

УДК 535.31.593

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОКУСИРОВКИ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА, РАССЕЯННОГО АЭРОЗОЛЕМ, С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

***И.В. Галактионов, А.В. Кудряшов, А.Н. Никитин,
А.Л. Рукосуев, Г.Н. Мар, Ю.В. Шелдакова***

ИДГ РАН

Разработана экспериментальная установка для фокусировки лазерного пучка сквозь стеклянную кювету с рассеивающей суспензией полистироловых микросфер диаметром 1 мкм. В качестве адаптивного элемента применялось биморфное зеркало, а в качестве устройств обратной связи – датчик Шака-Гартмана и ПЗС-камера для анализа фокального пятна в дальней зоне.

DOI

Введение

Рассеивающая среда отличается явно выраженной оптической неоднородностью из-за присутствия примесей частиц с отличающимся показателем преломления (атмосферный аэрозоль, дымка, туман). Часть энергии лазерного излучения поглощается, а часть перераспределяется в пространстве, что, с одной стороны, делает очертания объектов размытыми, а с другой – препятствует фокусировке излучения. Для задач увеличения дальности распространения излучения и передачи информации по оптическим каналам связи решение этой проблемы имеет большую важность [Mosk, 2012; Vellekoop, 2007].

В работе продемонстрирована возможность увеличения эффективности фокусировки лазерного пучка, распространяющегося сквозь рассеивающий аэрозоль, с использованием биморфного адаптивного зеркала с 48 управляющими электродами. На первых этапах работы была реализована модель транспортировки лазерного пучка сквозь рассеивающий слой, а также алгоритм регистрации распределения интенсивности прошедшего излучения на субпертурах датчика Шака-Гартмана

[Sheldakova, 2016]. Были выполнены численные оценки по эффективности фокусировки лазерного пучка сквозь рассеивающий слой [Галактионов, 2016].

Экспериментальная адаптивная система состояла из биморфного зеркала, датчика Шака-Гартмана для анализа искажений лазерного пучка [Галактионов, 2015] и ПЗС-камеры для анализа распределения интенсивности и размера фокального пятна в дальней зоне. Управление адаптивным зеркалом осуществлялось при помощи двух методов: минимизации смещений фокальных пятен на датчике Шака-Гартмана [Галактионов, 2017] и оптимизации фокуса алгоритмом «восхождения на холм» по интенсивности фокального пятна в дальней зоне [Sheldakova, 2010].

Адаптивный корректор

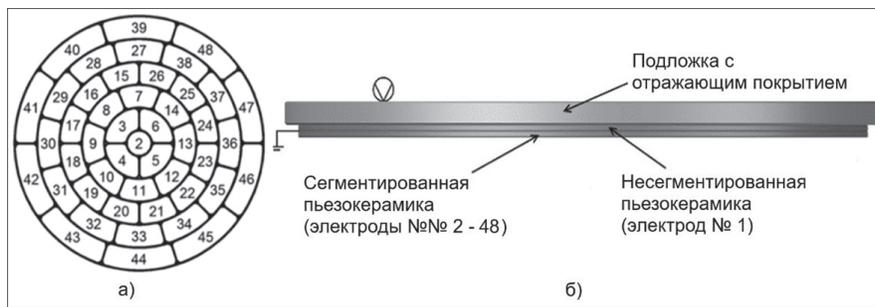


Рис. 1. Нумерация электродов (а) и схема биморфного зеркала (б)

В качестве адаптивного фокусирующего элемента в экспериментальной установке применялось биморфное адаптивное зеркало (рис. 1) [Samarkin, 2002; Kudryashov, 2001]. Световая апертура зеркала составляла 50 мм, амплитуда деформации поверхности ± 20 микрон, зеркало имело 48 электродов, на которые подавались напряжения в диапазоне от -300 В до $+300$ В.

Фокусировка лазерного пучка. Используемые методики

Минимизация смещений фокальных пятен на датчике Шака-Гартмана с использованием функций отклика биморфного зеркала – применялся алгоритм, описанный в [Kudryashov, 2012]. Формула (1) представляет функционал, который необходимо было минимизировать.

$$S_k = \left| \begin{matrix} \Delta x_k \\ \Delta y_k \end{matrix} \right| = \sum_{j=1}^N u_j \cdot b_j(x_k, y_k) \rightarrow MIN, \quad (1)$$

где Δx_k – смещение k -го фокального пятна вдоль оси X, Δy_k – смещение k -го фокального пятна вдоль оси Y, N – количество электродов, u_j – напряжение на j -м электроде, $b_j(x_k, y_k)$ – функция отклика j -го электрода.

Оптимизация фокуса алгоритмом «восхождения на холм» по фокальному пятну в дальней зоне [Sheldakova, 2004]. Этот алгоритм максимизирует яркость

фокального пятна (формула (2)) в дальней зоне, а также оптимизирует его диаметр.

$$\frac{1}{MaxIntens} \cdot (D_x + D_y) \cdot \max(D_x, D_y) \rightarrow MIN, \quad (2)$$

где D_x – диаметр фокального пятна на ПЗС-камере вдоль оси X, D_y – диаметр фокального пятна на ПЗС-камере вдоль оси Y, $MaxIntens$ – максимальный уровень яркости в фокальном пятне.



Рис. 2. Фотография экспериментальной установки для фокусировки рассеянного лазерного пучка

Экспериментальная установка

После проведения теоретических расчётов и численных оценок по возможности фокусировки рассеянного лазерного пучка была разработана и собрана экспериментальная установка (рис. 2). Коллимированный лазерный пучок с длиной волны 0.65 мкм падал на стеклянную кювету толщиной 5 мм, заполненную суспензией полистироловых микросфер в дистиллированной воде. Рассеянный пучок, прошедший сквозь кювету, попадал на 48-электродное биморфное зеркало, после отражения от которого падал на светоделительную пластину. 20% мощности пучка ответвлялось на датчик Шака-Гартмана, 80% – на ПЗС-камеру с микро-объективом с 20-кратным увеличением.

Результаты фокусировки рассеянного лазерного пучка

После начальной оптимизации системы, выполняемой с эталонным плоским зеркалом, найденный набор напряжений U , соответствующих лучшему фокальному пятну, сохранялся в качестве опорного для данной установки в отсутствие рассеивающей среды. Также в качестве опорной использовалась полученная при этом гартманограмма на датчике Шака-Гартмана. Иными словами, если в оптический

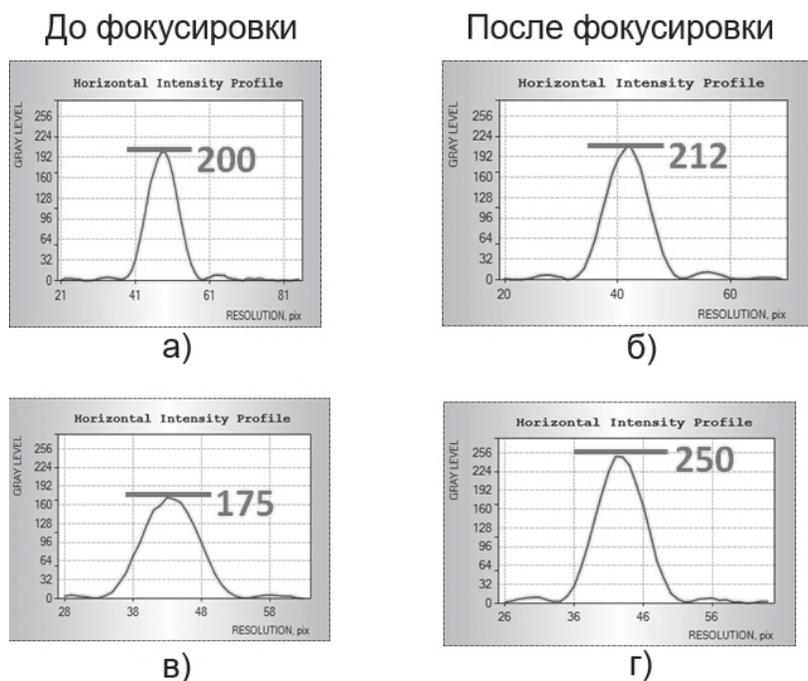


Рис. 3. Профили распределения интенсивности фокального пятна: а) – до коррекции методом минимизации смещений фокальных пятен на датчике Шака-Гартмана, б) – в результате коррекции с помощью минимизации смещений фокальных пятен на датчике Шака-Гартмана, в) – до оптимизации фокуса алгоритмом «восхождения на холм» по фокальному пятну в дальней зоне, г) – после оптимизации фокуса алгоритмом «восхождения на холм» по фокальному пятну в дальней зоне.

Цифры на изображениях показывают максимальный уровень яркости в пятне.

тракт установки вносились какие-либо искажения, то алгоритм оптимизации по датчику Шака-Гартмана подбирал напряжения на зеркале, при которых центры фокальных пятен стремились к центрам пятен опорной гартманограммы.

Затем в кювету, изначально заполненную дистиллированной водой, постепенно добавлялись капли суспензии полистироловых микросфер диаметром 1 мкм (известной концентрации). Это вызывало уменьшение интенсивности фокального пятна в дальней зоне. После включения одного из алгоритмов оптимизации и получения приемлемого фокального пятна в дальней зоне на зеркале вновь выставлялся набор оптимальных напряжений U . Затем выполнялась оптимизация следующим алгоритмом. На следующем этапе концентрация рассеивающей среды увеличивалась, и процедура оптимизации повторялась.

На рис. 3 представлены результаты увеличения пиковой интенсивности фокального пятна в результате адаптивной фокусировки рассеянного излучения с использованием двух методик для концентрации рассеивателей $6.2 \cdot 10^5 \text{ мм}^{-3}$. Индикатриса рассеяния для такой концентрации рассеивающих частиц при толщине слоя 5 мм будет эквивалентна индикатрисе для слоя в несколько сотен метров в условиях тумана, если использовать принцип подобия [Зеге, 1985].

Заключение

Была собрана экспериментальная установка для фокусировки рассеянного лазерного излучения. Ключевым элементом экспериментальной схемы было биморфное адаптивное зеркало с 48 электродами, которое позволило увеличить максимальную яркость фокального пятна в дальней зоне на 10–45%.

Работы проводились при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-07-01276-а) и в рамках государственного задания ИДГ РАН (проект № 0146-2016-0001).

Литература

Kudryashov A., Samarkin V., Aleksandrov A. Adaptive Optical elements for laser beam control // Proc. SPIE 4457. 2001. PP. 170–178.

Kudryashov A.V., Samarkin V.V., Sheldakova Y.V., Aleksandrov A.G. Wavefront compensation method using a Shack-Hartmann sensor as an adaptive optical element system // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2012. № 48 (2). PP. 153–158.

Mosk A.P., Lagendijk A., Lerosey G., Fink M. Controlling waves in space and time for imaging and focusing in complex media // Nature Photonics. 2012. № 6. p. 283.

Samarkin V., Aleksandrov A., Kudryashov A. Bimorph mirrors for powerful laser beam correction and formation // Proc. SPIE 4493. 2002. PP. 269–276.

Sheldakova J., Kudryashov A., Rukosuev A., Lylova A. Uniform focal spot formation in adaptive system with Shack-Hartmann sensor and M2 sensor // Proc. of 17-th International Conference «Laser Optics». 2016. 2016. P. R4–11.

Sheldakova J., Kudryashov A., Samarkin V., Rukosuev A., Alexandrov A., Romanov P. Multi-dither algorithm on Shack-Hartmann wavefront sensor for laser beam formation // Proc. SPIE 7789. 2010. 7789. P. 778912.

Sheldakova J., Rukosuev A., Kudryashov A. Genetic and hill-climbing algorithms for laser beam correction // Proc. SPIE: The International Society for Optical Engineering Laser Resonators and Beam Control VII. Сер. «Laser Resonators and Beam Control VII» sponsors: SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2004. P. 106–111.

Vellekoop I.M., Mosk A.P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media // OPTICS LETTERS. 2007. № 32. P. 2309.

Галактионов И.В., Шелдакова Ю.В., Кудряшов А.В. Анализ aberrаций лазерного излучения, прошедшего сквозь мутную среду // Квантовая электроника. 2015. № 45(2). С. 143–144.

Галактионов И., Кудряшов А., Шелдакова Ю., Бялко А., Каленков Г. Измерение и коррекция волнового фронта лазерного излучения, распространяющегося сквозь рассеивающую среду // Тезисы докладов 17-й международной конференции «Оптика Лазеров 2016». 2016. С. R4–18.

Галактионов И., Кудряшов А., Ю. Шелдакова, А. Бялко, Ж. Борсони. Измерение и коррекция волнового фронта лазерного излучения в мутной среде // Квантовая Электроника. 2017. № 47(1). С. 32–37.

Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде // Мн.: Наука и техника. 1985. – 327 с.