

КОНФЕРЕНЦИЯ В

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ
В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ**

МАКЕТ АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОРРЕКЦИИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ С ПРОГНОЗИРУЮЩИМ АЛГОРИТМОМ

Большасова Л.А.^{1,2}, Грицута А.Н.^{1,2}, Лавринов В.В.¹, Лукин В.П.¹, Копылов Е.А.¹, Селин А.А.¹,
Соин Е.Л.^{1,2}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

²Томский государственный университет, г. Томск, Россия

e-mail: sla@iao.ru, gan@iao.ru, lvv@iao.ru, luhin@iao.ru, kea@iao.ru

Рассмотрена проблема эффективности адаптивной фазовой коррекции турбулентных флуктуаций оптического излучения в атмосфере. Предложено использование методы прогноза для повышения быстродействия адаптивной оптической системы. Создан макет адаптивной оптической системы на базе малого телескопа Meade. Основным элементом является разработанный датчик волнового фронта Шэка-Гартмана, обеспечивающий измерение фазовых искажений, уровня атмосферной турбулентности и скорости поперечного ветра в канале распространения излучения. При этом позволяет выполнять замену микролинзового раstra с различным фокусным расстоянием, в результате обеспечивая работу системы в различных турбулентных условиях. В докладе будут представлены результаты работы системы адаптивной оптики с прогнозирующим алгоритмом на горизонтальной атмосферной трассе.

Флуктуации показателя преломления турбулентной атмосферы оказывают существенное влияние на фазу и амплитуду распространяющихся в атмосфере световых волн [1]. Вызывая такие хорошо известные эффекты, как размытие, дрожание, мерцание лазерных пучков и оптических изображений. Для компенсации этих негативных эффектов предназначены системы адаптивной оптики (АО). Физически качество изображения зависит от степени сохранности формы фронта оптической волны, поэтому управляя формой волнового фронта излучения, возможно, минимизировать негативное влияние среды распространения. Характерной особенностью систем адаптивной оптики является одновременное выполнение процессов измерения, коррекции и управления. При этом атмосферные адаптивные оптические системы должны работать в реальном масштабе времени.

Принципы функционирования АО систем для коррекции атмосферных искажений волнового фронта оптического излучения основываются на свойствах линейности, взаимности и квазистационарности атмосферы [2]. Требуемые временные характеристики АО системы связаны со временем когерентности атмосферы или с частотой Гринвуда, для горизонтальной трассы определяемой как:

$$\tau = \frac{1}{f_G}, \quad f_G = 0.331 D^{-1/6} \lambda^{-1} (C_n^2 V^2 L)^{1/2} \quad (1)$$

где L - длина горизонтальной атмосферной трассы, D - размер приемной апертуры, λ - длина волны излучения, V - скорость ветра длина волны излучения, C_n^2 - структурная постоянная показателя преломления атмосферы.

Время срабатывания АО системы состоит из времени обработки информации, полученной с датчика волнового фронта, времени вычисления управляющих воздействий на корректор волнового фронта, и времени отработки адаптивного зеркала, включающее инерционность и переходные процессы механической конструкции данного зеркала.

$$\tau_{AO} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \quad (2)$$

Корректирующая поверхность адаптивного зеркала формирует волновой фронт с опозданием на величину представляющую сумму временных задержек, причины которых указаны выше. Поэтому временная ошибка, главная проблема и выделяется как один из основных факторов, способствующих ухудшению характеристик адаптивных оптических систем. Одним из путей решения является оптимизации алгоритма управления адаптивной коррекцией на основе прогностических методов.

В данной работе развивается подход к разработке систем адаптивной оптики для коррекции атмосферных искажений волнового фронта оптического излучения с использованием прогностических методов. Алгоритм прогноза основан на анализе эволюции фазовых флуктуаций на входной апертуре адаптивной системы датчиком волнового фронта, что является возможным в рамках гипотезы «замороженной турбулентности», с последующим использованием этой информации в алгоритме статистического прогнозирования [3].

В докладе представлена практическая реализация макета мобильной системы адаптивной оптики, на базе малого телескопа работающей по лазерному источнику на горизонтальной трассе. На рисунке 1 и 2 изображены разработанный макет АО системы в CAD программе и реальная фотография. Конструктивно макет адаптивной оптической системы собран на оптической плите, жестко прикрепляемой к телескопу Meade LX200. Приемная апертура телескопа равна 305 мм. Основным элементом созданного макета АО системы является разработанный датчик волнового фронта Шэка-Гартмана (ДВФ Ш-Г), который обеспечивает измерение эволюции фазовых флуктуаций в канале распространения излучения, то есть одновременное определение не только флуктуаций фазы, но и оптической турбулентности и скорости ветра [4]. Идеология использования ДВФ Ш-Г для оценки атмосферной турбулентности в канале распространения излучения основана на применении дифференциального метода, а динамики фазовых флуктуаций, то есть поперечной

составляющей скорости ветра, на корреляционной методике. Теоретическое обоснование их использования в датчике волнового фронта Шэка-Гартмана можно найти в работе [5].

Для коррекции турбулентных искажений используется адаптивной зеркало - корректор наклонов волнового фронта, также разработанный в лаборатории когерентной и адаптивной оптики ИОА СО РАН [6]. Отметим, что теоретические и экспериментальные исследования показывают, что дисперсия фазы светового пучка, распространяющегося в турбулентной атмосфере, на круглой апертуре более чем на 80 % определяется именно средними наклонами. По этой причине компенсация наклонов волнового фронта является необходимым при работе АО систем на атмосферных трассах.

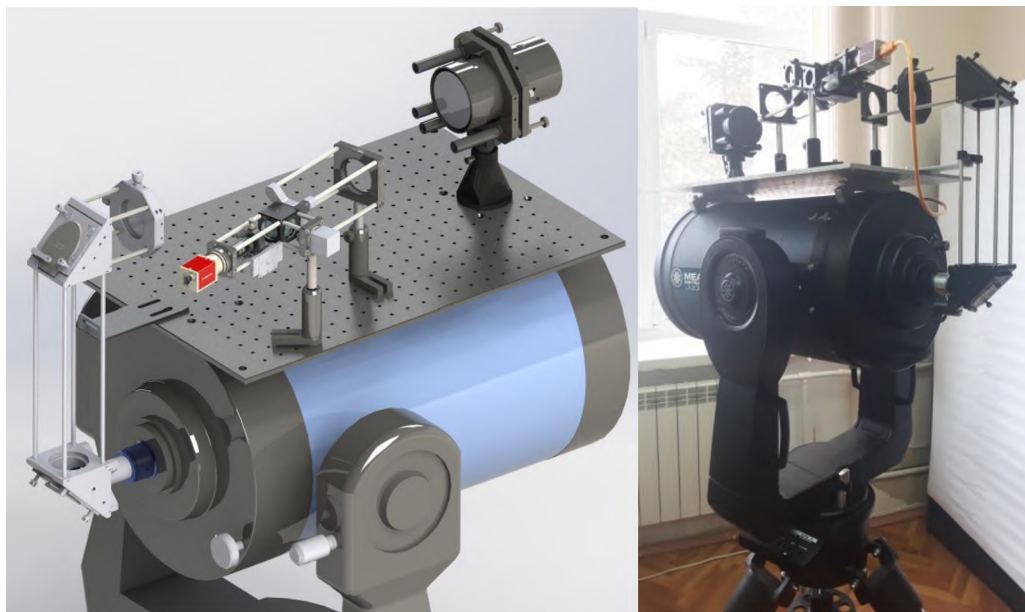


Рисунок 1 — Макет адаптивной оптической системы на базе малого телескопа

Кроме усовершенствованной алгоритмической части, ДВФ позволяет достаточно простую замену микролинзового раstra с различным размерами микролинз и фокусным расстоянием от 3000 мкм до 5 см, с последующими необходимыми юстировками, при этом ДВФ изготовлен из типовых промышленно выпускаемых оптомеханических элементов. Поскольку диапазон измеряемых значений датчиком волнового фронта Ш-Г определяется угловыми полем зрения ДВФ или максимальными/минимальными регистрируемыми угловыми смещениями изображения каждой микролинзы, т.е. чувствительностью и динамическим диапазоном.

Чувствительность ДВФ Ш-Г определяется как [7]:

$$\delta y_{x,\min} = \frac{p}{q f_{ML}} \quad (2)$$

где f_{ML} - фокусное расстояние микролинзы, p - размер пикселя, q - константа. В реальном ДВФ данный параметр будет определяться шумовой составляющей матрицы камеры.

Динамический диапазон ДВФ Ш-Г определяется как [8]:

$$\delta y_{x,\max} = \frac{d_x}{2f_{ML}} - 1.22 \frac{\lambda}{d_s} \quad (3)$$

Где d_x - размер микролинзы, d_s - расстояние между микролинзами. В результате замена микролинзового раstra с различным размером микролинз и фокусного расстояния, позволяет обеспечить функционирование ДВФ в широком диапазоне изменения аберраций волнового фронта, и как следствие турбулентных характеристик атмосферы.

Отметим, что атмосферные адаптивные оптические системы проектируются индивидуально, поскольку параметры и требования к основным элементам системы – датчику и корректору волнового фронта зависят от турбулентных условий атмосферы места расположения системы. В то же время при разработке лазерных систем, работающих на горизонтальных трассах часто нет возможности длительных атмосферных измерений. Созданная АО система позволит выполнять измерение уровня оптической турбулентности атмосферы, и замену микролинзового раstra с соответствующими параметрами, что в результате обеспечивает ее функционирование в различных турбулентных условиях атмосферы.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 17-79-20077 “Прогностические методы для атмосферных адаптивных оптических систем коррекции турбулентных флуктуаций”.

1. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной среде/ Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 548 с.
2. Лукин В.П. Атмосферная адаптивная оптика./М: Наука, 1967. 248 с.
3. Лавринов Динамическое управление адаптивно-оптической коррекцией турбулентных искажений лазерного излучения // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 10. С. 893–901.
4. Bolbasova L.A., Bolbasova, Gritsuta A. N., Kopylov E. A., Lavrinov V. V., Lukin V. P., Selin A. A., Soin E. L. Shack-Hartmann wavefront sensor for phase distortions, wind speed and Fried parameter estimations // Proc. SPIE 2019. V. 11208. P. 112080Y-1-7
5. Антошкин Л.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П. Дифференциальный метод в измерении параметров турбулентности и скорости ветра датчиком волнового фронта. // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 01. С. 75-80.
6. L. V. Antoshkin, A. G. Borzilov, V. V. Lavrinov, and L. N. Lavrinova Program–hardware complex for optical beams formation with modeled tilt angels // Proc. SPIE 2017. V. 10466, 104660X -1-8
7. Curatu C., Curatua G., Rolland J. Fundamental and specific steps in Shack-Hartmann wavefront sensor design // Proc. SPIE 2006. V. 6288, P. 628801-1 -9
8. ICO 15367-2-2012 Laser and laser-related equipment. Test methods for determination of the shape of a laser beam wavefront. Part 2. Shack-Hartmann sensors, 2013