., Das H. K. et al.** Two channel wavefront sensor arrangement employing moiré deflectometry // *Proc. SPIE*. 2009. **7476**. 74760K.
9. **Rasouli S., Dashti M., Ramaprakash A. N.** An adjustable, high sensitivity, wide dynamic range two channel wavefront sensor based on moiré deflectometry // *Opt. Express*. 2010. **18**, N 23. P. 23906–23915.
10. **Dashti M., Rasouli S.** Measurement and statistical analysis of the wavefront distortions induced by atmospheric turbulence using two-channel moiré deflectometry // *Journ. Opt.* 2012. **14**, N 9. 095704.
11. **Rasouli S., Tavassoly M. T.** Application of the moiré deflectometry on divergent laser beam to the measurement of the angle of arrival fluctuations and the refractive index structure constant in the turbulent atmosphere // *Opt. Lett.* 2008. **33**, Iss. 9. P. 980–982.
12. **Rasouli S.** Atmospheric turbulence characterization and wavefront sensing by means of the moiré deflectometry // *Topics in Adaptive Optics*. Ed. by R. K. Tyson. 2012. P. 23–38.
13. **Schwarz D.** Fast and Robust Curve Intersections. 1994-2022 The MathWorks, Inc. URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/11837> (дата обращения: 29.10.2021).
14. **Fried D. L.** Least-square fitting a wave-front distortion estimate to an array of phase difference measurements // *JOSA*. 1977. **67**, Iss. 3. P. 370–375.
15. **Hudgin R. H.** Wave-front reconstruction for compensated imaging // *JOSA*. 1977. **67**, Iss. 3. P. 375–378.
16. **Southwell W. H.** Wave-front estimation from wavefront slope measurements // *JOSA*. 1980. **70**, Iss. 8. P. 998–1006.
17. **Noll R. J.** Zernike polynomials and atmospheric turbulence // *JOSA*. 1976. **66**, Iss. 3. P. 207–211.
18. **Schmidt J. D.** Numerical Simulation of Optical Wave Propagation with Examples in MATLAB. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2010. Vol. PM199. 212 p.
19. **Rasouli S., Razi E. M.** Impacts of the source temperature and its distance on the statistical behavior of the convective air turbulence // *Appl. Phys. B*. 2019. **125**, Iss. 10. 185.
20. **Razi M. E., Rasouli S., Dashti M., Niemela J. J.** A high-resolution wavefront sensing method to investigate the annular Zernike polynomials behaviour in the indoor convective air turbulence in the presence of a 2D temperature gradient // *Journ. Modern Opt.* 2021. **68**, N 18. P. 994–1001.
21. **Yeganeh M., Rasouli S., Dashti M. et al.** Reconstructing the Poynting vector skew angle and wave-front of optical vortex beams via two-channel moiré deflectometry // *Opt. Lett.* 2013. **38**, Iss. 6. P. 887–889.
22. **Rasouli S., Daemi M. H.** Investigating the dynamic behavior of thermal distortions of the wavefront in a high-power thin-disk laser using the moiré technique // *Opt. Lett.* 2020. **45**, Iss. 16. P. 4567–4570.

Поступила в редакцию 29.10.2021

После доработки 17.12.2021

Принята к публикации 20.12.2021