

## ПИСЬМА

## Быстрая адаптивная оптическая система для коррекции волнового фронта лазерного излучения, искаженного атмосферной турбулентностью

А.Л.Рукоусев, В.Н.Белоусов, А.Н.Никитин, Ю.В.Шелдакова,  
А.В.Кудряшов, В.А.Богачев, М.В.Волков, С.Г.Гаранин, Ф.А.Стариков

*Создана адаптивная оптическая система для коррекции волнового фронта лазерного излучения, искаженного турбулентным воздушным потоком. Использование в качестве основного элемента управления адаптивной системой вентильной матрицы, программируемой пользователем, позволило достичь ширины полосы частот системы 2 кГц. Представлены и проанализированы результаты экспериментов по динамической коррекции фазы лазерного пучка, искаженного потоком нагретого воздуха.*

**Ключевые слова:** адаптивная оптика, датчик волнового фронта, программируемая пользователем вентильная матрица, турбулентность атмосферы.

Компенсация влияния турбулентной атмосферы на лазерное излучение весьма актуальна при решении задач передачи энергии и лазерной связи (см., напр., [1–4]). Воздействие воздушных потоков вызывает динамические искажения волнового фронта пучка и снижает качество фокусировки. Для коррекции волнового фронта лазерного излучения в реальном времени требуется адаптивная оптическая система (АОС) с высоким быстродействием. Спектр атмосферных флуктуаций достигает частот  $\sim 100$  Гц и более [5], поэтому рабочий диапазон частот АОС должен, согласно [6], превышать 1 кГц. При управлении АОС компьютером такую скорость нельзя обеспечить из-за задержек операционной системы [7]. Целью настоящей работы является исследование коррекции быстрых флуктуаций фазы с помощью созданной АОС с шириной полосы частот 2 кГц, управляемой аппаратно на основе программируемой пользователем вентильной матрицы (ППВМ).

Схема АОС показана на рис.1. Лазерное излучение ( $\lambda = 632$  нм, пучок диаметром 50 мм с плоским профилем) падает на адаптивное зеркало (АЗ), а затем на датчик волнового фронта (ДВФ) типа датчика Шака – Гартмана. Биморфное 31-элементное АЗ (оптическая апертура диаметром 50 мм, ширина кольца электродов 8 мм, прогиб электрода 2 мкм, частота 1-го резонанса 8.3 кГц) эффективно корректирует aberrации низких порядков, которые обычно создаются турбулентностью. Параметры ДВФ на базе камеры JetCam-19 [8] таковы: динамический диапазон  $\pm 50\lambda$ , СКО измерений  $\lambda/120$ , фокусное расстоя-

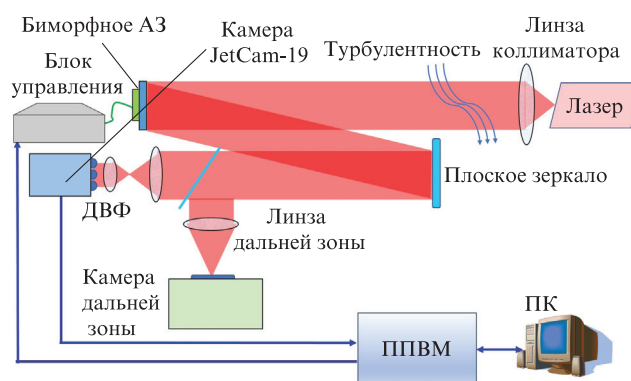


Рис.1. Схема АОС.

ние микролинзы 12 мм, число субапертур  $20 \times 20$ , апертура  $4.8 \times 4.8$  мм, частота 4000 кадр./с при разрешении  $480 \times 480$  пикселей. Видеоинформация с камеры ДВФ по оптоволокну со скоростью 40 Гбит/с поступает в плату захвата видеоизображения с находящейся в ее составе ППВМ «Agria V», которая осуществляет управление АОС. ППВМ обеспечивает быстрые вычисления благодаря аппаратной реализации и параллельности обработки. Персональный компьютер (ПК) предназначен только для выбора режима работы ППВМ и сбора информации из ППВМ о процессе фазовой коррекции. Для независимой проверки качества коррекции проводится контроль лазерного пятна в дальней зоне, получаемого при фокусировке пучка длиннофокусной линзой на камеру Gig-E DMK23GM021.

ППВМ обрабатывает видеоинформацию и рассчитывает управляющие напряжения, минимизируя разность координат центров масс (центроидов) пятен для корректируемого и референсного пучков на гартманнограмме ДВФ с использованием функций отклика АЗ. ППВМ использует интерфейс камеры ДВФ на низком уровне и работает с пикселями изображения в режиме реального времени. Получив изображения части пятен, ППВМ рассчитывает координаты центроидов и заполняет соответ-

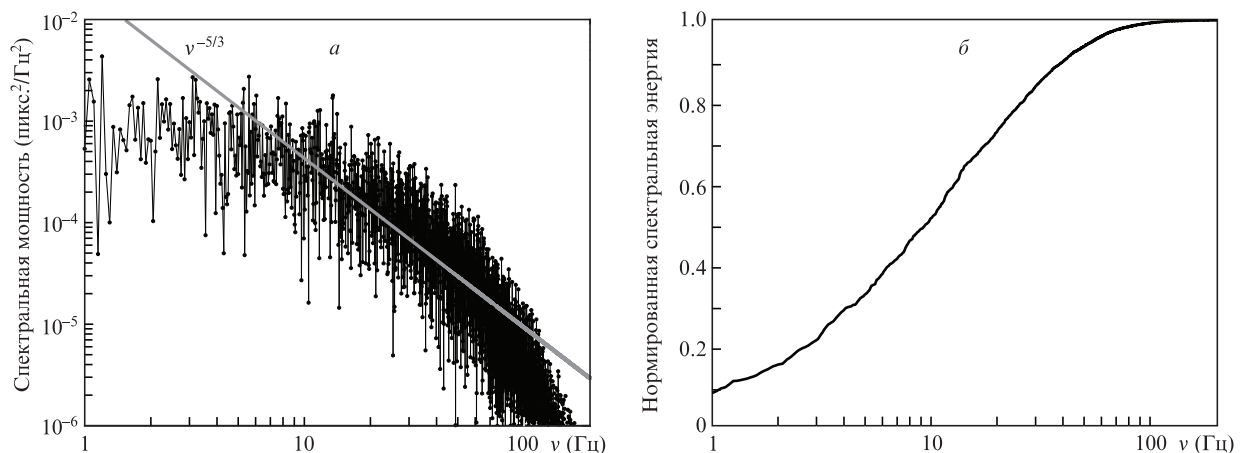
А.Л.Рукоусев, А.Н.Никитин, Ю.В.Шелдакова, А.В.Кудряшов. Институт динамики геосфер им. М.А.Садовского РАН, Россия, 119334 Москва, Ленинский просп., 38, кор.1; e-mail: alru@nightn.ru  
В.Н.Белоусов. ООО «Лиратех», Россия, 115191 Москва, ул. Малая Тульская, 16, пом. IV, к. 3  
В.А.Богачев, М.В.Волков, С.Г.Гаранин, Ф.А.Стариков. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ», Институт лазерно-физических исследований, Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37



Рис.2. Временная диаграмма одного цикла работы АОС.

ствующие элементы матрицы для расчета напряжений. В итоге сразу после получения ППВМ всего изображения вектор напряжений оказывается вычисленным. Эти напряжения блоком управления, к которому ППВМ также имеет низкоуровневый доступ, прикладываются к электродам АЗ. Время замкнутого цикла работы АОС сокращается до 0,5 мс, что отвечает ширине полосы частот 2 кГц. Временная диаграмма одного цикла работы АОС показана на рис.2.

Проведены эксперименты по динамической фазовой коррекции искажений лазерного пучка, создаваемых потоком нагретого воздуха от тепловентилятора (см. рис.1). Расчетный анализ динамики экспериментальных гартманограмм с использованием дифференциального метода [9] показал, что радиус когерентности турбулентной трассы составляет  $\sim 1,5$  см, что вдвое больше размера электрода АЗ и в шесть раз – субапертуры ДВФ с учетом масштабирования. Поскольку задача АОС заключается в удержании пятен гартманограммы в референсных позициях во времени, то выводы о временном масштабе турбулентности, влияние которой предстоит компенсировать, логично сделать из динамики центроидов. На рис.3 показаны временной спектр мощности флуктуаций центроида в одной из центральных субапертур ДВФ (при статистически однородной турбулентности аналогичная картина наблюдается в каждой субапертуре) и зависимость доли спектральной энергии флуктуаций от частоты. Примечательно, что на рис.3,а в диапазоне частот  $\nu = 10-60$  Гц наблюдается спад спектральной мощности по закону  $\nu^{-5/3}$ , характерный для инерционного интервала колмогоровской атмосферной турбулентности [10]. Определим ширину полосы частот турбулентности  $\nu_{\text{turb}}$  как частоту, в пределах которой содержится 95% энергии флуктуаций центроида. Тогда согласно рис.3,б имеем  $\nu_{\text{turb}} = 60$  Гц.

Рис.3. Спектр мощности флуктуаций центроида (а) и зависимость доли спектральной энергии от частоты (б). Серой линией показана степенная зависимость  $\sim \nu^{-5/3}$ .

На рис.4 показаны характерные мгновенные экспериментальные распределения лазерного излучения в дальней зоне без адаптивной фазовой коррекции и с коррекцией при различных ширинах полосы частот АОС  $\nu_{\text{АОС}}$ . Уменьшение  $\nu_{\text{АОС}}$  проводилось путем введения временной задержки после окончания вычисления управляющих напряжений для АЗ (см. рис.2), при этом время экспозиции оставалось неизменным.

На рис.5 показаны экспериментальная и расчетная зависимости превышения усредненной расходимости лазерного излучения (по уровню 85% мощности) над дифракционным пределом от  $\nu_{\text{АОС}}$ . При расчетном моделировании работы АОС динамика турбулентного волнового фронта восстанавливалась из серии гартманограмм, зарегистрированной в эксперименте с частотой 1,5 кГц, по схеме дискретизации Фрида [11]. В расчетах фазовой коррекции учитывалась задержка по времени между регистрацией волнового фронта и установкой АЗ. Также полагалось, что АЗ идеально воспроизводит измеренный волновой фронт. Видно, что результаты расчетов качественно согласуются с экспериментальными данными. Некоторое количественное расхождение при высоких  $\nu$  вызвано тем, что в расчетах предполагалось идеальное пространственное разрешение АЗ, а при низких  $\nu$  – тем, что вычитание фона на экране камеры в дальней зоне в экспериментах сопровождается некоторой потерей высокоугловых компонент сигнала.

Как следует из рис.5, при работе АОС с конечной шириной полосы частот фазовая коррекция так или иначе неидеальна. В нашем случае колмогоровского спектра флуктуаций центроида коррекция высокоэффективна, когда  $\nu_{\text{АОС}}$  более чем на порядок превышает  $\nu_{\text{turb}}$ : для  $\nu_{\text{turb}} = 60$  Гц это имеет место при  $\nu_{\text{АОС}} \geq 1$  кГц. С уменьшением ширины полосы частот АОС эффективность коррекции снижается. В нашем случае при  $\nu_{\text{АОС}} \leq 100$  Гц эффективность не просто низка, а «отрицательна»: работа АОС вносит дополнительные искажения в лазерный пучок, расходимость которого даже увеличивается относительно исходного уровня.

Итак, создана АОС с использованием ППВМ в качестве основного управляющего элемента, достигнута частота работы АОС 2 кГц, продемонстрирована близкая к идеалу динамическая коррекция турбулентных искажений фазы в характерной для атмосферы полосе частот, а также определен экспериментальный критерий выбора

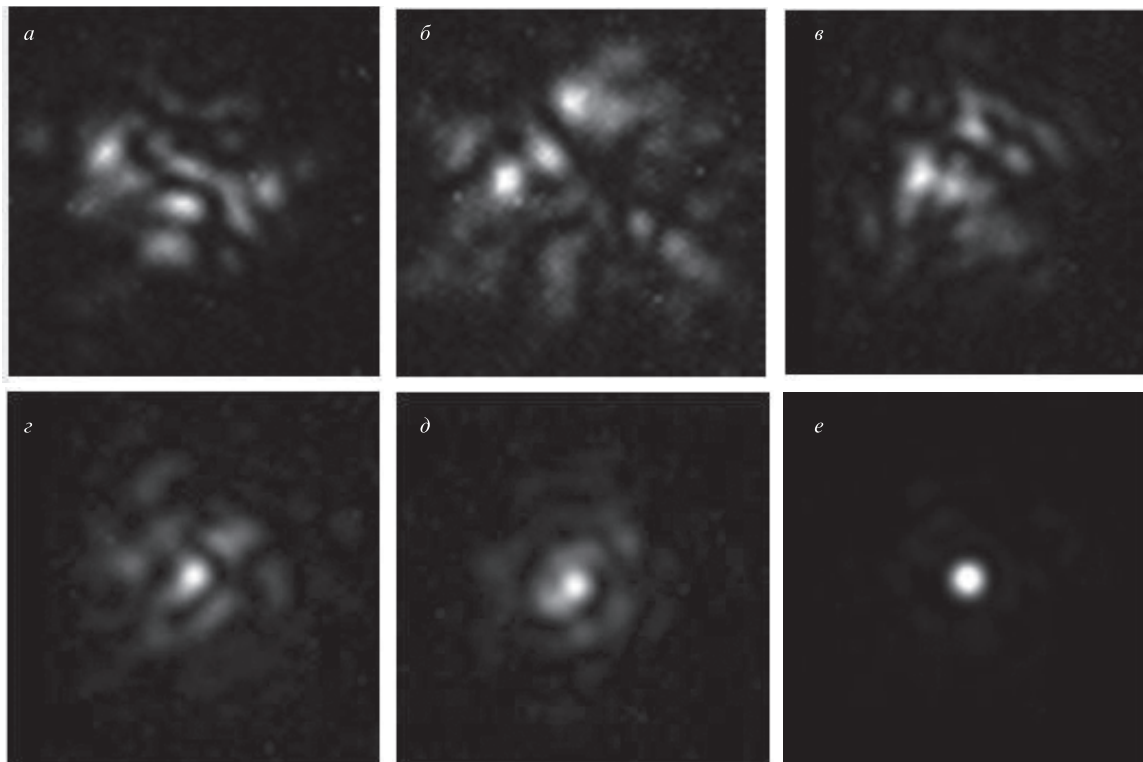


Рис.4. Характерные мгновенные экспериментальные распределения лазерного излучения в дальней зоне в отсутствие коррекции (а) и при коррекции с шириной полосы частот  $\nu_{AOS} = 25$  (б), 100 (в), 200 (г), 500 (д) и 1500 Гц (е).

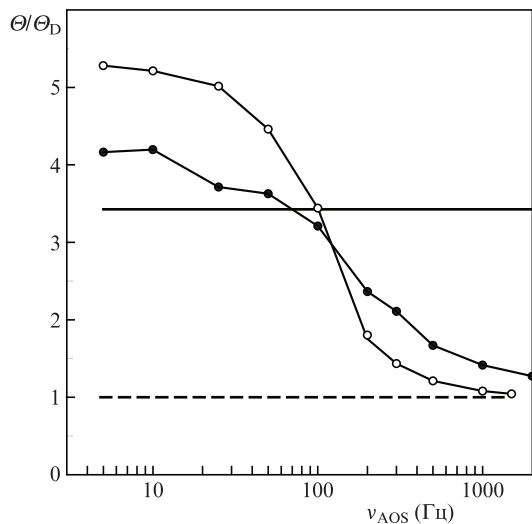


Рис.5. Зависимость от частоты АОС превышения средней расходимости лазерного излучения  $\Theta$  над дифракционным пределом  $\Theta_D$  в эксперименте (●) и в расчете (○). Сплошная горизонтальная линия – уровень исходной расходимости лазерного излучения, штриховая – дифракционный предел.

требуемой частоты АОС в конкретных условиях турбулентности. В дальнейшем мы предполагаем представить в журнал «Квантовая электроника» развернутую статью, детально описывающую проведенные авторами совместные эксперименты.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда (проект № 19-19-00706).

1. Tan X., Wu Z., Liang Z. *Proc. SPIE*, **7284**, 72840G (2009).
2. Lu M., Bagheri M., James A.P., Phung T. *IEEE Access*, **6**, 29865 (2018).
3. Bennet F., Conan R., et al. *Proc. SPIE*, **8447**, 844744 (2012).
4. Huang Q., Liu D., Chen Y., et al. *Opt. Express*, **26**, 13536 (2018).
5. Andrews L.C., Phillips R.L. *Laser Beam Propagation Through Random Media* (Bellingham, WA: SPIE Press, 2005).
6. Rukosuev A.L., Kudryashov A.V., Lylova A.N., Samarkin V.V., Sheldakova Yu.V. *Atmosph. Ocean. Opt.*, **28**, 381 (2015).
7. Kudryashov A., Rukosuev A., Samarkin V., et al. *Proc. SPIE*, **10772**, 107720V (2018).
8. <https://kayacameras.com/product-category/jetcam-high-speed-cameras/>.
9. Fried D.L. *Radio Sci.*, **10**, 71 (1975).
10. Татарский В.И. *Распространение волн в турбулентной атмосфере* (М.: Наука, 1967).
11. Fried D.L. *J. Opt. Soc. Am.*, **67**, 370 (1977).