

ФОКУСИРОВКА РАССЕЯННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДАМИ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ

***И.В. Галактионов¹, А.В. Кудряшов², Г.Н. Мар², А.Н. Никитин²,
В.В. Самаркин², Ю.В. Шелдакова²***

¹ООО «Активная оптика НайтН»

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт динамики геосфер Российской академии наук

Проведено экспериментальное исследование возможности фокусировки лазерного излучения с длиной волны 0.65 мкм сквозь рассеивающую суспензию полистироловых микросфер диаметром 1 мкм, взвешенных в дистиллированной воде, с использованием биморфного адаптивного зеркала. Для измерения локальных наклонов вектора Пойнтинга рассеянного излучения применялся датчик Шака-Гартмана, интенсивность и размер фокального пятна в дальней зоне регистрировались с использованием ПЗС-камеры. Выполнен сравнительный анализ эффек-

тивности фокусировки рассеянного лазерного пучка с использованием 3 методик: минимизации смещений фокальных пятен на датчике Шака-Гартмана, оптимизации фокуса алгоритмом «восхождения на холм» с использованием датчика Шака-Гартмана и оптимизации фокуса алгоритмом «восхождения на холм» по интенсивности фокального пятна в дальней зоне.

Введение

Среда считается мутной или рассеивающей, если она обладает явно выраженной оптической неоднородностью, вызванной присутствием примесей частиц с отличающимся показателем преломления (атмосферный аэрозоль, дымка, туман). В такой среде часть энергии распространяющегося излучения поглощается, а часть перераспределяется в пространстве, образуя ореол рассеянного света, который делает очертания рассматриваемых объектов размытыми и препятствует фокусировке излучения. Решение этой проблемы имеет особую значимость для задач увеличения дальности распространения излучения, распознавания образов, передачи информации по оптическим каналам связи [Mosk, Lagendijk, Lerosey, Fink, 2012; Vellekoop, Mosk, 2007].

В настоящей работе показана возможность принципиального улучшения качества фокусировки лазерного пучка сквозь рассеивающую среду с использованием 14-электродного биморфного адаптивного зеркала. Перед постановкой эксперимента была создана модель распространения лазерного пучка сквозь слой рассеивающей среды и регистрации распределения интенсивности прошедшего излучения на датчике Шака-Гартмана [Sheldakova, Kudryashov, Rukosuev, Lylova, 2016], а также выполнены численные оценки возможности компенсации измеренных искажений [Галактионов, Кудряшов, Шелдакова, Мар, Никитин, 2017]. Проведённые численные исследования подтвердили необходимость использования методов и средств адаптивной оптики для решения задачи компенсации искажений рассеянного лазерного пучка с целью повышения качества фокусировки.

Построенная адаптивная система включала датчик Шака-Гартмана, используемый для регистрации и анализа искажений лазерного пучка и ПЗС-камеру, измеряющую интенсивность и размер фокального пятна в дальней зоне. Были экспериментально протестированы 3 методики улучшения фокусировки: минимизация смещений фокальных пятен на датчике Шака-Гартмана, оптимизация фокуса алгоритмом «восхождения на холм» с использованием датчика Шака-Гартмана и оптимизация фокуса алгоритмом «восхождения на холм» по интенсивности фокального пятна в дальней зоне.

Биморфное адаптивное зеркало

В эксперименте для компенсации искажений рассеянного лазерного пучка использовалось биморфное адаптивное зеркало [Samarkin, Aleksandrov, Kudryashov, 2002; Kudryashov, Samarkin, Aleksandrov, 2001] с 14 электродами, апертурой 25 мм и диапазоном управляющих напряжений от -200 В до $+300$ В. На рис. 1 представлено устройство зеркала и схема расположения электродов.

Была исследована возможность данного зеркала воспроизводить центрально-симметричные искажения низшего порядка, которые, как известно [Галактионов,

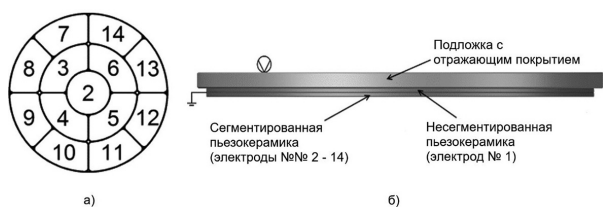


Рис. 1. Схема расположения электродов (а) и устройство биморфного зеркала (б)

Шелдакова, Кудряшов, 2015; Галактионов, Кудряшов, Шелдакова и др., 2017], вносят наиболее существенный вклад в рассеянное излучение. Начальные значения амплитуды искажений (peak-to-valley) составляли 25 мкм для дефокусировки и 4 мкм для сферической аберрации. Остаточная ошибка воспроизведения – RMS – составила, соответственно, 0.03 мкм для дефокусировки и 0.005 мкм – для сферической аберрации.

Методы фокусировки лазерного излучения

Экспериментально были протестированы 3 методики фокусировки рассеянного пучка.

1. Минимизация смещений фокальных пятен на датчике Шака-Гартмана – был использован алгоритм, описанный в [Kudryashov, Samarkin, Sheldakova, Aleksandrov, 2012]. Цель – минимизировать смещения фокальных пятен на датчике Шака-Гартмана, используя функции отклика биморфного зеркала.

$$S_k = \left| \frac{\Delta x_k}{\Delta y_k} \right| = \sum_{j=1}^N u_j \cdot b_j(x_k, y_k) \mapsto MIN$$

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.

2. Оптимизация фокуса алгоритмом «восхождения на холм» с использованием датчика Шака-Гартмана [Sheldakova, Rukosuev, Romanov et al., 2010]. В качестве целевой функции использовалось среднеквадратическое отклонение по ансамблю смещений фокальных пятен.

3. Оптимизация фокуса алгоритмом «восхождения на холм» по фокальному пятну в дальней зоне [Sheldakova, Kudryashov, Samarkin et al., 2010]. Цель метода – максимизировать яркость фокального пятна в дальней зоне, регистрируемого с помощью ПЗС-камеры.

$$(D_x + D_y) \cdot \max(D_x, D_y) \rightarrow MAX$$

где D_x – диаметр фокального пятна на ПЗС-камере вдоль оси X, D_y – диаметр фокального пятна на ПЗС-камере вдоль оси Y.

Экспериментальная установка для фокусировки лазерного пучка

Для подтверждения возможности фокусировки лазерного пучка, прошедшего сквозь рассеивающую среду, была собрана экспериментальная установка (рис. 2). Коллимированный лазерный пучок с длиной волны 0.65 мкм падал на стеклянную

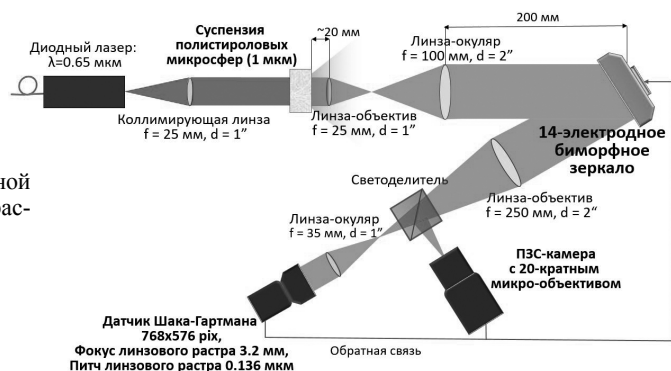


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для фокусировки рассеянного лазерного пучка

кювету с суспензией полистироловых микросфер диаметром 1 мкм, взвешенных в дистиллированной воде. Рассеянный пучок попадал на расширяющий телескоп, сопрягающий плоскость выходной грани кюветы и плоскость биморфного зеркала. После отражения от поверхности зеркала, пучок падал на сужающий телескоп и фиксировался на датчике Шака-Гартмана, при этом часть пучка ответвлялась на ПЗС-камеру с микро-объективом с 20-кратным увеличением.

На подготовительном этапе вместо биморфного зеркала был установлен эталон, кювета была заполнена чистой дистиллированной водой (без рассеивающих частиц) – в таких условиях было зафиксировано фокальное пятно в дальней зоне. Затем эталон был заменён на биморфное зеркало, что привело к ухудшению качества фокального пятна ввиду неизбежной начальной деформации поверхности зеркала. Используя методику оптимизации фокального пятна по интенсивности с помощью алгоритма «восхождения на холм», удалось увеличить начальную яркость фокального пятна в дальней зоне (максимальная интенсивность в пятне была увеличена со 160 до 255 единиц в оттенках серого).

Результаты

По результатам начальной оптимизации набор напряжений U на зеркале, соответствующих лучшему фокусу, был сохранен как набор оптимальных напряжений для данной установки в отсутствие рассеивающей среды. Полученная при этом гартманограмма на датчике Шака-Гартмана была использована в качестве опорной. Это означало, что в случае внесения каких-либо искажений в оптический тракт установки оптимизация по датчику Шака-Гартмана с использованием метода наименьших квадратов подбирала такие напряжения на зеркале, при которых центры фокальных пятен стремились к центрам опорной гартманограммы. После настройки и сохранения всех исходных параметров в кювету с водой постепенно добавлялись капли суспензии полистироловых микросфер диаметром 1 мкм (известной концентрации). Это приводило к искажению проходящего сквозь кювету лазерного пучка и к ухудшению фокального пятна в дальней зоне. После этого включались поочерёдно 3 алгоритма оптимизации, описанные выше, и фиксировались изображения фокуса в дальней зоне. После того, как выполнялась оптимизация с помощью одного алгоритма, на зеркале выставлялся набор напряжений U с первого шага настройки. Затем выполнялась оптимизация следующим алгоритмом. Когда результаты для

всех 3 алгоритмов были получены, увеличивалась концентрация рассеивателей и процедура повторялась.

В качестве примера приведём результаты увеличения интенсивности в фокальном пятне в результате адаптивной коррекции рассеянного излучения 3 разными способами для концентрации рассеивателей $4.1 \cdot 10^5 \text{ мм}^{-3}$ (рис. 3).

Таблица 1 содержит относительное увеличение яркости фокального пятна в дальней зоне, полученное с помощью той или иной методики оптимизации для всех рассматриваемых в работе концентраций рассеивателей.

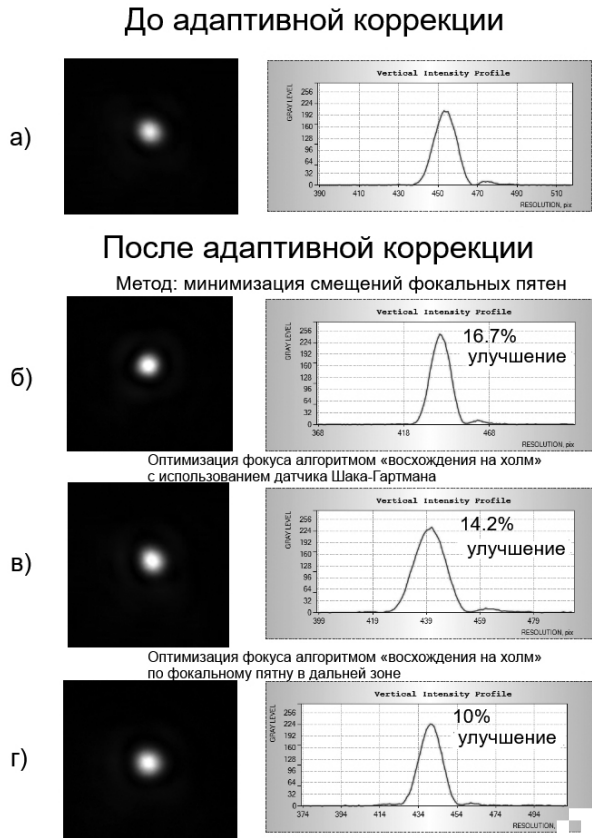


Рис. 3. Двумерное распределение интенсивности и горизонтальный профиль интенсивности фокального пятна: а – до коррекции; в результате коррекции с помощью: б – минимизации смещений фокальных пятен на датчике Шака-Гартмана, в – оптимизации фокуса алгоритмом «восхождения на холм» с использованием датчика Шака-Гартмана, г – оптимизации фокуса алгоритмом «восхождения на холм» по фокальному пятну в дальней зоне

Таблица 1. Сравнение эффективности фокусировки рассеянного лазерного излучения для разных концентраций рассеивателей

Метод коррекции	Концентрация рассеивателей		
	10^5 мм^{-3}	$3.3 \cdot 10^5 \text{ мм}^{-3}$	$4.1 \cdot 10^5 \text{ мм}^{-3}$
Минимизация смещений фокальных пятен с помощью МНК	18.2%	20%	16.7%
«Восхождение на холм» с использованием датчика Шака-Гартмана	15.1%	19%	14.2%
«Восхождение на холм» с использованием ПЗС-камеры	13.5%	139%	10%

Заключение

Было выполнено экспериментальное сравнение эффективности фокусировки рассеянного излучения с помощью биморфного адаптивного зеркала с 14 электродами с использованием 3 различных методик: минимизации смещений фокальных пятен на датчике Шака-Гартмана, оптимизации фокуса алгоритмом «восхождения на холм» с использованием датчика Шака-Гартмана и оптимизации алгоритмом «восхождения на холм» по фокальному пятну в дальней зоне. Компенсация вносимых рассеивающей средой искажений методами и средствами адаптивной оптики позволила увеличить общую яркость фокального пятна в дальней зоне на 10–20%.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-07-01276-а) и РНФ (проект №15-19-20013).

Литература

Галактионов И., Кудряшов А., Шелдакова Ю., Мар Г., Никитин А. Адаптивная система для увеличения эффективности фокусировки лазерного излучения сквозь рассеивающую среду: Тезисы XXIII Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». 2017. С. 45.

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

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.

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

Kudryashov A., Samarkin V., Aleksandrov A. Adaptive Optical elements for laser beam control // Proc. SPIE 4457. 2001. P. 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). P. 153–158.

Mosk A.P., Lagendijk A., Leroosey 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. P. 269–276.

Sheldakova Ya., Kudryashov A., Rukosuev A., Lylova A. Uniform focal spot formation in adaptive system with Shack-Hartmann sensor and M2 sensor // Proc. of 17th 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. P. 778–912.

Sheldakova J., Rukosuev A., Romanov P., Kudryashov A., Samarkin V. Hill-climbing algorithm for adaptive optical system with Shack-Hartmann sensor // Proc. of 5th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL' 2010. 2010. P. 157–158.