

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-08-25-34

УДК 535.8

Экспериментальные исследования влияния потери данных измерений на качество реконструкции искажённого атмосферной турбулентностью волнового фронта датчиком Шэка–Гартмана

Лидия Адольфовна Больбасова^{1✉}, Владимир Петрович Лукин²,
Егор Леонидович Соин³

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,
Томск, Россия

¹sla@iao.ru <https://orcid.org/0000-0002-9903-6534>

²lukin@iao.ru <https://orcid.org/0000-0001-8847-0119>

³sel@iao.ru <https://orcid.org/0000-0002-8291-8864>

Аннотация

Предмет исследования. Искажённый атмосферной турбулентностью волновой фронт лазерного излучения. **Цель работы.** Экспериментальная оценка влияния потери данных измерений при виньетировании и центральном экранировании входного зрачка оптической системы на реконструкцию датчиком Шэка–Гартмана, искажённого атмосферной турбулентностью волнового фронта лазерного излучения, распространяющегося на горизонтальной атмосферной трассе. **Метод.** Экспериментальные исследования выполнены при распространении лазерного излучения на горизонтальной атмосферной трассе для различных коэффициентов экранирования и виньетирования. Результаты анализируются в терминах полиномов Цернике. **Основные результаты.** Представлены результаты экспериментальных исследований реконструкции волнового фронта лазерного излучения, искажённого атмосферной турбулентностью, датчиком Шэка–Гартмана при виньетировании и центральном экранировании входного зрачка оптической системы. Показано, что влияние центрального экранирования несущественно для восстановления волнового фронта, и только имеющее место занижение сферической аберрации может потребовать доработки алгоритма адаптивной коррекции при работе систем адаптивной оптики. При виньетировании зрачка наиболее завышены значения аберрации кома. **Практическая значимость.** Датчик волнового фронта — ключевой элемент адаптивной оптической системы, от правильности измерений которого зависит конечный результат коррекции искажений волнового фронта оптического излучения. Полученные в работе результаты исследования имеют значение при разработке адаптивных оптических систем передачи и фокусировки лазерного излучения сквозь атмосферу.

Ключевые слова: адаптивная оптика, аберрации волнового фронта, атмосферная турбулентность, датчик Шэка–Гартмана

Благодарность: работа выполнена в рамках государственного задания Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.

Ссылка для цитирования: Больбасова Л.А., Лукин В.П., Соин Е.Л. Экспериментальные исследования влияния потери данных измерений на качество реконструкции искажённого атмосфер-

ной турбулентностью волнового фронта датчиком Шэка–Гартмана // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 8. С. 25–34. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-08-25-34>

Коды OCIS: 010.1080, 010.7350, 110.1080.

Experimental studies of the influence of loss of measurement data on the quality of reconstruction of a wavefront distorted by atmospheric turbulence using a Shack–Hartmann sensor

LIDIA A. BOLBASOVA¹, VLADIMIR P. LUKIN², EGOR L. SOIN³

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

¹*sla@iao.ru* <https://orcid.org/0000-0002-9903-6534>

²*lukin@iao.ru* <https://orcid.org/0000-0001-8847-0119>

³*sel@iao.ru* <https://orcid.org/0000-0002-8291-8864>

Abstract

Subject of study. The wavefront of laser radiation is distorted by atmospheric turbulence. **Aim of study.** Experimental study of the influence of loss data because of central obstruction and fragmentation of the entrance pupil of the optical system on the reconstruction of the wavefront of laser radiation propagating along a horizontal atmospheric path, distorted by atmospheric turbulence using a Shack–Hartmann sensor. **Method.** The studies were carried out during the propagation of laser radiation along a horizontal atmospheric path, at various coefficients of central obstruction and fragmentation. The results in terms of Zernike polynomials are analyzed. **Main results.** The results of experimental studies of the reconstruction of the wavefront of laser radiation, distorted by atmospheric turbulence, using a Shack–Hartmann sensor with fragmentation and central obstruction of the entrance pupil are presented. It is shown that the influence of central obstruction is not significant on wavefront reconstruction; only the underestimation of spherical aberration that occurs may require modification of the adaptive correction algorithm of adaptive optics systems. When the pupil is vignetted, the most values are occurred aberrations of coma. **Practical significance.** The quality of adaptive optics correcting laser radiation distortions depends on the correctness measurements of wavefront sensor. The results obtained in the study are important in the development of adaptive optical systems for transmitting and focusing laser radiation through the atmosphere.

Keywords: adaptive optics, atmospheric turbulence, wavefront, aberration, wavefront sensor Shack–Hartmann

Acknowledgment: this work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences).

For citation: Bolbasova L.A., Lukin V.P., Soin E.L. Experimental studies of the influence of loss of measurement data on the quality of reconstruction of a wavefront distorted by atmospheric turbulence using a Shack–Hartmann sensor [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 8. P. 25–34. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-08-25-34>

OCIS codes: 010.1080, 010.7350, 110.1080.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из актуальных направлений применения адаптивных оптических систем остаётся фокусировка лазерного излучения через

турбулентную атмосферу. Датчик волнового фронта Шэка–Гартмана — ключевой элемент адаптивной оптической системы (АОС), от правильности измерений которого зависит

конечный результат коррекции искажений оптического излучения [1, 2]. Двухзеркальная система является наиболее часто используемой схемой построения телескопических систем для адаптивной оптической коррекции лазерного излучения на горизонтальных атмосферных трассах [3–5]. Такая система включает в себя вогнутое большое зеркало, называемое главным, и малое выпуклое, называемое контротражателем. Это системы Шмидта–Кассегрена, Максудова–Кассегрена и Ричи–Кретьена. Двухзеркальная оптическая система со сферическими поверхностями не даёт стигматического изображения точки на оси. Для определённости изображение рассматривают в параксиальном фокусе (плоскость Гаусса) или плоскости наилучшей установки. В этой плоскости изображение точки имеет минимальные размеры. Главное зеркало осуществляет перехват световой энергии и фокусировку вблизи контротражателя. На контротражателе осуществляется отражение лучей таким образом, что задний фокус системы является действительным и расположен за её пределами. Для выноса фокуса в главное зеркало выполняется отверстие. Следовательно, часть энергии, падающей на зеркало, не принимает участия в образовании изображения, и заслоняется контротражателем. Это означает, что в двухзеркальной системе имеет место центральное экранирование, определяемое коэффициентом экранирования [6]:

$$\varepsilon = \frac{D_{\text{ко}}}{D_{\text{pm}}} 100\%, \quad (1)$$

где D_{pm} — световой диаметр главного зеркала, $D_{\text{ко}}$ — световой диаметр контротражателя.

В результате в таких телескопах имеет место центральное экранирование входного зрачка приёмной части системы адаптивной оптики. Поскольку центральное экранирование портит дифракционное изображение, считается, что величина ε должна не превышать 0,25 в астрономических рефлекторах [6]. К примеру, коэффициент экранирования для телескопа Кекка равен 0,13 [7]. Но в малых типовых телескопах, используемых в качестве приёмных при работе АОС коррекции лазерного излучения на атмосферных горизонтальных трассах, это величина может быть выше. В частности, в телескопах MEADE коэффициент линейного

экранирования равен от 13,28% (конфигурация 14" LX600-ACF F/8) до 20,95% (конфигурация 10" LX600-ACF F/8), а у Sky-Watcher BK 1149 — приблизительно 22%. Отметим, что создание системы с центральным экранированием, равным 8%, возможно, но тогда происходит потеря в светосиле системы, сужение её спектральной области и потеря в технологичности её оптики, а разница в частотно-контрастной характеристике для системы с центральным экранированием 13% и 8% в принципе для потребителя будет неощутимой, поэтому такие телескопы не изготавливаются. Как следствие возникает вопрос о корректном восстановлении волнового фронта датчиком Шэка–Гартмана, как измерительным элементом адаптивной оптической системы коррекции атмосферных искажений, при центральном экранировании входного зрачка, когда коэффициент экранирования равен 13–22%, поскольку от правильности восстановления волнового фронта зависит непосредственно конечный результат адаптивной коррекции лазерного излучения.

Другим ограничением можно считать потерю освещённости на некоторых субапертурах, например, при виньетировании входного зрачка, что может быть связано, в том числе с низким отношением сигнал/шум [8]. В результате число субапертур, данные которых используются для реконструкции волнового фронта, будет уменьшено, а значит, важно оценить влияние виньетирования на реконструкцию волнового фронта. Коэффициент виньетирования можно вычислить следующим образом:

$$K = \frac{d}{D_{\text{pm}}}, \quad (2)$$

где d — диаметр действующей части входного зрачка.

Цель данной работы — экспериментально оценить влияние потери данных измерений при виньетировании и центральном экранировании входного зрачка оптической системы на реконструкцию датчиком Шэка–Гартмана, волнового фронта лазерного излучения искажённого атмосферной турбулентностью, при распространении на горизонтальной атмосферной трассе.

Отметим, что ранее, например, в работах [7–10] рассматривалась эта задача, но только

теоретически на основе численного моделирования с использованием фазовых экранов, путём отбрасывания измерений, соответствующих скрытым субапертурам. Полученные результаты не были проверены экспериментально ни в лабораторных условиях, ни на атмосферных трассах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Измерения выполнялись на горизонтальной атмосферной трассе протяжённостью около 105 м между корпусами ИОА СО РАН, высота над подстилающей поверхностью — 10 м. Измерения были выполнены двумя идентичными датчиками волнового фронта Шэка–Гартмана (ДВФ Ш–Г) производства фирмы «Визионика» [11, 12]. Абсолютная погрешность измерений, заявленная производителем, равна $\lambda/100$.

Коллимированный лазерный пучок (длина волны 535 нм), пройдя атмосферную трассу, с помощью светоделительного кубика разделялся на два пучка размером 48 мм и принимался приёмной апертурой каждого ДВФ. В ходе экспериментов параметр Фрида был равен 1–2 см и атмосферная турбулентность соответствовала модели турбулентности на основе гипотезы Колмогорова [13].

Принцип работы датчика Шэка–Гартмана освещён во многих публикациях, в том числе в ГОСТ [14], и может быть объяснён с помощью основных законов геометрической оптики. Расположение фокального пятна напрямую связано с локальным наклоном анализируемого волнового фронта, усреднённого по субапертурам. Расположение фокальных точек обычно определяется с помощью алгоритма цен-

тра масс. В соответствии с этим алгоритмом координаты i -ой точки фокусировки вычисляются по формулам:

$$x_i = \frac{\sum_j \sum_k x_{jk} I_{jk}}{\sum_j \sum_k I_{jk}}, \quad y_i = \frac{\sum_j \sum_k y_{jk} I_{jk}}{\sum_j \sum_k I_{jk}}, \quad (3)$$

где I_{jk} — распределение интенсивности по области субапертуры, относящейся к i -й микролинзе.

Один ДВФ2 всегда работал, как эталонный, в котором нет недостающих данных, вызванных эффектом экранирования или виньетирования входного зрачка оптической системы. Работа второго ДВФ1 исследовалась в следующих конфигурациях: коэффициент экранирования –13%, 22% и коэффициенты виньетирования — 0,65; 0,45. Для этого соответствующие субапертуры программно были исключены из расчёта при восстановлении волнового фронта лазерного излучения, искажённого атмосферной турбулентностью.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Волновой фронт может быть представлен в виде ряда по полиномам Цернике, где каждый член ряда характеризует определённую aberrацию. Поэтому все результаты анализировались в терминах полиномов Цернике [15].

Было выполнено по несколько серий измерений по 1000 кадров каждая. Частота кадров камеры ДВФ составляла 200 кадров в секунду. Для сопоставления результатов вычислялось среднеквадратичное значение (RMS) набора измеренных значений коэффициентов при полиномах Цернике, поскольку мгновенные значения коэффициентов имели разный знак. RMS представляет собой квадратный корень из среднего арифметического квадратов значений:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij}^2}, \quad (4)$$

где a_{ij} — мгновенные значения коэффициентов при i -ом полиноме Цернике [15] в j -ой реализации, n — число реализаций.

В первую очередь были выполнены измерения двумя ДВФ одновременно без экранирования при прохождении лазерного излучения

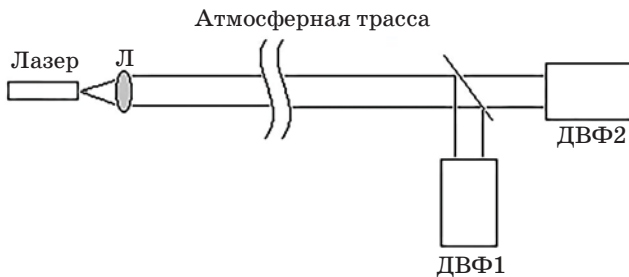


Рис. 1. Схема эксперимента
Fig. 1. The scheme of the experiment

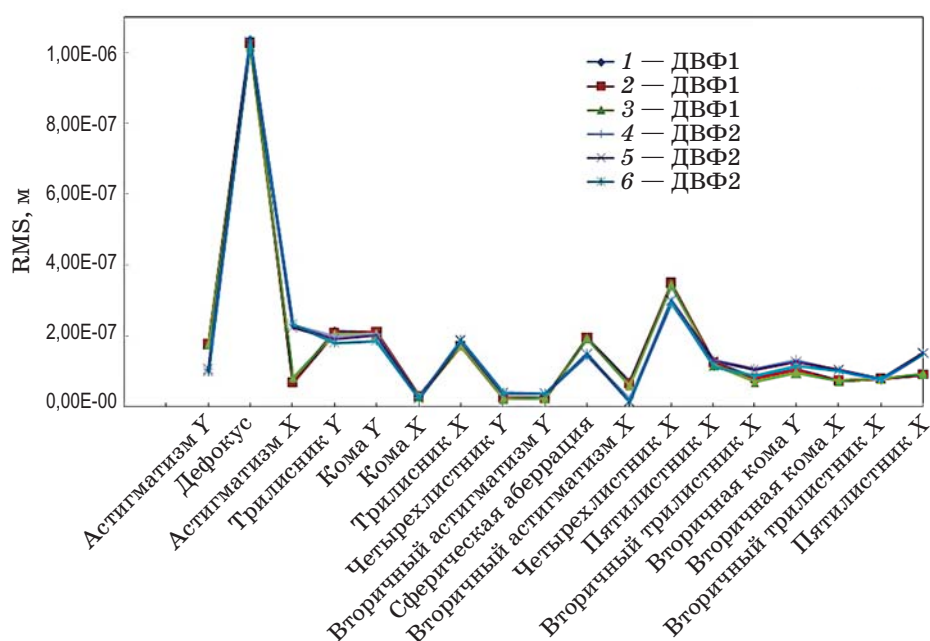


Рис. 2. Одновременные измерения aberrаций волнового фронта двумя ДВФ на полной апертуре. Кривые 1, 2, 3 — измерения ДВФ1 и кривые 4, 5, 6 — измерения ДВФ2

Fig. 2. Simultaneous measurements of wavefront aberrations by WFS1 and WFS2 at full aperture. Curves 1, 2, 3 — measurements of WFS1 and 4, 5, 6 — measurements of WFS2

по горизонтальной атмосферной трассе, включающие три серии измерений (рис. 2).

Из полученных результатов можно заключить о практической идентичности измерений двумя ДВФ Ш–Г, за исключением aberrации астигматизм по оси X , что вероятно связано с неточным совпадением плоскостей, в которых выполнялись измерения, поскольку в зависимости от положения плоскости изображения при астигматизме пятно рассеяния может принимать форму эллипсов, отрезков или круга. Горизонтальный отрезок наблюдается, если плоскость изображения совпадает с меридиональным фокусом, а вертикальный — если с сагиттальным, а посередине между ними пятно рассеяния имеет форму круга, в остальных положениях — пятна эллиптической формы [16].

Для оценки влияния центрального экранирования зрачка на реконструкцию волнового фронта, искажённого атмосферной турбулентностью, программно были исключены субапертуры в центре у ДВФ1 с коэффициентом экранирования 13% (рис. 3), 22% (рис. 4). При этом ДВФ2 восстанавливал волновой фронт на основе данных от всех 245 субапертур.

Из полученных результатов, следует, что сферическая aberrация ($n = 4$, $m = 0$ соглас-

но [15]) восстанавливается существенно хуже, чем другие моды. Однако это особенность сферической aberrации и не является внутренним ограничением подхода восстановления волнового фронта ДВФ Ш–Г, а может быть просто объяснена двумерной геометрией этой aberrации и тем, как она вписывается во входной зрачок телескопа, и размером центрального экранирования. Кольцевая форма сферической aberrации приводит к довольно равномерному распределению фазы, которая меняется только вблизи внутреннего и внешнего краёв зрачка. Основа полиномов Цернике определена для полной круглой апертуры: амплитуды соответствуют заданному среднеквадратичному значению волнового фронта по всей круглой апертуре. Что касается сферической aberrации, то наличие центрального препятствия (экранирования) естественным образом отфильтровывает большую часть эффекта сферической aberrации. В результате её величина оказывается меньше в 2,5 раза при центральном экранировании зрачка.

По мере увеличения центрального экранирования увеличиваются различия в aberrациях «дефокус», «трилистник» и «четырёхлистник», которые также уменьшаются при центральном

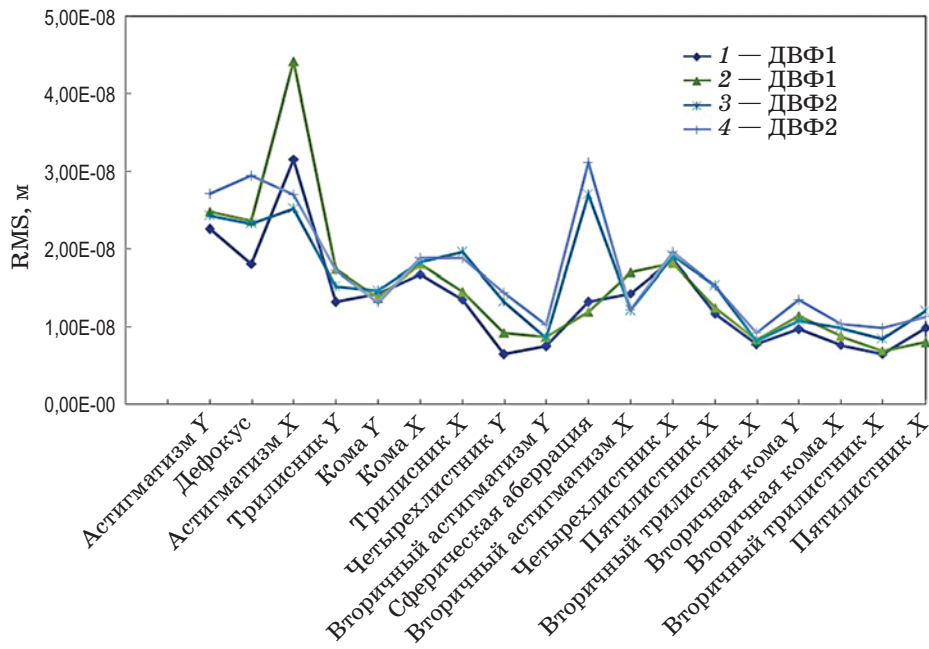


Рис. 3. Одновременные измерения aberrаций волнового фронта ДВФ1 с коэффициентом центрального экранирования 13% и ДВФ2 без экранирования. Кривые 1, 2 — измерения ДВФ1 и кривые 3, 4 — измерения ДВФ2

Fig. 3. Simultaneous measurements of wavefront aberrations by WFS1 with the **obstruction** coefficient 13% and WFS2 without a central **obstruction** of the entrance pupil. Curve 1 and 2 — measurements of WFS1, 3 and 4 — measurements of WFS2

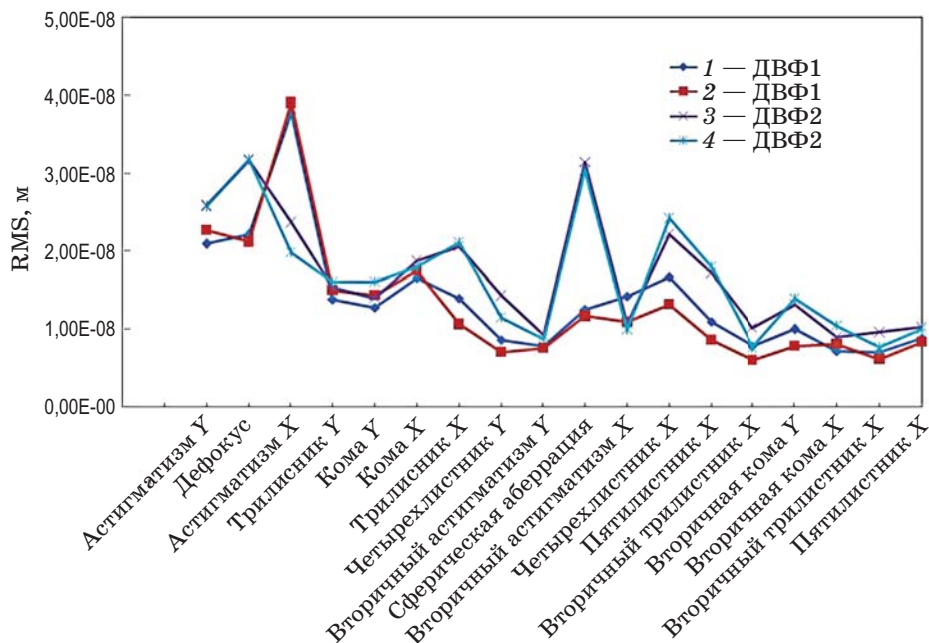


Рис. 4. Одновременные измерения aberrаций волнового фронта ДВФ1 с коэффициентом центрального экранирования 22% и ДВФ2 без экранирования. Кривые 1 и 2 — измерения ДВФ1, кривые 3 и 4 — измерения ДВФ2

Fig. 4. Simultaneous measurements of wavefront aberrations by WFS1 with the central **obstruction** coefficient of 22% and WFS2 without a central **obstruction** of the entrance pupil. Curve 1 and 2 — measurements of WFS1, 3 and 4 — measurements of WFS2

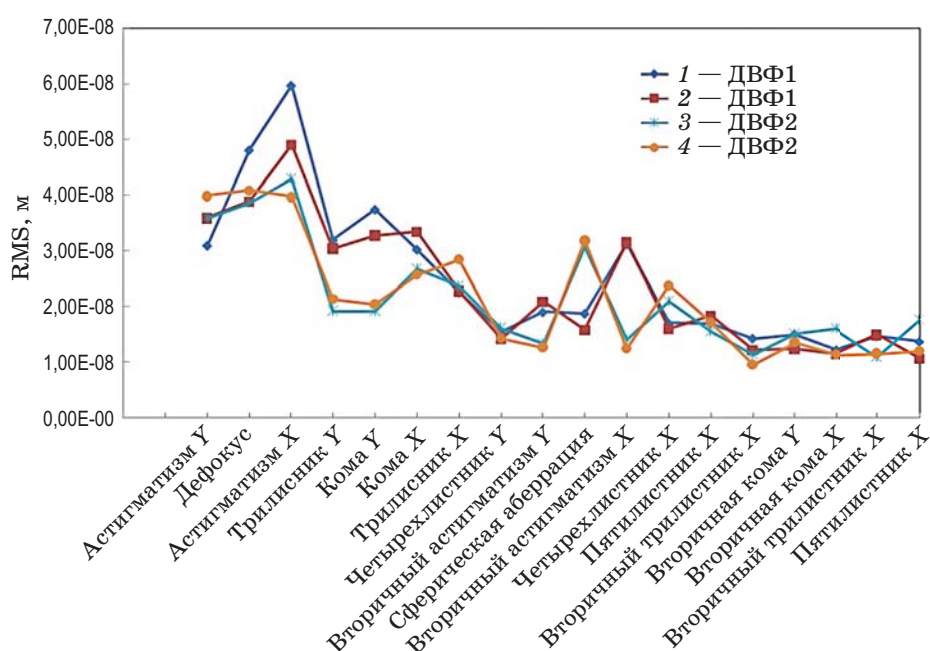


Рис. 5. Одновременные измерения aberrаций волнового фронта ДВФ1 с коэффициентом виньетирования 0,65 и ДВФ2 без виньетирования. Кривые 1 и 2 — измерения ДВФ1, кривые 3 и 4 — измерения ДВФ2

Fig. 5. Simultaneous measurements of wavefront aberrations by WFS1 with the vignetting coefficient of 0.65 and WFS2 without a vignetting. Curve 1 and 2 — measurements of WFS1, 3 and 4 — measurements of WFS2

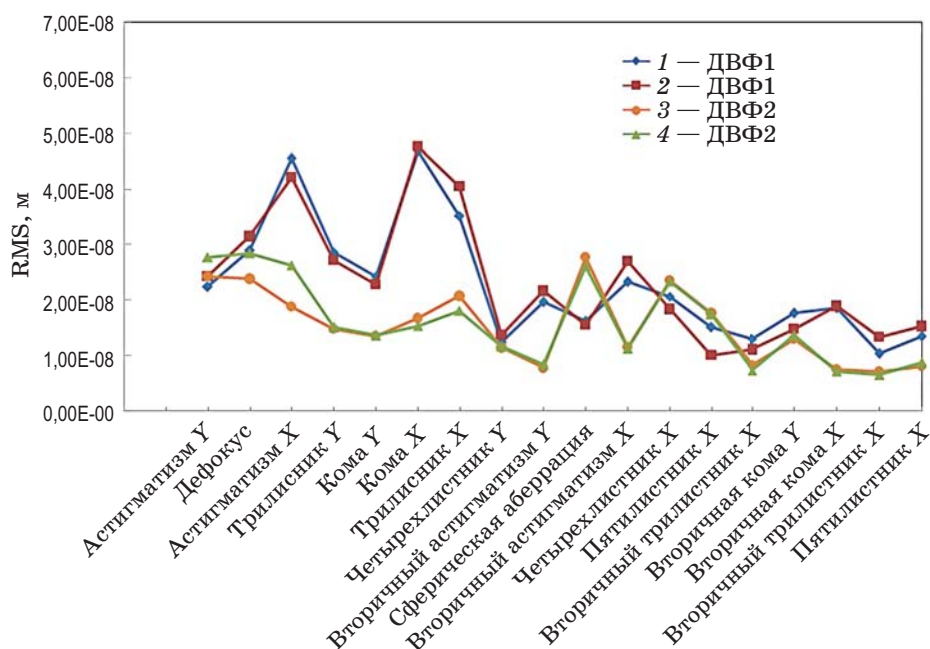


Рис. 6. Одновременные измерения aberrаций волнового фронта: ДВФ1 с коэффициентом виньетирования 0,45 и ДВФ2 без виньетирования. Кривые 1 и 2 — измерения ДВФ1, кривые 3 и 4 — измерения ДВФ2

Fig. 6. Simultaneous measurements of wavefront aberrations by WFS1 with the vignetting coefficient of 0.45 and WFS2 without a vignetting. Curve 1 and 2 — measurements of WFS1, 3 and 4 — measurements of WFS2

экранировании по сравнению с восстановлением волнового фронта без исключения субапертур ДВФ. Однако существенными можно считать различия для аберраций «трилистник» и «четырёхлистник», но вклад этих аберраций в искажение атмосферной турбулентностью волнового фронта оптического излучения незначителен. Таким образом, влияние центрального экранирования до 22% не будет вызывать погрешность реконструкции волнового фронта за исключением сферической аберрации. Её занижение при адаптивной коррекции может приводить к снижению эффективности, однако, может быть учтено в алгоритме коррекции.

Для оценки влияния виньетирования зрачка на восстановление искажённого турбулентностью волнового фронта программно были исключены субапертуры у ДВФ1, коэффициенты виньетирования составили 0,65 (рис. 5); 0,45 (рис. 6), то есть для реконструкции волнового фронта использовались 159 и 110 субапертур из 245 соответственно. ДВФ2 восстанавливал волновой фронт на основе данных от всех 245 субапертур.

Отметим, что тот же эффект уменьшения сферической аберрации, но в меньшей степени (примерно в 1,5 раза), можно наблюдать и при виньетировании зрачка из сравнения измерений двумя ДВФ. При виньетировании зрачка (данные с ДВФ1) по сравнению с данными с ДВФ2 без виньетирования, увеличиваются аберрации «кома», «трилистник» и «астигматизм» в полтора раза, если коэффициент виньетирования $K = 0,65$, и в два раза, если $K = 0,45$. Дальнейшее увеличение области виньетирования, когда для реконструкции волнового фронта используются данные измерений меньше, чем от половины субапертур ДВФ, (т.е. 110 из 245), приводит к ошибочно завышенным значениям высших аберраций волнового фронта, вклад которых незначителен в искажённое атмосферной турбулентностью

излучение. При этом именно ошибочные данные об искажениях волнового фронта для аберрации «кома» и «астигматизм» могут приводить к ухудшению качества адаптивной коррекции при работе АОС фокусировки лазерного излучения на горизонтальной атмосферной трассе. А это означает важность применения методов для устранения шумов, увеличения отношения сигнал/шум при работе АО системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные данные реконструкции волнового фронта датчиками Шэка–Гартмана при распространении оптических волн на горизонтальной атмосферной трассе с турбулентностью, полученные, когда имеет место потеря части измеренных данных (при виньетировании и центральном экранировании входного зрачка), исключаящими из восстановления фазового фронта соответствующие субапертуры ДВФ, показали следующее.

1. Влияние центрального экранирования несущественно на качество восстановления волнового фронта, и только имеющее место занижение сферической аберрации может потребовать доработки алгоритма адаптивной коррекции при работе АОС.

2. При виньетировании зрачка различия в величине аберраций восстановленного волнового фронта можно считать количественно существенным для аберраций «кома» и «трилистник», величина которых в терминах полиномов Цернике оказывается выше, чем без виньетирования.

В результате обнаружено, что искажение данных ДВФ Ш–Г, связанное со значительной потерей информации от части субапертур датчика (свыше 30%), при реконструкции волнового фронта может оказать влияние на качество работы системы АО при коррекции лазерного излучения в результате действия турбулентности на атмосферной трассе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Больбасова Л.А., Лукин В.П. Вопросы измерения наклона волнового фронта // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 11. С. 16–23. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-11-16-23>
2. Волков М.В., Богачев В.А., Стариков Ф.А., Шнягин Р.А. Численные исследования динамической адаптивной фазовой коррекции турбулентных иска-

REFERENCES

1. Bolbasova L.A., Lukin V.P. Issues of wavefront tilt measurement // Journal of Optical Technology. 2021. V. 88. № 11. P. 625–629. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000625>
2. Volkov M.V., Bogachev V.A., Starikov F.A., Shnyagin R.A. Numerical study of dynamic adaptive phase correction of radiation turbulent distortions and

- жений излучения и оценка их временных характеристик с помощью датчика Шэка–Гартмана // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 7. С. 547–554. <https://doi.org/10.15372/AOO20210710>
3. Lukin V.P., Kopylov E.A., Lavrinov V.V., Selin A.A. Methods of image correction formed on horizontal long paths // Proc. SPIE. 2018. V. 10677. P. 106773R-1-8. <https://doi.org/10.1117/12.2309327>
4. Bolbasova L.A., Gritsuta A.N., Lavrinov V.V., Lukin V.P., Kopylov E.A., Selin A.A., Soin E.L. Design and development adaptive optical system installed on small-aperture telescope with predictive algorithm // Proc. SPIE. 2020. V. 11560. P. 115600K-1-10. <https://doi.org/10.1117/12.2571462>
5. Банах В.А., Гордеев Е.В., Кусков В.В., Ростов А.П., Шестернин А.Н. Управление начальным волновым фронтом пространственно частично когерентного пучка методом апертурного зондирования по сигналу обратного атмосферного рассеяния. I. Экспериментальная установка // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 08. С. 599–605. <https://doi.org/10.15372/AOO20210805>
6. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.: Наука, 1976. 512 с.
7. Hakobyan A.V. Aperture shapes and the effectiveness of ground-based large and extremely large telescopes // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2020. V. 496. № 4. P. 5414–5422. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa1792>
8. Huang J., Yao L., Wu S., Wang G. Wavefront reconstruction of Shack–Hartmann with under-sampling of sub-apertures // Photonics. 2023. V. 10. № 65. P. 1–14 <https://doi.org/10.3390/photonics10010065>
9. Кучеренко М.А., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н. Реконструкция искажённого атмосферной турбулентностью волнового фронта с учётом оптической схемы телескопа // Автометрия. 2019. Т. 55. № 6. С. 117–125. <http://doi.org/10.15372/AUT20190615>
10. Bonnefond S., Tallon M., Le Louarn M., Madec P.-Y. Wavefront reconstruction with pupil fragmentation: study of a simple case // Proc. SPIE. 2016. V. 9909. P. 990972-1-6. <https://doi.org/10.1117/12.2234034>
11. Ларичев А.В., Ирошников Н.Г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Специализированное программное обеспечение для обработки изображений». Версия 13 (Shah) № 2021619024 от 03.06.2021 г.
12. SHAHQ. Руководство оператора 643.ВДАШ.62.01.29-01 34 02. 2021. 122 с.
13. Андреева М.С., Ирошников Н.Г., Корябин А.В., Ларичев А.В., Шмальгаузен В.И. Использование датчика волнового фронта для оценки параметров атмосферной турбулентности // Автометрия. 2012. Т. 48. № 2. С. 103–111.
14. ГОСТ Р ИСО 15367-2-2012 Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерения формы волнового фронта пучка лазерного излучения. Часть 2. Введ. 01.07.13. М.: Стандартинформ, 2013. 16 с.
15. Noll R.J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence // J. Opt. Soc. Am. 1976. V. 66. № 3. P. 207–211.
16. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / 2-е изд. Перевод с англ. Бреуса С.Н., Головашкина А.И., Шубина А.А. Под ред. Мотулевич Г.П. / М.: Наука, 1973. 720 с.
- estimation of their frequency bandwidth with a Shack–Hartmann wavefront sensor // Atmospheric and Oceanic Optics. 2022. V. 35. № 3. P. 250–257. <https://doi.org/10.1134/S1024856022030174>
3. Lukin V.P., Kopylov E.A., Lavrinov V.V., Selin A.A. Methods of image correction formed on horizontal long paths // Proc. SPIE. 2018. V. 10677. P. 106773R-1-8. <https://doi.org/10.1117/12.2309327>
4. Bolbasova L.A., Gritsuta A.N., Lavrinov V.V., Lukin V.P., Kopylov E.A., Selin A.A., Soin E.L. Design and development adaptive optical system installed on small-aperture telescope with predictive algorithm // Proc. SPIE. 2020. V. 11560. P. 115600K-1-10. <https://doi.org/10.1117/12.2571462>
5. Banakh V.A., Gordeev E.V., Kuskov V.V., Rostov A.P., Shesternin A.N. Controlling the initial wavefront of a spatially partially coherent beam by the aperture sensing technique based on backscatter signals in the atmosphere: I. Experimental setup // Atmospheric and Oceanic Optics. 2021. V. 34. № 6. P. 625–631. <https://doi.org/10.1134/S1024856021060026>
6. Mikhelson N.N. Optical telescopes. Theory and construction. Moscow: Nauka, 1976. 512 p.
7. Hakobyan A.V. Aperture shapes and the effectiveness of ground-based large and extremely large telescopes // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2020. V. 496. № 4. P. 5414–5422. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa1792>
8. Huang J., Yao L., Wu S., Wang G. Wavefront reconstruction of Shack–Hartmann with under-sampling of sub-apertures // Photonics. 2023. V. 10. № 65. P. 1–14. <https://doi.org/10.3390/photonics10010065>
9. Kucherenko M.A., Lavrinov V.V., Lavrinova L.N. Reconstruction of a wavefront distorted by atmospheric turbulence with account for optical scheme of the telescope // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2019. V. 55. P. 631–637. <http://doi.org/10.3103/S8756699019060153>
10. Bonnefond S., Tallon M., Le Louarn M., Madec P.-Y. Wavefront reconstruction with pupil fragmentation: study of a simple case // Proc. SPIE. 2016. V. 9909. P. 990972-1-6. <https://doi.org/10.1117/12.2234034>
11. Larichev A.V., Iroshnikov N.G. Certificate of state registration of the computer program "Specialized software for image processing". Version 13 (Shah) № 2021619024 data 06/03/2021
12. SHAHQ. Operator's Manual 643.VDASH.62.01.29-01 34 02. 2021. 122 p.
13. Andreeva M.S., Iroshnikov N.G., Koryabin A.B., Larichev A.V., Shmalgauzen V.I. Usage of wavefront sensor for estimation of atmospheric turbulence parameters // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2012. V. 48. № 2. C. 197–204
14. GOST (Russian National Standard) ISO 15367-2-2012 Laser and laser-related equipment. Test methods for determination of the shape of a laser beam wavefront. Part 2. [in Russian]. Introd. 07/01/13. Moscow: Standards Publ., 2013. 16 p.
15. Noll R.J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence // J. Opt. Soc. Am. 1976. V. 66. № 3. P. 207–211.
16. Born M., Wolf E. Principles of optics. London, N.Y., Paris: Pergamon Press Publ., 1970. 808 p.

АВТОРЫ

Лидия Адольфовна Больбасова — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, 634055, Россия; Scopus ID: 24075457500; <https://orcid.org/0000-0002-9903-6534>; sla@iao.ru

Владимир Петрович Лукин — доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, 634055, Россия; Scopus ID: 7102438824; <https://orcid.org/0000-0001-8847-0119>; luhin@iao.ru

Егор Леонидович Соин — аспирант, инженер Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, 634055, Россия; Scopus ID: 57205683295; <https://orcid.org/0000-0002-8291-8864>; sel@iao.ru

*Статья поступила в редакцию 20.12.2023
Одобрена после рецензирования 09.04.2024
Принята к печати 28.06.2024*

AUTHORS

Lidia A. Bolbasova — PhD in Physics and Mathematics, Staff Scientist of the V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of SB RAS, Tomsk, 634055, Russia; Scopus ID: 24075457500; <https://orcid.org/0000-0002-9903-6534>; sla@iao.ru

Vladimir P. Lukin — D.Sci. in Physics and Mathematics, Full Professor, Head of laboratory in the V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of SB RAS, Tomsk, 634055, Russia; Scopus ID 7102438824; <https://orcid.org/0000-0001-8847-0119>; luhin@iao.ru

Egor L. Soyn — Engineer, the V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of SB RAS, Tomsk, 634055, Russia; Scopus ID: 57205683295; <https://orcid.org/0000-0002-8291-8864>; sel@iao.ru

*The article was submitted to the editorial office 20.12.2023
Approved after review 09.04.2024
Accepted for publication 28.06.2024*