

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА НА АПЕРТУРАХ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИНОМОВ ЦЕРНИКЕ

Лезов Е.М. (ИТМО)

Научный руководитель – к.т.н., Иванова Т. В. (ИТМО)

Введение. Современная высокоточная техника требует использования оптических компонентов большого размера. Крупногабаритная оптика становится неотъемлемой частью, к примеру, телескопических систем, поскольку позволяет обеспечить нужное пространственное разрешение, светосилу и энергетическую эффективность. Однако по мере роста размеров и усложнения геометрии оптических поверхностей усложняется и задача их контроля. Особенно остро эта проблема проявляется при изготовлении деталей неправильной формы. Тогда как большинство классических методов, например разложение волнового фронта в ряд по полиномам Цернике опираются на апертуру круглой формы, реальная оптическая деталь может иметь прямоугольную, сегментированную или свободную форму. Такой переход от круговой к произвольной области приводит к методическим затруднениям и необходимости использовать специализированные подходы.

Полиномы Цернике, являясь ортонормальными на круге, теряют это свойство при использовании на других областях. Это не только приводит к математической некорректности, но и искажает интерпретацию результатов: коэффициенты перестают напрямую соответствовать классическим аберрациям.

Практически ориентированным направлением работы является изучение алгоритмов программной обработки коэффициентов полиномов Цернике, обеспечивающих переход от представления поверхности на круговой области к описанию на области произвольной формы и обратно. Такой подход рассматривается как основа для подготовки измеренных данных к использованию в средах оптического проектирования, в частности в Zemax.

Основная часть. Полиномы Цернике применяются в качестве инструментов описания волновых фронтов и оптических поверхностей. Удобство их применения связано с тем, что они образуют ортогональный базис на единичном круге и имеют наглядную физическую интерпретацию. Отдельные члены соответствуют наклонам, дефокусировке, астигматизму, коме и другим классическим аберрациям. Поэтому такое разложение широко используется как в теории аберраций, так и в интерферометрической метрологии и анализе данных волнового фронта.

Полиномы Цернике широко применяются при описании волнового фронта в оптических системах. Их распространённость связана с тем, что они образуют ортогональную систему функций на круговой области единичного радиуса. Это делает их удобными для анализа аберраций в системах, где зрачок имеет круглую форму, что часто соответствует реальной геометрии апертуры в классической оптике. Благодаря ортогональности коэффициенты разложения оказываются независимыми друг от друга, и вклад каждого полинома в общую форму волнового фронта можно рассматривать отдельно.

В рамках работы был рассмотрен программный модуль, реализованный на языке C++, предназначенный для преобразования коэффициентов полиномов Цернике при переходе от круговой апертуры к области произвольной формы. Необходимость такой обработки обусловлена тем, что стандартные данные, полученные Zemax, как правило, заданы в виде коэффициентов Цернике, определённых на круге единичного радиуса, тогда как реальная измеряемая деталь может иметь некруглую форму.

Исходными данными служат коэффициенты полиномов, экспортированные из Zemax в текстовом формате. Геометрия апертуры задаётся в виде многоугольника, определяемого координатами его вершин, причём предполагается, что этот многоугольник вписан в окружность единичного радиуса. Для численного описания области формируется дискретная выборка точек, принадлежащих внутренней части многоугольника; в этих точках выполняются вычисления значений базисных функций и волнового фронта. Результатом

работы программы является текстовый файл с обновлённым набором коэффициентов, совместимый с форматом импорта в Zemax.

Выводы. В работе изучена возможность применения программного модуля на C++ для решения задачи адаптации коэффициентов Цернике от круговой апертуры к области произвольной формы. Модуль, работающий с экспортированными из Zemax коэффициентами Цернике и геометрией целевой области в виде вписанного многоугольника, выполняет выборку точек и пересчёт волнового фронта. В результате формируется скорректированный набор коэффициентов, пригодный для импорта в Zemax, что позволяет корректно описывать реальные детали с некруговой апертурой.

Список использованных источников:

1. Dai G.M. Orthonormal polynomials in a unit circle and their applications in wavefront analysis // *Applied Optics*. 1994. Vol. 33, № 10. P. 1832–1837. DOI: 10.1364/AO.33.001832.
2. Wang D., Silva D.E., Rolland J.P. General method for representing wavefront aberration data using orthonormal polynomials on various aperture shapes // *Journal of the Optical Society of America A*. 2007. Vol. 24, № 10. P. 2994–3007. DOI: 10.1364/JOSAA.24.002994.
3. de Groot P., Deck L. Stitching interferometric measurement data for inspection of large optical components // *Optical Engineering*. 2002. Vol. 41, № 1. P. 86–95. DOI: 10.1117/1.1430727.
4. Lundström L., Unsbo P. Transformation of Zernike coefficients: scaled, translated, and rotated wavefronts with circular and elliptical pupils // *Applied Optics*. 2018. Vol. 57, № 34. P. F22–F30. DOI: 10.1364/AO.57.000F22.
5. Mahajan V.N. Zernike annular polynomials for imaging systems with annular pupils // *Journal of the Optical Society of America A*. 2003. Vol. 20, № 2. P. 209–219. DOI: 10.1364/JOSAA.20.000209.
6. Correcting retrace and system imaging errors to achieve nanometer accuracy in full aperture, single-shot Fizeau interferometry / K. Morrow [et al.] // *Optics Express*. 2023. Vol. 31, iss. 17. P. 27654-27666. DOI: 10.1364/OE.498043