

ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 53.082.5

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАТЧИКОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

© 2023 г. Ю. С. Гудин¹, К. П. Оленин¹, В. О. Шатилов¹, М. С. Спирин^{1,*}

¹Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

*E-mail: era_otd2@mil.ru

Поступила в редакцию 09.10.2023 г.

После доработки 09.10.2023 г.

Принята к публикации 10.11.2023 г.

Рассмотрены свойства и принципы действия датчиков волнового фронта. Описаны сильные и слабые стороны датчика Шака–Гартмана и голографического датчика волнового фронта.

DOI: 10.56304/S2782375X2304006X

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире оптические системы применяются во всех областях науки и техники. Устройства, где используется лазер, окружают нас повсеместно, начиная от лазерного гироскопа в смартфоне и лидара в машине, заканчивая лазерными навигационными системами в подводных лодках и крылатых ракетах.

В оптике и оптической технике важными аспектами являются формирование и обеспечение высокого качества волнового фронта. Распространяясь в пространстве, свет претерпевает различные воздействия, вследствие чего волновой фронт искажается. Например, в астрономии волновой фронт от звезд и прочих объектов, проходя через атмосферу, искажается из-за воздействия турбулентности, что приводит к размытию изображения [1]. Решением данной проблемы занимается адаптивная оптика, основной целью которой является компенсация негативных эффектов с помощью активного управления фазовым или амплитудно-фазовым профилем оптических полей.

В настоящее время адаптивная оптика активно используется в военной сфере. Например, системы корректировки лазерного излучения широко используются в лазерном оружии для увеличения эффективности стрельбы, позволяя, не увеличивая мощность и размеры лазера, способствовать повышению точности попадания в цель наиболее полного количества лазерной энергии.

Основной частью любой адаптивной оптической системы является датчик волнового фронта (ДВФ). Данный прибор измеряет отклонение формы волнового фронта и передает информацию на обрабатываемое устройство. Существует большое количество датчиков волнового фронта,

в данной работе описаны два вида датчиков, а также отмечены их преимущества и недостатки.

ДАТЧИК ШАКА–ГАРТМАНА

Самым распространенным датчиком волнового фронта благодаря простоте устройства является датчик Шака–Гартмана. Его принцип действия, представленный на рис. 1, достаточно прост. В датчике установлен массив линз, которые разделяют падающий на них волновой фронт на множество маленьких пучков, после чего они фиксируются на ПЗС-камеру, расположенную в фокальной плоскости линз [2].

При попадании плоского волнового фронта линзы фокусируют пучки в точку своего фокуса, а в противном случае, если в волновом фронте присутствуют какие-либо искажения, фокусирующий луч будет смещаться. Тогда, измеряя смещения пятен, можно получить локальные наклоны искаженного волнового фронта $\varphi(x,y)$ в центре каждой субапертуры:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial x} &= \frac{s_x^k}{f}, \\ \frac{\partial \varphi(x_k, y_k)}{\partial y} &= \frac{s_y^k}{f}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$k = 1, \dots, N_k,$$

где f – фокусное расстояние микролинзы, N_k – число фокальных пятен на гартманограмме.

Таким образом, можно найти локальный наклон волнового фронта, который пропорционален смещению фокального пятна, которое находится экспериментально:

$$S_x^k = x_k^0 - x_k, \quad S_y^k = y_k^0 - y_k, \quad (2)$$

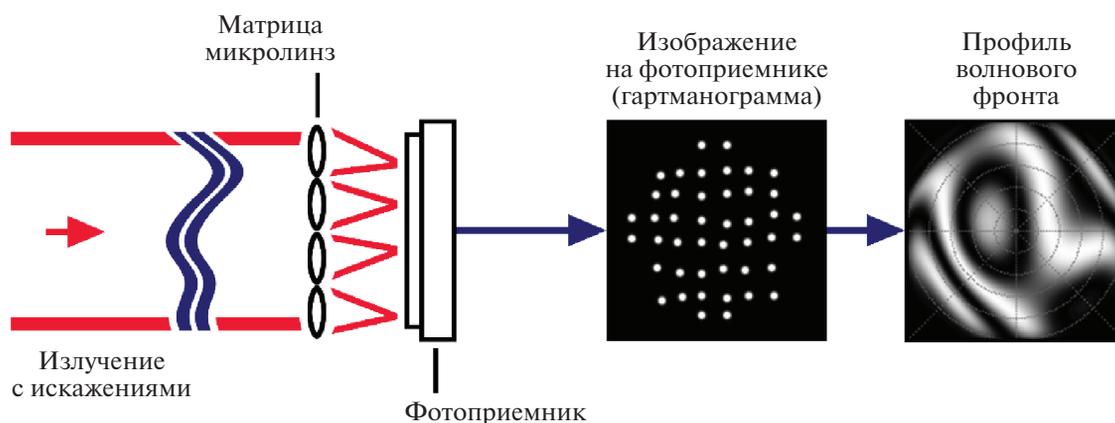


Рис. 1. Принцип действия датчика Шака–Гартмана.

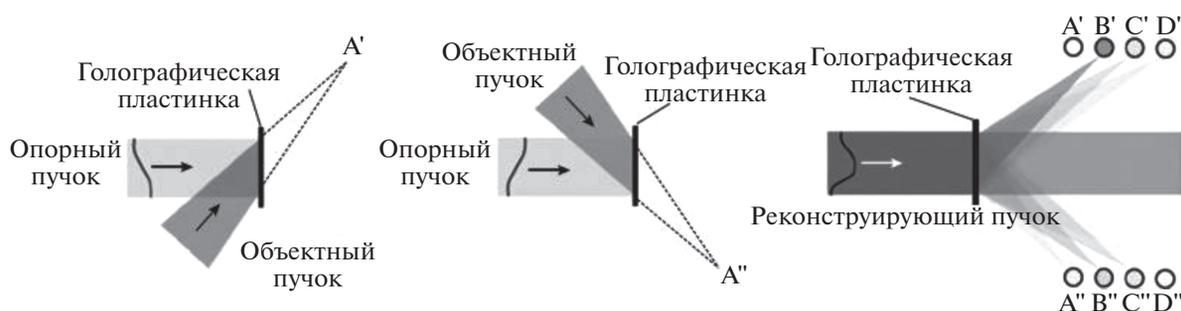


Рис. 2. Пример записи информации на голограмму и процесс воспроизведения.

где x_k^0, y_k^0 — центр k -го фокального пятна для плоского волнового фронта.

Зная фокусное расстояние линзы, можно определить наклон волнового фронта в определенном сечении пучка. Далее с помощью ЭВМ моделируется общий профиль волнового фронта, после чего информация о всех искажениях передается на корректоры волнового фронта.

Рассматриваемый датчик имеет ряд существенных недостатков, которые ограничивают сферы его применения. Приведем два основных недостатка датчика Шака–Гартмана:

- сложность вычислений. При попадании на него волнового фронта с высокочастотными атмосферными искажениями требуются мощные ЭВМ, так как необходимо обрабатывать гигабайты информации в секунду, что сильно влияет на быстродействие системы;

- помехи на ПЗС-матрицах. При попадании сильно искаженного волнового фронта на ПЗС-матрицу фокусирующийся луч ввиду сильного смещения может попасть на соседнюю матрицу, создавая при этом ложное пятно.

В заключение можно сказать, что ДВФ Шака–Гартмана является проверенным, компакт-

ным и простым в использовании средством анализа волнового фронта. Однако из-за большого количества вычислений он весьма ограничен в быстродействии.

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ВОЛНОВОГО ФРОНТА

В последнее время бурное развитие получили датчики волнового фронта, основанные на голографии, которые способны обрабатывать информацию с большой частотой обновления, помехоустойчивы и не требуют больших вычислительных мощностей.

Принцип действия голографических датчиков волнового фронта основан на использовании метода голографического мультиплексирования, т.е. записи на разные участки голограммы различных аберраций. В данной работе не будем рассматривать фундаментальные уравнения и свойства голографии. Достаточно обозначить лишь то, что голограмма способна записывать амплитуду, интенсивность и фазу световой волны и воспроизводить ее. Благодаря этому свойству на голограмму можно записать набор различных абер-

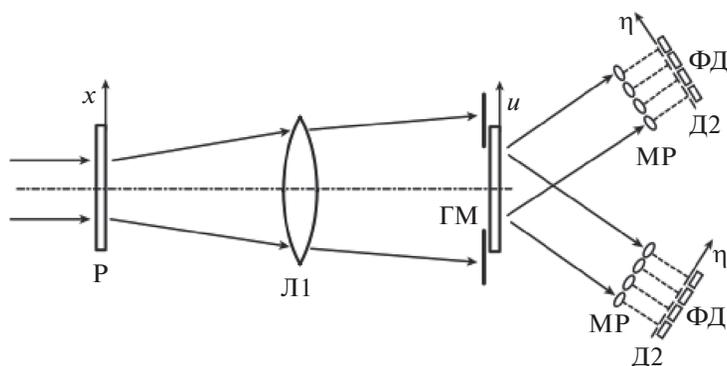


Рис. 3. Схема датчика волнового фронта, основанного на методе голографии: Р – рассеиватель, Л1 – линза, ГМ – голограмма, МР – растр микролинз, ФД – фотодетекторы.

раций. Одна из схем записи и восстановления светового пучка представлена на рис. 2.

Схема датчика волнового фронта на основе голографии представлена на рис. 3. Волновой фронт попадает на рассеиватель Р, после чего рассеянный свет, проходя через объектив, попадает на голографический мультиплекс (где записан набор различных aberrаций), если в исследуемой волне есть искажения, то голограмма восстанавливает объектную волну, которая, проходя через линзовый растр и диафрагмы (необходимые для избавления от перекрестного шума), попадает на регистрирующий фотоприемник [3].

Метод голографии позволяет повысить быстродействие датчика и избавиться от сложных расчетов, но при этом возникает проблема, связанная с кросс-модуляционными помехами, которые возникают при записи большого количества aberrационных мод на голограмму. Эту проблему возможно решить путем оптимизации дизайна голограммы, размеров апертур и расположения фотодетекторов, но данные изменения повлекут за собой понижение чувствительности датчика, поэтому необходимо грамотно подходить к задаче оптимизации данного датчика.

ВЫВОДЫ

В работе кратко описаны два датчика волнового фронта, основанные на разных подходах: датчик Шака–Гартмана и голографический датчик волнового фронта. Рассмотрены положительные и отрицательные стороны каждого из них. Исследование и улучшения данных датчиков являются перспективной задачей в настоящее время. С каждым годом все больше и больше оружия создается с помощью лазерной техники и данные адаптивные системы позволяют повышать качество и мощность лазерного излучения. Например, компания “Boeing” уже использует данные системы для лазерного оружия для устранения атмосферных помех и улучшения точности лазерного оружия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолаева Е.В., Зверев В.А., Филатов А.А. Адаптивная оптика. СПб: НИУ ИТМО, 2012. 297 с.
2. Ботьбасова Л.А., Лукин В.П. Адаптивная оптика. Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2021. 70 с.
3. Венедиктов В.Ю., Горелая А.В., Красин Г.К. и др. // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 7. С. 614.