

СПОСОБ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕАЛЬНОЙ ФОРМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОБРАБОТКИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ

С. Халиль
В.В. Дружин

khalilsabor1998@gmail.com
vlad.druzhin@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Описан способ обработки интерференционных картин с использованием MATLAB и преобразования данных в программное обеспечение Zemax OpticStudio для моделирования свойств реальных поверхностей. Процесс включает в себя генерацию интерференционных картин с помощью встроенных функций MATLAB, преобразование фазовой информации для получения карты поверхности с использованием метода восстановления волнового фронта, расчет коэффициентов полиномов Цернике для дальнейшего анализа. Коэффициенты Цернике были затем импортированы в текстовый файл и импортированы в Zemax OpticStudio для моделирования поверхности. Предложенный метод представляет комплексный подход для обработки и анализа интерференционных картин и может использоваться для высокоточного моделирования оптических систем с учетом ошибок изготовления формы поверхностей элементов, входящих в их состав, таких как оптика и фотоника.

Ключевые слова

Расчет оптических систем, оптических контроль, измерение формы поверхности, обработка интерференционной картины, обратные задачи

Поступила в редакцию 05.06.2023

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

Введение. Моделирование оптических поверхностей, описанных на основе данных, полученных в результате измерений, позволяет учитывать влияние ошибок изготовления на свойства и качество оптической системы. Для контроля формы поверхностей могут быть использованы бесконтактные методы контроля формы [1, 2]. Эти методы имеют следующие преимущества:

– они не вызывают повреждения поверхности, такие как царапины и вмятины;

– подходят для измерения мягких и жидких материалов;

– могут быть легко реализованы в автоматическом режиме.

С целью повышения точности описания формы используются интерференционные методы контроля формы с погрешностью не хуже $\lambda/20 \dots \lambda/30$ (где λ — длина волны источника излучения). [3]. Эти методы могут быть применены для

измерения различных типов оптических поверхностей. Например, интерферометрический синтетический апертурный радар (InSAR) часто используется для наблюдения за деформациями местности [4–6]; шерография и муаровая интерферометрия широко применяются для измерения напряжений и деформаций [7–11]; цифровая голографическая интерферометрия может быть использована для исследования малых образцов, таких как микролинзовые массивы [12] или клетки [13, 14]. Все вышеупомянутые методы основаны на хорошо известном явлении интерференции [3].

В данной статье представлен новый метод обработки интерференционных картины для их моделирования в Zemax OpticStudio. Опишем пошаговый процесс, который включает генерацию интерференционных картин с использованием функции `reaks` в MATLAB, извлечение и распаковку информации о фазе для получения поверхностной карты с помощью метода восстановления волнового фронта (WFR), а также вычисление коэффициентов Цернике для дальнейшего анализа. Коэффициенты Цернике затем экспортируются в файл DAT, который после импортируется в Zemax OpticStudio для моделирования поверхности.

Анализ интерференционных картин с использованием метода оконного преобразования Фурье. Оконное преобразование Фурье (WFT) служит важным инструментом для анализа интерференционных рисунков. Поскольку оно широко используется в последующих главах, его принцип впервые представлен в этом разделе. Спектр WFT [15, 16] интерференционного рисунка $f(x, y)$ может быть описан уравнением

$$Sf(u, v; \zeta_x, \zeta_y) = f(u, v) \otimes g_{\zeta_x, \zeta_y}(x, y), \quad (1)$$

где \otimes — символ свертки; (x, y) и (u, v) — пространственные координаты; ζ_x и ζ_y — координаты частот, соответствующие направлениям x и y соответственно; $Sf(u, v; \zeta_x, \zeta_y)$ — спектр WFT; $g_{\zeta_x, \zeta_y}(x, y)$ — ядро WFT. Ядро WFT может быть представлено как

$$g_{\zeta_x, \zeta_y}(x, y) = g(x, y) \exp(j\zeta_x x + j\zeta_y y);$$

$$g(x, y) = (\pi\sigma_x\sigma_y)^{-1/2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right),$$

где j — мнимая единица; σ_x и σ_y — стандартные отклонения функции Гаусса в направлениях x и y соответственно. Стандартные отклонения контролируют пространственное расширение функции $g(x, y)$, т. е. размер окна. Поскольку фазовые шаблоны являются двухмерными (2D) сигналами, применяются двумерные преобразования (1). Преобразование также может быть расширено на другие измерения [15].

В 2D-оконной фурье-ребенке (WFR2) для пикселя [обозначенного как (u, v)] на фазовом шаблоне, маленький участок вокруг этого пикселя сравнивается с различными ядрами WFT $g_{\zeta_x, \zeta_y}(x, y)$. Ядра WFT генерируются с использованием различных пар частот. Частотная пара (ζ_x, ζ_y) выбирается из $[\zeta_{xl}, \zeta_{xh}] \times [\zeta_{yl}, \zeta_{yh}]$ с интервалами дискретизации ζ_{xi} и ζ_{yi} соответственно. После сравнения каждого ядра имеет соответствующий показатель сходства. Ядро, которое имеет наибольшее сходство, предлагает наивысший показатель сходства. Этот наивысший показатель сходства называется значением гребня пикселя. Очищенная фаза может быть оценена на основе значений гребней. Алгоритм WFR2 описывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \left[\hat{\omega}_x(u, v), \hat{\omega}_y(u, v) \right] &= \arg \max \left| \text{Sf}(u, v; \zeta_x, \zeta_y) \right|; \\ \hat{\phi}_\omega(u, v) &= \angle \text{Sf}(u, v; \hat{\zeta}_x, \hat{\zeta}_y) - \frac{1}{2} \arctg \left[\sigma_x^2 \hat{c}_{xx}(u, v) \right] - \frac{1}{2} \arctg \left[\sigma_y^2 \hat{c}_{yy}(u, v) \right], \end{aligned}$$

где символ \wedge используется для обозначения оценочного значения заданного параметра; ω_x и ω_y — производные фазы; \hat{c}_{xx} и \hat{c}_{yy} — производные второго порядка фазы; а $\hat{\phi}_\omega$ — фаза.

Шумовой сигнал обычно является случайным, поэтому коэффициенты спектра оконного преобразования Фурье очень малы. Если мы отбросим эти маленькие коэффициенты, то шумы также могут быть снижены. В алгоритме 2D WFF (WFF2) отфильтрованный фазовый шаблон $\bar{f}(x, y)$ получается через обратное преобразование WFT (IWFT) и описывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{f}(x, y) &= \frac{1}{4\pi^2} \iint \bar{\text{Sf}}(x, y; \zeta_x, \zeta_y) \otimes g_{\zeta_x, \zeta_y}(x, y) d\zeta_x d\zeta_y, \quad (2) \\ \bar{\text{Sf}}(x, y; \zeta_x, \zeta_y) &= \begin{cases} \text{Sf}(x, y; \zeta_x, \zeta_y) & \left| \text{Sf}(x, y; \zeta_x, \zeta_y) \right| \geq \text{порог}; \\ 0 & \left| \text{Sf}(x, y; \zeta_x, \zeta_y) \right| \leq \text{порог}, \end{cases} \end{aligned}$$

где $\bar{\text{Sf}}(x, y; \zeta_x, \zeta_y)$ — отфильтрованный спектр. Основная часть алгоритма WFF2 заключается в вычислении $\bar{\text{Sf}}(x, y; \zeta_x, \zeta_y)$ для каждой комбинации ζ_x и ζ_y , выбранных из $[\zeta_{xl}, \zeta_{xh}] \times [\zeta_{yl}, \zeta_{yh}]$. Пороговый спектр можно использовать для восстановления в уравнении (2).

Описание способа моделирования. В данном исследовании мы использовали программное обеспечение MATLAB для генерации синтетических интерференционных картин и извлечения карты поверхности. Мы также использовали графический процессор (GPU), чтобы ускорить вычисления.

Для создания интерференционных картин были использованы следующие шаги в MATLAB:

– моделирование объекта: использовали встроенную функцию `peaks` в MATLAB для генерации 2D-поверхности. Эта функция создает поверхность с серией пиков и впадин, которые можно настроить для симуляции различных топографий поверхности;

– генерация интерференционных картин: получили интерференционную картину (рис. 1) между поверхностью объекта и опорной плоскостью, используя формулу дифракции Френеля — Кирхгофа. Это включало в себя симуляцию распространения лазерного луча от источника к объекту и опорной плоскости, а затем вычисление интенсивности интерференционной картинки;

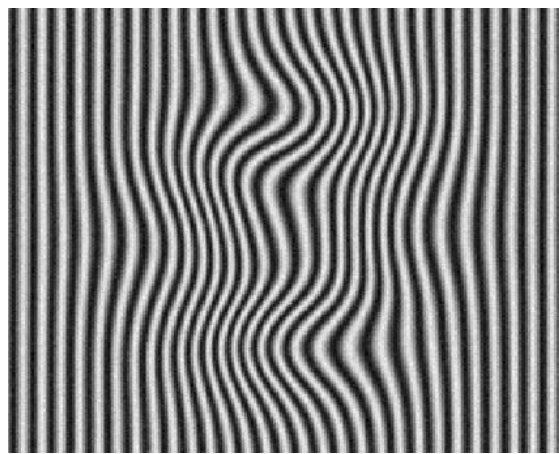


Рис. 1. Интерференционные образцы, сгенерированные с использованием MATLAB

– метод WFR2: это подход на основе двумерного преобразования Фурье, который может быть использован для извлечения информации о фазе из интерферограмм. Алгоритм содержит несколько шагов, включая:

1) вычитание фона: этот шаг включает удаление любого фонового шума или сигнала, который может присутствовать в интерферограмме;

2) оконную функцию: на этом шаге к интерферограмме применяется оконная функция для уменьшения эффектов краевых артефактов и улучшения точности преобразования Фурье;

3) преобразование Фурье: интерферограмма преобразуется из пространственного домена в частотный домен с использованием двумерного преобразования Фурье;

4) фильтрацию: преобразованная интерферограмма фильтруется для удаления нежелательного шума или сигнала;

5) обратное преобразование Фурье: отфильтрованная интерферограмма преобразуется обратно в пространственный домен с использованием обратного преобразования Фурье (рис. 2);

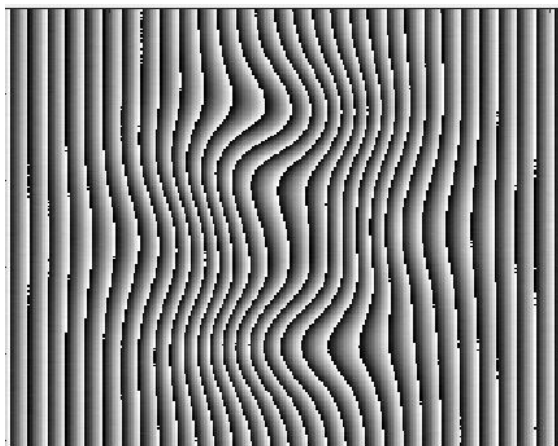


Рис. 2. Карта завернутой фазы

– распаковка фазы: распаковали фазу интерференционных картин, чтобы получить непрерывную карту фазы. Это было сделано с помощью алгоритма распаковки фазы на основе качества, реализованного в MATLAB, на этом шаге информация о фазе извлекается из отфильтрованной интерферограммы путем распаковки значений фазы для удаления любых разрывов;

– восстановление поверхности: использовали карту фазы для восстановления 3D-поверхности объекта с помощью формулы преобразования высоты в фазу (рис. 3, 4). Это включало калибровку системы и использование известной оптической разности хода и длины волны лазера;

– после получения трехмерной распакованной карты фазы первым шагом является предварительная обработка данных для удаления шумов и артефактов. Она может включать фильтрацию данных с помощью методов, таких как гауссова или медианная фильтрация, или применение алгоритмов обнаружения границ для удаления нежелательных особенностей в данных.

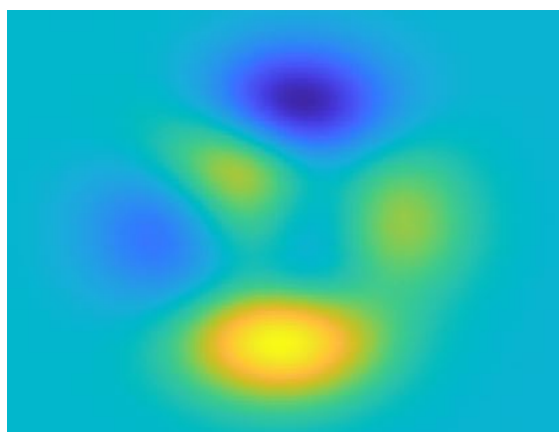


Рис. 3. Распакованная карта фазы

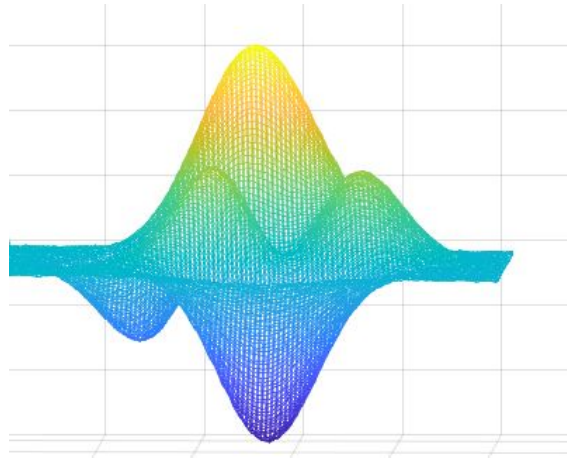


Рис. 4. 3D-профиль распакованной карты фазы

После предварительной обработки данных следующим шагом является выбор подходящего порядка для многочленов Цернике. Порядок многочленов определяет сложность поверхностных особенностей, которые могут быть представлены, причем более высокие порядки могут захватывать более сложные особенности. Однако использование более высоких порядков также требует большего объема вычислительных ресурсов и может быть более чувствительным к шуму.

В MATLAB можно использовать функцию `zernikefit` для нахождения коэффициентов Цернике. Эта функция принимает предварительно обработанную трехмерную распакованную карту фазы в качестве входных данных, а также желаемый порядок многочленов Цернике. Затем функция подгоняет данные к набору многочленов и возвращает коэффициенты, которые описывают поверхностные свойства объекта. Важно отметить, что точность коэффициентов Цернике зависит от качества входных данных и выбранного порядка многочленов. Неточности в данных или шум могут привести к ошибкам в коэффициентах, поэтому важно тщательно предварительно обрабатывать данные и выбирать подходящий порядок многочленов.

После получения коэффициентов Цернике их можно применять для анализа поверхностных свойств объекта. Например, коэффициенты могут быть использованы для характеристики формы оптического элемента или волнового фронта лазерного луча. Их также можно использовать для сравнения поверхностей разных объектов или для мониторинга изменений в поверхностных свойствах со временем. На рис. 5 представлена диаграмма, которую можно применять для визуализации относительных величин коэффициентов полиномов Zernike и выявления доминирующих коэффициентов описания формы поверхности. На этом графике по оси x обычно размещают номера или индексы соответствующих Zernike-мод, а по оси y — значения коэффициентов. Столбцы

на графике обычно различной цветовой гаммы или помечены, чтобы облегчить различение между различными Zernike-модами.

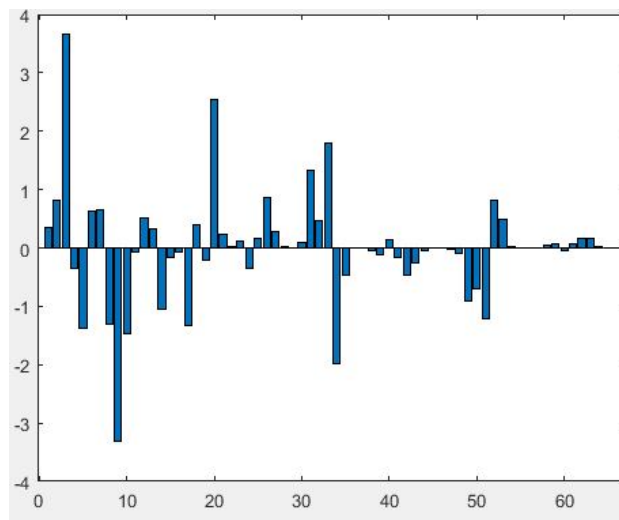


Рис. 5. График со столбцами Zernike-коэффициентов

В области оптики распространенной практикой является использование Zernike-полиномов для описания поверхности оптического элемента. Zernike-коэффициенты вычисляются путем аппроксимации измеренных данных поверхности набором ортогональных полиномов, которые нормализованы на единичном круге. После получения Zernike-коэффициентов необходимо проверить их точность, восстановив исходную поверхность, используя эти коэффициенты. Для проверки правильности Zernike-коэффициентов была выполнена восстановление поверхностной карты с использованием этих коэффициентов. Восстановленная поверхностная карта (рис. 6) была сравнена с исходной, и было обнаружено, что они идентичны. Это свидетельствует о том, что Zernike-коэффициенты точно представляют поверхность оптического элемента, а процесс аппроксимации был успешным в выявлении соответствующих особенностей поверхности. Этот тип проверки важен для обеспечения надежности и точности Zernike-коэффициентов, которые критически важны для проектирования и оптимизации оптических систем. Кроме того, этот процесс может помочь выявить любые ошибки или расхождения в процессе измерения или аппроксимации, что позволяет внести улучшения в будущих анализах. В целом проверка точности Zernike-коэффициентов через восстановление поверхностной карты является важным шагом в анализе оптических поверхностей.

После расчета коэффициентов Цернике из интерференционных картин, мы экспортировали их в файл DAT в MATLAB и импортировали их в Zemax OpticStudio для моделирования поверхности. Коэффициенты Цернике использовались для моделирования поверхности оптического элемента в Zemax

OpticStudio, что позволило нам моделировать характеристики оптической системы при различных условиях. Этот подход позволил моделировать эффекты искажений и aberrаций поверхности на характеристики оптической системы в высокоточном и гибком режиме. Изменяя коэффициенты Цернике, мы смогли моделировать различные типы и степени искажений поверхности и оценить их влияние на оптические характеристики системы.

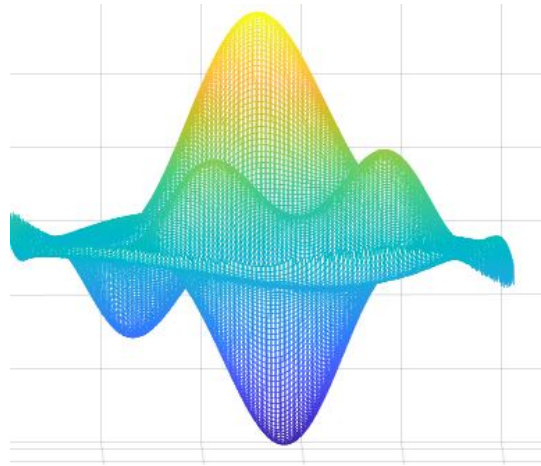


Рис. 6. Восстановленная поверхностная карта с использованием Zernike-коэффициентов

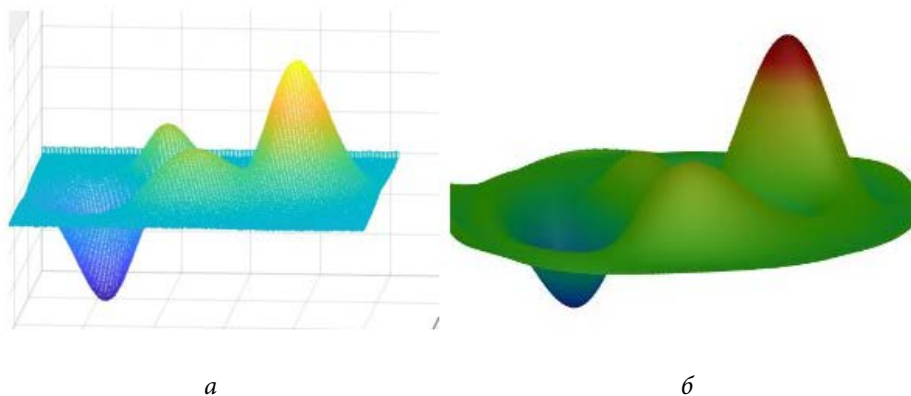


Рис. 7. 3D-карта поверхности:
a — MATLAB; *б* — Zemax

Возможность импорта коэффициентов Цернике из MATLAB в Zemax OpticStudio для моделирования поверхности является мощным инструментом для исследователей и практиков в области оптики и фотоники. Он позволяет выполнять высокоточное и настраиваемое моделирование оптических систем и может использоваться в широком диапазоне приложений, от проектирования линз до формирования лазерного луча и далее. На рис. 7 представлено сравнение ис-

ходной поверхности, заданной в MATLAB (а) и картой этой же поверхности, полученной в Zemax OpticStudio (б) в результате применения описанной методики.

В целом примененный нами подход продемонстрировал эффективность и гибкость коэффициентов Цернике для моделирования и анализа сложных оптических систем и подчеркивает потенциал для дальнейших исследований и развития в этой области.

Заключение. В данном исследовании продемонстрирован надежный и эффективный метод анализа и моделирования оптических систем с использованием коэффициентов полиномов Цернике. Используя возможности MATLAB для генерации интерференционных картин и метод WFR для разворачивания фазы, мы смогли точно восстановить карту поверхности изучаемой оптической системы. Коэффициенты Цернике, полученные из карты поверхности, обеспечили компактное и ортогональное представление aberrаций волнового фронта в системе. Эти коэффициенты были экспортированы в формат DAT, позволяющий без проблем интегрировать их с Zemax, мощным программным обеспечением для оптического проектирования. Платформа Zemax облегчила оценку производительности оптической системы и позволила нам внести необходимые изменения для улучшения характеристик системы. Методология, представленная в данной статье, может быть широко применена для анализа и оптимизации различных оптических систем. Интеграция MATLAB, метода WFR и Zemax OpticStudio представляет эффективный способ моделирования оптических свойств оптических поверхностей с учетом ошибок изготовления их формы.

Литература

- [1] Harding K. *Handbook of optical dimensional metrology*. CRC Press, 2013, 492 p.
- [2] Peiponen K.E., Myllylä R., Priezhev A.V. *Optical measurement techniques: innovations for industry and the life sciences*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, 155 p.
- [3] Hariharan P. *Basics of interferometry*. Elsevier, 2010, 248 p.
- [4] Wright T.J., Lu Z., Wicks C. Source model for the Mw 6.7, 23 October 2002, Nenana mountain earthquake (Alaska) from InSAR. *Geophysical research letters*, 2003, vol. 30, no. 18. <http://doi.org/10.1029/2003GL018014>
- [5] Wright T.J., Parsons B.E., Lu Z. Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. *Geophysical research letters*, 2004, vol. 31, no. 1. <http://doi.org/10.1029/2003GL018827>
- [6] Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical research letters*, 2004, vol. 31, no. 23. <http://doi.org/10.1029/2004GL021737>
- [7] Hung Y.Y. Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing. *Optical engineering*, 1982, vol. 21, no. 3. <https://doi.org/10.1117/12.7972920>
- [8] Hung Y.Y. Shearography for non-destructive evaluation of composite structures. *Optics and lasers in engineering*, 1996, vol. 24, pp. 161–182.

- [9] Hung Y.Y., Chen Y.S., Ng S.P. et al. Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2009, vol. 64, no. 5–6, pp. 73–112. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2008.11.001>
- [10] Han B., Guo Y. Thermal deformation analysis of various electronic packaging products by moiré and microscopic moiré interferometry. *Journal of Electronic Packaging*, 1995, vol. 117, pp. 185–191. <https://doi.org/10.1115/1.2792090>
- [11] Post D., Han B., Ifju P. *High sensitivity moiré: experimental analysis for mechanics and materials*. Springer Science & Business Media, 1997, 444 p.
- [12] Charrière F., Kühn J., Colomb T., Montfort F., Cuhe E., Emery Y., Weible K., Marquet P., Depeursinge C. Characterization of microlenses by digital holographic microscopy. *Applied Optics*, 2006, vol. 45, no. 5, pp. 829–835.
- [13] Mann C.J., Yu L., Lo C.M., Kim M.K. High-resolution quantitative phase-contrast microscopy by digital holography. *Optics Express*, 2005, vol. 13, no. 22, pp. 8693–8698. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.008693>
- [14] Marquet P., Rappaz B., Magistretti P.J. et al. Digital holographic microscopy: a noninvasive contrast imaging technique allowing quantitative visualization of living cells with subwavelength axial accuracy. *Optics letters*, 2005, vol. 30, no. 5, pp. 468–470.
- [15] Kemaq Q. *Windowed fringe pattern analysis*. 2013, 300 p. <https://doi.org/10.1117/3.1002080>
- [16] Kemaq Q. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: principles, applications and implementations. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, vol. 45, no. 2, pp. 304–317. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2005.10.012>

Халиль Сабур — студент магистратуры кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация. SPIN-код: 4627-6390, Author ID: 798725

Дружин Владислав Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Халиль С., Дружин В.В. Способ моделирования реальной формы оптической поверхности по результатам обработки интерференционной картины. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 07 (84). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-7-920>

METHOD FOR SIMULATING THE OPTICAL SURFACE REAL SHAPE BASED ON RESULTS OF PROCESSING THE INTERFERENCE PATTERN

S. Khalil

khalilsabor1998@gmail.com

V.V. Druzhin

vlad.druzhin@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper describes a method for processing the interference patterns using the MATLAB and data conversion into the Zemax OpticStudio software to simulate the real surface properties. The process includes interference patterns generation using the built-in MATLAB functions, transforming phase information to obtain a surface map using the wave-front reconstruction method and calculating the Zernike polynomial coefficients for further analysis. The Zernike coefficients were imported into a text file and then imported into the Zemax OpticStudio for surface simulation. The proposed method provides a comprehensive approach for processing and analyzing the interference patterns and could be used in high-precision simulation of the optical systems taking into account errors in manufacturing shapes of their constituent elements' surfaces, such as optics and photonics.

Keywords

Optical system calculation, optical control, surface shape measurement, interference pattern processing, inverse problems

Received 05.06.2023

© Bauman Moscow State Technical University, 2023

References

- [1] Harding K. *Handbook of optical dimensional metrology*. CRC Press, 2013, 492 p.
- [2] Peiponen K.E., Myllylä R., Priezhev A.V. *Optical measurement techniques: innovations for industry and the life sciences*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, 155 p.
- [3] Hariharan P. *Basics of interferometry*. Elsevier, 2010, 248 p.
- [4] Wright T.J., Lu Z., Wicks C. Source model for the Mw 6.7, 23 October 2002, Nenana mountain earthquake (Alaska) from InSAR. *Geophysical research letters*, 2003, vol. 30 no. 18. <http://doi.org/10.1029/2003GL018014>
- [5] Wright T.J., Parsons B.E., Lu Z. Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. *Geophysical research letters*, 2004, vol. 31, no. 1. <http://doi.org/10.1029/2003GL018827>
- [6] Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical research letters*, 2004, vol. 31, no. 23. <http://doi.org/10.1029/2004GL021737>
- [7] Hung Y.Y. Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing. *Optical engineering*, 1982, vol. 21, no. 3. <https://doi.org/10.1117/12.7972920>

- [8] Hung Y.Y. Shearography for non-destructive evaluation of composite structures. *Optics and lasers in engineering*, 1996, vol. 24, pp. 161–182.
- [9] Hung Y.Y., Chen Y.S., Ng S.P. et al. Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2009, vol. 64, no. 5–6, pp. 73–112. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2008.11.001>
- [10] Han B., Guo Y. Thermal deformation analysis of various electronic packaging products by moiré and microscopic moiré interferometry. *Journal of Electronic Packaging*, 1995, vol. 117, pp. 185–191. <https://doi.org/10.1115/1.2792090>
- [11] Post D., Han B., Ifju P. *High sensitivity moiré: experimental analysis for mechanics and materials*. Springer Science & Business Media, 1997, 444 p.
- [12] Charrière F., Kühn J., Colomb T., Montfort F., Cuhe E., Emery Y., Weible K., Marquet P., Depeursinge C. Characterization of microlenses by digital holographic microscopy. *Applied Optics*, 2006, vol. 45, no. 5, pp. 829–835.
- [13] Mann C.J., Yu L., Lo C.M., Kim M.K. High-resolution quantitative phase-contrast microscopy by digital holography. *Optics Express*, 2005, vol. 13, no. 22, pp. 8693–8698. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.008693>
- [14] Marquet P., Rappaz B., Magistretti P.J. et al. Digital holographic microscopy: a noninvasive contrast imaging technique allowing quantitative visualization of living cells with subwavelength axial accuracy. *Optics letters*, 2005, vol. 30, no. 5, pp. 468–470.
- [15] Kemaq Q. *Windowed fringe pattern analysis*. 2013, 300 p. <https://doi.org/10.1117/3.1002080>
- [16] Kemaq Q. Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: principles, applications and implementations. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, vol. 45, no. 2, pp. 304–317. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2005.10.012>

Khalil S. — Master's Program Student, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Druzhin V.V. — Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Khalil S., Druzhin V.V. Method for simulating the optical surface real shape based on results of processing the interference pattern. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 07 (84). (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-7-920>