

Обзор современных технологий измерения, прогнозирования и коррекции турбулентных искажений в оптических волнах

В.П. Лукин¹, И.П. Лукин¹

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
634055, Россия, г. Томск, пл. Академика Зуева, д. 1

Аннотация

Данная работа представляет собой аналитический обзор составных частей современной технологии создания систем адаптивной оптики для коррекции искажений оптических волн при распространении в турбулентной атмосфере. Работа состоит из следующих частей: описания техники, обеспечивающей измерения флуктуаций оптических волн на атмосферных трассах, теоретических расчётов флуктуаций методами аналитического анализа и математического моделирования, технологии прогноза турбулентного движения воздуха путём численного решения уравнений Навье–Стокса и, наконец, построения систем адаптивной оптики, компенсирующих турбулентные искажения в оптико-электронных системах формирования изображения и лазерных пучков излучения. Акцентировано внимание к особенностям флуктуаций специально создаваемых Лагерр–Гауссовых и Бессель–Гауссовых пучков излучения. Показаны особенности распространения вихревых Лагерр–Гауссовых и вихревых Бессель–Гауссовых пучков для переноса орбитального углового момента через турбулентную среду. Обнаружен эффект относительного ослабления флуктуаций фазы и интенсивности безвихревых Бессель–Гауссовых пучков по сравнению с аналогичными характеристиками Гауссовых пучков. Отмечается наличие высокой чувствительности интегрального масштаба степени когерентности вихревых Бессель–Гауссовых пучков и вихревых конических волн, в отличие от радиуса когерентности этих пучков и волн, к влиянию атмосферной турбулентности. Приведены сведения о возможности построения систем адаптивной оптики для крупноапертурного солнечного телескопа, работающего в условиях сильной атмосферной турбулентности.

Ключевые слова: оптические волны, измерения атмосферной турбулентности, флуктуации, Лагерр–Гауссовы пучки, Бессель–Гауссовы пучки, адаптивная коррекция.

Цитирование: Лукин, В.П. Обзор современных технологий измерения, прогнозирования и коррекции турбулентных искажений в оптических волнах / В.П. Лукин, И.П. Лукин // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 1. – С. 68-80. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1355.

Citation: Lukin VP, Lukin IP. Overview of modern technologies for measuring, predicting and correcting turbulent distortions in optical waves. Computer Optics 2024; 48(1): 68-80. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1355.

Введение

Известно, что современные оптико-электронные системы (ОЭС) при работе в случайно-неоднородных средах, таких как атмосфера, ввиду технического несовершенства своих составляющих элементов и возмущающего действия случайных неоднородностей случайных сред на трассах распространения практически не реализуют своей предельной эффективности [1]. В то же время интенсивное применение ОЭС для передачи информации, узконаправленной транспортировки энергии электромагнитного излучения, формирования изображения в реальных условиях делают актуальным развитие методов и устройств анализа, прогноза и коррекции искажений, включая применение адаптивных систем, представляющих собой наиболее радикальные средства борьбы со снижением этой эффективности. Применительно к системам, работающим в случайно-неоднородных средах, таких как земная атмосфера, основными искажающими факторами, наряду с

атмосферной рефракцией, молекулярным поглощением и аэрозольным рассеянием света, являются крупномасштабные случайные неоднородности показателя преломления воздуха.

Известно, что системы адаптивной оптики (АО), компенсирующие действия этих неоднородностей атмосферы, позволяют улучшить фокусировку лазерного излучения и увеличить интенсивность в фокальном пятне; уменьшить расплывание, повысить чёткость изображений в астрономических телескопах, а также снизить вероятность ошибки в задачах распознавания объектов; повысить скорость передачи информации в системах оптической связи. При этом в создании самих систем АО существуют несколько обязательных этапов исследования, а именно, этапы измерения турбулентных искажений, прогнозирования флуктуаций на основе численного моделирования и расчётов, а также собственно этап, связанный с созданием системы АО. Настоящий обзор, основанный в основном на работах Института оптики атмосферы СО РАН, является попыткой структуризации всех не-

обходимых работ и исследований на пути создания современных систем АО.

Ранее в работе [2] уже делалась попытка описать задачи необходимых исследований атмосферы, однако там не было описания этапа прогнозирования и реализации самих систем АО.

1. Этап измерения турбулентных искажений, реализуемый с использованием семейства дифференциальных измерителей турбулентности

Начнём с этапа разработки и применения измерителей турбулентности. Назначение этой технологии заключается в оценке влияния турбулентности атмосферы на качество видения через атмосферу различных оптических источников, включая внеатмосферные источники, при анализе работы сложных оптических систем на полигонах, в аэропортах, при выборе места установки астрономических инструментов (телескопов), при испытаниях современной оптико-электронной аппаратуры, при создании систем адаптивной оптики с целью минимизации искажающего воздействия турбулентности на работу сложных оптических систем.

Для построения измерителя параметров атмосферы был выбран принцип дифференциальных измерений флуктуаций углов прихода оптической волны на системе [3–6] апертур. Дифференциальный измеритель турбулентности (ДИТ) предназначен для измерения дисперсии флуктуации углов прихода двух изображений одного и того же источника, полученных с помощью двух пространственно разнесённых входных субапертур, расположенных перед объективом телескопа. Интенсивность турбулентности, характеризующая параметром Фрида [1, 7], определяется из величины дисперсии разности угловых смещений энергетических центров тяжести изображений от двух (трёх или четырёх) субапертур. Именно этот параметр является важнейшим и для оценки уровня фазовых флуктуаций, и для построения систем АО, определяя размер субапертуры и величину угла изопланатизма атмосферы на трассе распространения оптической волны. В параграфе 1 будет описано семейство дифференциальных измерителей турбулентности [5, 8, 9], созданных в период 2003–2022 гг. в Институте оптики атмосферы СО РАН (ИОА СО РАН).

1.1. Трассовая модификация измерителя

Типовой дифференциальный измеритель турбулентности (ДИТ) [5, 8, 9] состоит, как правило, из следующих составляющих: малый астрономический телескоп с оптическими клиньями на нескольких субапертурах, оптическая система переноса изображений из фокальной плоскости телескопа в плоскость фотоматрицы видеокамеры; устройство регистрации двух (трёх или четырёх) изображений на базе видеокамеры “PROSILICA” с разрешением 640×480 элементов с частотой взятия кадра 198 Герц; устройство обработ-

ки изображений и вычисления дисперсии и корреляционных функций флуктуаций углов прихода на базе персонального компьютера с пакетом программ.

На рис. 1 представлена типовая структурная схема дифференциального измерителя ДИТ, где обозначены: 1 – лазерный источник; 2 – атмосферная трасса; 3, 4 – оптические клинья; 5 – телескоп; 6 – микролинзовый растр; 7 – масштабирующая оптика; 8 – видеокамера; 9 – линия связи; 10 – вычислитель; 11 – накопитель данных; 12 – дисплей.

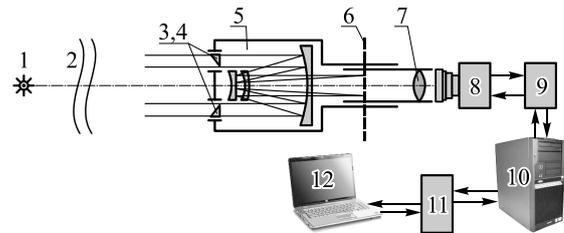


Рис. 1. Структурная схема дифференциального измерителя ДИТ с двумя субапертурами

Для вычисления уровня интегральной турбулентности, характеризуемой величиной параметра Фрида r_0 , используется [1, 3, 5, 7] дисперсия $\sigma_{\alpha_1-\alpha_2}^2$ измеренных разностей локальных наклонов волнового фронта между двумя пространственно разнесёнными субапертурами. Измеренная дисперсия $\sigma_{\alpha_1-\alpha_2}^2$ усредняется по ансамблю большого количества изображений. Расчёт параметра Фрида выполняется согласно формуле [3]:

$$r_0 = 0,528(\sigma_{\alpha_1-\alpha_2}^2)^{-3/5} \lambda^{6/5} D^{-1/5} \times [1 - 0,526(d/D)^{-1/3}]^{3/5}. \quad (1)$$

Здесь λ – длина волны излучения, D – размер субапертуры, d – расстояние между центрами субапертур.

Были разработаны две модификации измерителя ДИТ на базе астрономического телескопа ТАЛ-200К: для трассовых измерений в атмосфере и для измерений на наклонных трассах (по звёздам). В результате проведённых испытаний было показано, что ДИТ может измерять: среднюю рефракцию оптической волны, средний уровень турбулентности по протяжённой трассе, а также вектор (две компоненты) скорости ветра [5, 8, 9]. Трассовая модификация была внедрена в научные исследования в 2006–2008 гг.

Как показали результаты сравнительных измерений турбулентности атмосферы оптическим методом, реализованным в ДИТ, и акустическими измерениями ультразвуковыми метеостанциями, диапазон измеряемых значений интенсивности турбулентности, характеризующей с помощью так называемой структурной характеристики турбулентности атмосферы [1] C_n^2 , лежит в интервале $3,7 \times 10^{-16} \text{ м}^{-2/3} - 3,5 \times 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$.

Относительная погрешность, приведённая к минимальному измеряемому значению структурной постоянной показателя преломления, равна $\pm 35\%$ при

относительной погрешности измерения длины трассы, равной 4%. С увеличением значения структурной постоянной показателя преломления погрешность измерений уменьшается. Абсолютная погрешность измерений равна $\pm 1,3 \times 10^{-16} \text{ м}^{-2/3}$.

В период с 2006 по 2012 годы измеритель ДИТ был внедрён в научные исследования на целом ряде предприятий РФ: в НПО «Алмаз» – в качестве бортового измерителя (2005 г.), в НПО «Астрофизика» – в качестве трассового измерителя атмосферы (2006–2007 гг.), в НИП «Радуга» – для испытания специальных лазерных систем (2008 г.), в ИПФ РАН (г. Нижний Новгород) – для научных исследований (2012 г.) и в фирме «Визионика» – для тестирования лазерной техники (2010 г.).

1.2. Измеритель уровня оптической турбулентности и скорости ветра

Дифференциальный измеритель способен, кроме измерения уровня турбулентности [10–14], производить измерения и скорости ветра. Величина скорости ветра является также одним из наиболее важных параметров атмосферной турбулентности для построения системы АО, определяя требования к динамическим характеристикам систем АО [7]. В рамках выполнения гранта РНФ № 17-79-20077 (2017–2020 гг.) был создан [8, 9] измеритель дрожания изображения, который даёт одновременно измерения текущего распределения фазового фронта, оценку уровня оптической турбулентности и средней скорости ветра по трассе распространения излучения. В основе этого измерителя лежит техника датчика Шэка–Гартмана [10, 14]. Датчик способен обеспечить измерения в реальном масштабе времени фазового профиля волнового фронта излучения видимого и ближнего ИК-диапазона длин волн с точностью до 0,05 длины волны с частотой не ниже 200 Гц, разложение этого профиля по ортогональным полиномам (до 35 номера), измерение интегрального значения радиуса когерентности поля (радиуса Фрида) и двух поперечных компонентов вектора скорости ветра в диапазоне от 0,5 до 10 м/с. Разработка удостоена диплома конкурса 2019 года Лазерной ассоциации РФ.

1.3. Измеритель турбулентности для работы со слабыми источниками света

Для работы с использованием слабого внеатмосферного источника – типа звезды был создан [14] ещё один оптический измеритель. Макет измерителя построен на базе телескопа MEADE с использованием ФЭУ и специального устройства, обеспечивающего регулируемое пропускание света в интервале от 1% до 100%, что позволяет реализовать измерения следующего функционала:

$$\rho_x = \iint dx dy x I(x, y) / \iint dx dy I(x, y). \quad (2)$$

Здесь ρ_x – координата центра тяжести изображения источника света, $I(x, y)$ – интенсивность оптического излучения.

Измеряемые смещения оптического изображения источника света в фокальной плоскости телескопа пересчитываются [15–17] в значения интегрального по трассе распространения уровня атмосферной турбулентности.

Были проведены натурные испытания оптического измерителя, установленного на малом астрономическом телескопе MEADE LX90 (диаметр входной апертуры – 256 мм). Оптические измерения уровня турбулентности сопровождались измерениями уровня турбулентности в плоскости входной апертуры телескопа с помощью акустической метеостанции АМК-03. На рис. 2 приведены результаты синхронных измерений [15] временного хода интегральной турбулентности, получаемые по данным метеостанции (обозначено квадратиками) и по дрожанию изображения Полярной звезды (обозначено кружками). Сравнение данных оптических и акустических измерений показывает их высокую корреляцию.

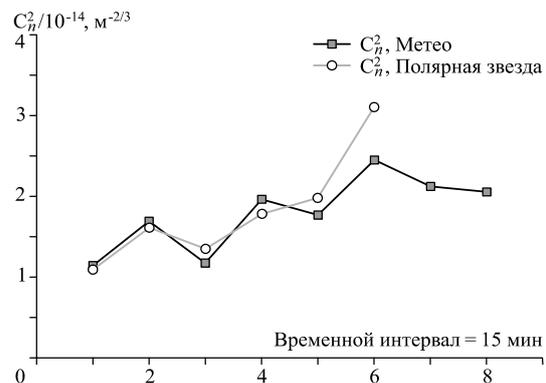


Рис. 2. Соответствие оптических и акустических измерений уровня турбулентности

Весь временной интервал измерений составил 15 минут. Измеритель позволяет получать данные по турбулентности для наклонных трасс, даст возможность детектировать наличие турбулентных слоев в атмосфере [7, 16], в том числе обеспечит работу с использованием сигнала от лазерной опорной звезды.

1.4. Измеритель ДИТ-М для работы на протяжённых трассах

Следующим этапом стало построение [16] ДИТ-М – дифференциального измерителя уровня турбулентности на базе малого астрономического телескопа Celestron 150 и видеокамеры МАКО, который может быть использован при проведении испытаний ОЭС, в астрономических обсерваториях, на станциях для оптических наблюдений.

Новый измеритель ДИТ-М использует корреляционный алгоритм (рис. 3) определения центра тяжести изображения, что обеспечивает измерения уровня турбулентности на более протяжённых трассах по

сравнению с уже существующими приборами, например, с измерителем ДИТ.

В 2022 году было выполнено экспериментальное сравнение трёх оптических измерителей уровня турбулентности атмосферы.

На рис. 4 приведены результаты измерения уровня турбулентности атмосферы, выполненные [16] на трассах протяжённостью до 600 м с использованием измерителей ДИТ и ДИТ-М. Данные, получаемые измерителем ДИТ, более высокочастотные, а данные, получаемые от измерителя ДИТ-М, представлены более плавной кривой. На рис. 4 приведены данные, соответствующие интегральному значению уровня турбулентности для горизонтальной трассы протяжённостью 600 м. На рис. 4 время указано в секундах.

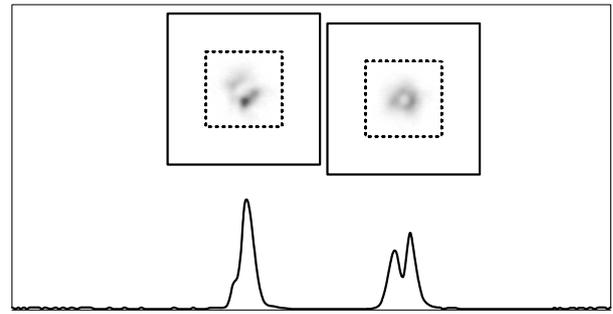


Рис. 3. Фото с экрана компьютера при вычислении относительного смещения двух изображений при использовании корреляционного алгоритма слежения. В нижней части приведены сечения интенсивности двух изображений

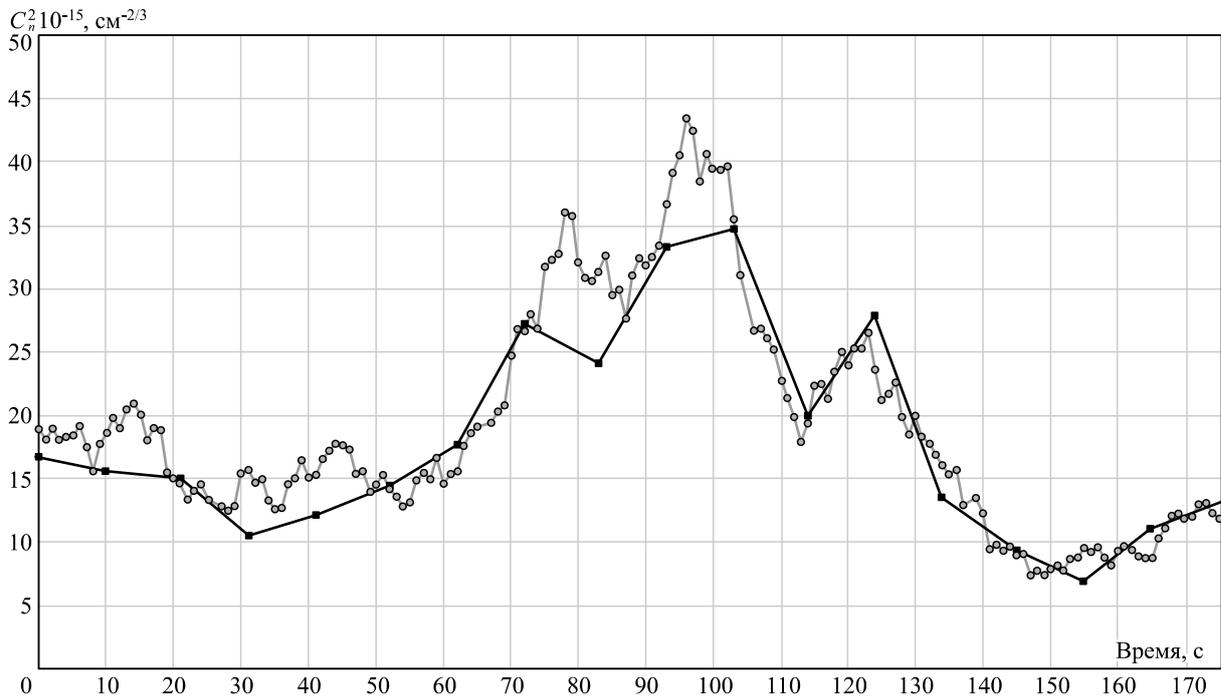


Рис. 4. Результаты синхронных измерений интегрального уровня турбулентности с помощью ДИТ и ДИТ-М

2. Технология прогнозирования и визуализации турбулентных движений воздуха внутри куполов телескопов, лазерных комплексов и других закрытых помещений на основе измерений термодинамических параметров и решения уравнений Навье–Стокса

Для реализации этой технологии используется решение системы уравнений Навье–Стокса, описывающих динамику газовой среды (воздуха) [18], с использованием данных предварительных прямых измерений параметров атмосферы с помощью переносных метеорологических систем. Совместно с ИМКЭС СО РАН разработано [19] математическое обеспечение для новой системы АМК-03-4.

Такая технология позволяет [18, 20–25] описать эволюцию движения воздушных масс как внутри закрытых помещений, так и в открытом пространстве.

Было описано движение воздуха в куполах крупных российских телескопов – БТА (САО РАН), БСВТ (ИСЗФ СО РАН), АЗТ-33, АЗТ-34ИК и других, а также в замкнутых помещениях крупных лазерных комплексов, в том числе внутри Сибирской лидарной станции высотного зондирования атмосферы ИОА СО РАН (г. Томск). Также получено, что результаты решения краевых задач для уравнений Навье–Стокса в приближении Буссинеска [18] с граничными условиями из экспериментально измеренных данных воспроизводят и позволяют визуализировать картину вихревых воздушных потоков в замкнутых помещениях, согласующуюся с результатами экспериментов.

Одним из важных результатов применения технологии стало обнаружение и прогнозирование внутри больших научных помещений, где формируется оптическое излучение, как устойчивых вихревых движений воздуха, так и их проявлений. В частности, по-

казано, что в замкнутых помещениях увеличение температурного разнообразия поверхностей (форм, размеров, степени нагрева участков) приводит к удлинению начального участка степенного инерционного интервала частотного спектра флуктуаций температуры с показателем степени « $-5/3$ », что соответствует колмогоровской турбулентности, а уменьшение разнообразия – показателю степени « $-8/3$ » и когерентной турбулентности [26 – 30].

Экспериментальные исследования выявили условия возникновения различных режимов турбулентности над территориями обсерваторий и в замкнутых специализированных помещениях астрономических телескопов. Выявлено влияние типа подстилающей поверхности и направления скорости ветра на режим возникновения когерентной турбулентности, причиной появления которой является горный рельеф и неоднородность нагрева подстилающей поверхности. Проведенные [20, 30] исследования позволяют: смоделировать процессы формирования турбулентности как в окрестностях расположения астрономических телескопов в обсерваториях, так и внутри замкнутых помещений телескопов; тестировать в стационарных условиях оптические характеристики телескопов; проанализировать влияние конструктивных особенностей телескопа и температурного режима его оптических элементов на устойчивость воздушной среды.

Результаты численных экспериментов с использованием экспериментальных данных подтверждают зарегистрированные в экспериментах картины вихревых движений воздуха в замкнутых помещениях, вызванные температурными градиентами помещений, обусловленные неравномерностью их нагрева. Вихревые конфигурации определяются геометрией помещения и местоположением участков нагрева. Эксперимент и моделирование показывают, что в замкнутых помещениях телескопов наблюдаются удивительные крупные вихри (когерентные структуры), распад которых порождает когерентную турбулентность. Когерентная турбулентность по сравнению с колмогоровской обеднена мелкомасштабными неоднородностями, поэтому в замкнутых помещениях можно ожидать ослабления фазовых флуктуаций оптического излучения и, следовательно, улучшения оптических изображений [29].

Разработанная технология [20, 30] позволяет определить условия формирования когерентной турбулентности над территориями и в замкнутых помещениях телескопов выбранных обсерваторий. Поскольку в условиях когерентной турбулентности вследствие ослабления флуктуаций оптического излучения качество изображений в телескопе улучшается, результаты могут быть использованы для выбора оптимального времени наблюдений. Решение краевых задач на основе экспериментальных данных позволяет восстановить распределение параметров турбулентности в подкупольном помещении, а также

выполнить анализ влияния форм конструкций, температурных режимов элементов на качество изображений. Это позволяет тестировать оптические характеристики как уже действующих, так и проектируемых оптических инструментов, включая минимизацию влияния турбулентности. Проведённые исследования необходимы для прогноза искажений оптического излучения на оптической трассе в подкупольном помещении, что позволяет прогнозировать эффективность телескопа. Анализ, оценка и тестирование могут быть востребованы в практической астрономии в связи с высокой стоимостью современных телескопов.

3. Флуктуации оптических волн при распространении в турбулентных средах

Ещё одним необходимым этапом при создании систем АО является предварительное численное моделирование и проведение аналитических расчётов флуктуаций оптических волн в турбулентной среде. При этом можно использовать описание случайной среды как посредством его модельного построения [21], так с применением имитационного математического моделирования [31 – 33]. Оба эти подхода используются для прогноза ожидаемых флуктуаций при построении сценария работы оптической системы или комплекса.

Для компьютерного моделирования нами [31] традиционно используется самый популярный на сегодняшний день вычислительный метод – быстрое преобразование Фурье в сочетании с двухциклическим алгоритмом расщепления волнового уравнения. Теоретическое исследование динамического процесса распространения скалярных волновых пучков в атмосфере осуществляется путём совместного решения системы уравнений для комплексной амплитуды оптической волны (в том числе и лазерного пучка) и нестационарного уравнения ветрового переноса среды вектором скорости $V(V_x, V_y)$. Трасса распространения вдоль оси Oz , согласно применяемому при расчётах методу расщепления, разбивается на дискретные участки, число которых в численных экспериментах варьируется в зависимости от параметров задачи. Случайные вариации показателя преломления, вызванные атмосферной турбулентностью, задаются в виде дискретного набора слоёв. Фазовые возмущения в каждом слое полагаются статистически независимыми, однородными и изотропными случайно-неоднородными двумерными полями со степенной колмогоровской моделью [1, 21] спектральной плотности показателя преломления в виде модификации:

$$\Phi_n(\kappa) = 0,033C_n^2 (\kappa_L^2 + \kappa^2)^{-11/6} \exp(-\kappa^2/\kappa_m^2). \quad (3)$$

Здесь C_n^2 – структурная характеристика турбулентности атмосферы, κ_L и κ_m – волновые числа внешнего и внутреннего масштабов турбулентности соответственно.

3.1. Особенности флуктуаций Лагерр–Гауссовых пучков в турбулентной среде

В настоящее время в научной литературе [31–44] особое внимание уделяют двум видам волновых Гауссовых пучков (Г-пучков) излучения: Лагерр–Гауссовых и Эрмит–Гауссовых. Поскольку Лагерр–Гауссовы пучки (ЛГ-пучки) являются собственными функциями параболического уравнения, описывающего распространение волны, они обладают свойством инвариантности с точностью до масштаба при свободном распространении. Двумерное распределение интенсивности таких пучков в поперечном сечении имеет вид либо одного кольца, либо набора колец, вложенных друг в друга. В практике сингулярной оптики эти пучки используются как стандартные модели вихревых пучков. Благодаря радиальной симметрии таких пучков, значение топологического заряда совпадает с величиной полного орбитального углового момента (ОУМ) и сохраняется при распространении в однородной среде.

В работе [37] вопрос коррекции турбулентных флуктуаций фазы вихревых пучков на атмосферных трассах изучался на основе компьютерного моделирования. Рассмотрены флуктуации ОУМ в когерентных ЛГ-пучках в замкнутом контуре адаптивной системы с фазовым сопряжением опорной волны. Показана возможность расширения диапазона применения вихревых пучков в приложениях атмосферной оптики в условиях умеренно-сильной турбулентности. Было отмечено, что флуктуации ОУМ возникают в случайно-неоднородной среде вне зависимости от наличия у лазерного пучка топологического заряда. В то же время флуктуации ОУМ ослабевают при увеличении радиального порядка ЛГ-пучков, что даёт многокольцевым пучкам преимущество перед Г-пучками на атмосферных трассах.

Так, методом компьютерного моделирования изучалась теоретическая возможность коррекции амплитудно-фазовых искажений лазерных ЛГ-пучков на атмосферных трассах. Используется схема динамической адаптивной коррекции по принципу фазового сопряжения опорной волны от вспомогательного когерентного источника. Путём численного решения неоднородного параболического волнового уравнения моделируется распространение пучков в случайно-неоднородной среде со степенным пространственным спектром, характерным для атмосферной турбулентности. Было рассмотрено влияние турбулентности атмосферы на флуктуации ОУМ вихревых ЛГ-пучков, теоретически показана возможность и оценена эффективность коррекции этих флуктуаций с помощью адаптивной оптической системы фазового сопряжения опорной волны.

3.2. Особенности флуктуаций Бесселевых и квази-Бесселевых оптических пучков в турбулентной среде

Гауссовы оптические пучки [45], а также предельные формы оптических волн – плоская и сферическая

волны [1], не охватывают всех возможных видов распределения полей оптических пучков. При изучении распространения оптических пучков в однородных и случайно-неоднородных средах уделяется особое внимание пучкам различного функционального вида [46–49]. Это связано с поиском оптических пучков, чей функциональный вид наиболее адекватно соответствовал бы решению конкретной проблемы передачи информации или транспортировки энергии оптическим излучением. Обусловлен данный интерес тем, что при современном уровне развития квантовой электроники появилась возможность оптимизировать не только параметры оптических пучков для достижения максимальной эффективности разрабатываемых ОЭС, но и сам функциональный вид оптических пучков выбирать также оптимальным образом.

В настоящее время широко изучаются свойства оптических пучков, сохраняющих свой функциональный вид при распространении в свободном пространстве [50–53]. Отметим, что из множества различных типов оптических пучков семейство инвариантных пучков Гельмгольца вызывает особый интерес [54]. Данное семейство для трёхмерного волнового уравнения состоит из четырёх основных типов пучков: косинусных, Бесселя [55–60], Матье и параболических. Из этого семейства наиболее активно изучаются Бессель–Гауссовы пучки (БГ-пучки) [61, 62], которые из этой совокупности пучков выделяются наличием аксиальной симметрии. БГ-пучки в некоторой пространственной области обладают свойством инвариантности, т.е. сохраняют при распространении не только свой функциональный вид, но и исходные значения параметров («бездифракционные» пучки [57]). Кроме того, известно также, что частично когерентные вихревые оптические пучки могут иметь дислокации как для самого оптического поля, так и для его функции взаимной когерентности второго порядка [63–65].

При рассмотрении распространения когерентного вихревого Бессель–Гауссова оптического пучка в среде его начальное распределение поля при $x=0$ записывается в виде [58]:

$$U_0(\mathbf{p}) = U_0(\rho, \varphi) = E_0 \exp\left(-\frac{\rho^2}{2a_0^2} - \frac{ik}{2R_0}\rho^2\right) J_m(\beta\rho) \exp(im\varphi), \quad (4)$$

где E_0 – амплитуда поля пучка; a_0 – радиус Гауссова фактора поля пучка; R_0 – радиус кривизны параболического волнового фронта; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число оптического излучения; λ – длина волны оптического излучения в вакууме; $\beta = \sqrt{k^2 - k_x^2}$ – компонента волнового вектора, ортогональная оси Ox (параметр Бесселева фактора поля пучка, скалярная величина с размерностью m^{-1}); k_x – компонента волнового вектора по направлению оси Ox ; $\mathbf{p} = \{y, z\} = \{\rho, \varphi\}$ – поперечная к направлению распространения оптического

излучения пространственная координата; $\rho = \sqrt{y^2 + z^2}$ и $\varphi = \arctan(y/z)$ – модуль и аргумент этой координаты; m – топологический заряд вихревого пучка (параметр Бесселева фактора пучка, безразмерная скалярная величина, целое число); $J_m(\cdot)$ – функция Бесселя первого рода m -го порядка.

Оптический элемент, называемый аксиконом [66, 67], создаёт не фокус, а фокальную линию [68–72]. Дополнительные возможности применения для аксикона возникают при совместном использовании его вместе со спиральной фазовой пластиной [73–75]. Два этих устройства позволяют сформировать бездифракционные вихревые псевдо-Бесселевы пучки (пБ-пучки), именуемые вихревыми коническими волнами (КВ) [76–79]. Для вихревой конической оптической волны, формируемой из Г-пучка после прохождения через коническую линзу (аксикон) и спиральную фазовую пластину, начальное распределение поля ($x=0$) имеет следующий вид [80]:

$$U_0(\mathbf{p}) = U_0(\rho, \varphi) = E_0 \exp\left(-\frac{\rho^2}{2a_0^2} - \frac{ik}{2R_0}\rho^2\right) \times \exp\left(-\frac{\rho^2}{2a_a^2} - i\beta\rho\right) \exp(im\varphi), \quad (5)$$

где a_a – радиус апертуры аксикона ($a_a \gg a_0$); $\beta_c = k \sin(\gamma)$ – параметр конической оптической волны (поперечная составляющая волнового вектора, определяемая отклонением оптических лучей аксиконом в радиальном направлении); $\sin(\gamma) \cong (n_a - 1)\alpha$; γ – угол наклона оптических лучей к оси симметрии аксикона; n_a – показатель преломления среды конической линзы (аксикона); α – угол наклона прямолинейной образующей аксикона.

В статье [81] представлены результаты теоретических исследований флуктуаций фазы безвихревого (фундаментального) ($m=0$) БГ-пучка, распространяющегося в турбулентной атмосфере. В этой работе методом плавных возмущений [1] проведён расчёт дисперсии флуктуаций фазы безвихревого БГ-пучка (4) в турбулентной атмосфере с колмогоровским спектром флуктуаций показателя преломления воздуха и конечным значением внешнего масштаба атмосферной турбулентности (3). Показано, что дисперсия флуктуаций фазы на оптической оси безвихревого БГ-пучка при распространении в турбулентной атмосфере всегда меньше аналогичной характеристики плоской оптической волны (эффект относительного ослабления флуктуаций фазы безвихревого БГ-пучка по сравнению с плоской волной).

На рис. 5а представлено поведение дисперсии флуктуаций фазы безвихревого Бесселева ($a_0 \rightarrow \infty$ и $R_0 \rightarrow \infty$) пучка $\sigma_{S_{bb}}^2(0)$, нормированной на дисперсию флуктуаций фазы плоской волны $\sigma_{S_{pw}}^2$ [1], в зависимости от величины нормированного параметра Бесселева пучка $\tilde{\beta} = \sqrt{x/k}\beta$ при различных значениях нормированного волнового числа, соответствующего

внешнему масштабу атмосферной турбулентности L_0 , $\tilde{\kappa}_L = \sqrt{x/k}\kappa_L$: $\tilde{\kappa}_L = 1,0$ (1), 0,1 (2), 0,01 (3) и 0,001 (4), где x – расстояние от источника до приёмника.

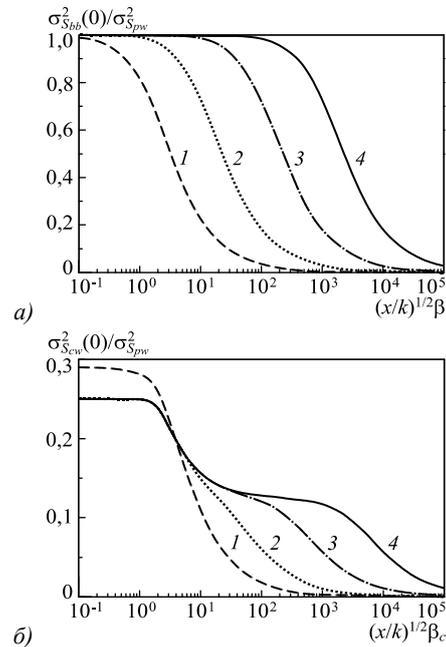


Рис. 5. Отношение дисперсий флуктуаций фазы на оптической оси безвихревых Бесселева пучка (а) и конической волны (б) к дисперсии плоской волны

Хорошо видно (см. рис. 5а), что чем больше параметра $\tilde{\beta}$ и $\tilde{\kappa}_L$, тем заметнее относительное ослабление флуктуаций фазы в безвихревом Бесселевом пучке (Б-пучке). Отметим также, что дисперсия флуктуаций фазы безвихревого БГ-пучка, как и в случае Г-пучка [1], слабо зависит от радиуса Гауссова фактора излучающей апертуры a_0 и радиуса кривизны параболического волнового фронта R_0 . Кроме того, обнаружена пространственная неоднородность флуктуаций фазы безвихревого Б-пучка в его поперечном сечении к направлению распространения оптического излучения. Отношение дисперсии флуктуаций фазы безвихревого Б-пучка в точке, смещённой с оптической оси пучка, к дисперсии флуктуаций фазы безвихревого Б-пучка на его оптической оси минимально в максимумах интенсивности Б-пучка и максимально в минимумах интенсивности этого пучка.

Также изучались статистические характеристики флуктуаций фазы оптического излучения с коническим волновым фронтом, распространяющимся в турбулентной атмосфере [82]. Эти исследования показали, что дисперсия флуктуаций фазы на оптической оси безвихревой ($m=0$) КВ $\sigma_{S_{pw}}^2(0)$ (5) в турбулентной атмосфере меньше такой же характеристики плоской волны, а также безвихревого ($m=0$) Б-пучка (4). Зависимость дисперсии флуктуаций фазы от параметра $\tilde{\beta}_c = \sqrt{x/k}\beta_c$, характеризующего конический волновой фронт оптической волны, имеет двухмасштабный характер (см. рис. 5б, где параметры $\tilde{\kappa}_L$ те же, что и на рис. 5а). При этом наблюдается быстрое

спадание до половины максимального значения при $\beta_c \approx 10$ и последующее медленное уменьшение до 0 с ростом поперечного волнового числа β_c . Известная для безвихревого Б-пучка пространственная неоднородность флуктуаций фазы имеет место и для безвихревой КВ.

В статье [73] теоретически изучены статистические характеристики флуктуаций интенсивности безвихревых ($m=0$) БГ-пучков (4), распространяющихся в турбулентной атмосфере. Исследование флуктуаций интенсивности проведено с использованием функции когерентности четвёртого порядка поля оптического пучка: получено асимптотическое решение соответствующего уравнения для области слабых флуктуаций интенсивности. Используя это решение, проведены расчёты дисперсии и пространственной корреляционной функции флуктуаций интенсивности безвихревого БГ-пучка в турбулентной атмосфере. Обнаружен эффект относительного ослабления флуктуаций интенсивности безвихревого БГ-пучка по сравнению с аналогичной характеристикой Г-пучка.

На рис. 6 представлено поведение дисперсии флуктуаций интенсивности на оптической оси коллимированного ($R_0 \rightarrow \infty$) безвихревого БГ-пучка $\sigma_{I_{\text{BGB}}}^2(0)$, нормированной на дисперсию флуктуаций интенсивности на оптической оси коллимированного ($R_0 \rightarrow \infty$) Г-пучка $\sigma_{I_{\text{GB}}}^2(0)$ [1, 84]. Здесь $I(x, \mathbf{p})$ – интенсивность оптического пучка, а $\Omega_0 = ka_0^2/x$ – число Френеля передающей апертуры.

Рис. 6 наглядно демонстрирует, что эффект относительного уменьшения флуктуаций интенсивности коллимированного безвихревого БГ-пучка относительно флуктуаций интенсивности коллимированного Г-пучка в турбулентной атмосфере имеет место при выполнении условия $\Omega_0 > 0,5$. Обнаруженный эффект ослабления флуктуаций интенсивности коллимированного безвихревого БГ-пучка сопровождается также существенной неоднородностью распределения флуктуаций интенсивности по поперечному сечению пучка. Пространственная корреляционная функция флуктуаций интенсивности коллимированного безвихревого БГ-пучка в пределах его первого максимума интенсивности слабо чувствительна к изменению параметра Б-пучка.

Теоретически проводились исследования [85] переноса ОУМ вихревыми ($m \geq 1$) БГ-пучками (4) при распространении их в турбулентной атмосфере. Поле оптического пучка находилось путём решения парааксиального приближения скалярного волнового уравнения [1, 84] для случайно-неоднородной среды с флуктуациями показателя преломления турбулентной атмосферы (3) при начальных условиях (4). Было доказано, что среднее значение ОУМ вихревого БГ-пучка остаётся постоянным при распространении в турбулентной атмосфере. Также было отмечено, что дисперсия флуктуаций ОУМ вихревого БГ-пучка, распространяющегося в турбулентной атмосфере,

рассчитанная с использованием приближения «средней интенсивности» [1], тождественно равна нулю. Таким образом, можно утверждать, что дисперсия флуктуаций ОУМ вихревого БГ-пучка в турбулентной атмосфере не велика.

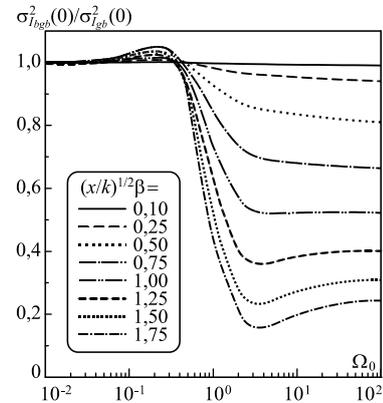


Рис. 6. Дисперсия флуктуаций интенсивности на оптической оси коллимированного безвихревого Бессель-Гауссова пучка в турбулентной атмосфере

Поскольку при распространении в турбулентной атмосфере когерентность оптического излучения снижается [1, 84], то естественно ожидать изменения структуры сформированного в такой среде бездифракционного Б-пучка. В связи с этим проходила проверка система высокоскоростной адаптации турбулентных искажений вихревых Б-пучков [86], использующая для получения информации о состоянии атмосферной турбулентности регистрацию искажений пробного Г-пучка. Применение дополнительного Г-пучка связано с малой информативностью для этих целей данных о радиусе когерентности вихревых Б-пучков. Однако малая информативность измерений радиуса когерентности ещё не означает, что любые характеристики когерентности вихревых Б-пучков в турбулентной атмосфере не являются информативными. Были проведены теоретические исследования когерентных свойств БГ-пучков (4) и КВ (5) [87], распространяющихся в турбулентной атмосфере, с целью нахождения характеристики когерентности пучков или волн оптического излучения, имеющей высокую чувствительность к параметрам атмосферной турбулентности. Для этого был проведён анализ поведения радиуса когерентности ρ_c [1, 79]: $\mu(x, \rho_c) = \exp(-1)$, и интегрального масштаба ρ_m [88]:

$$\rho_m = \int_0^{\infty} d\rho \mu(x, \rho),$$

степени когерентности $\mu(x, \rho)$ БГ-пучка и КВ [87]. Для примера, на рис. 7 представлено поведение радиуса когерентности ρ_c (рис. 7а) и интегрального масштаба степени когерентности ρ_m (рис. 7б) КВ при $\beta_c = 1,0$ для случайно неоднородной среды с флуктуациями показателя преломления турбулентной атмосферы (3) при начальных условиях (5), где $q = x/(k\rho_0^2)$ – параметр, характеризующий условия распространения оп-

тического излучения в турбулентной атмосфере; ρ_0 – радиус когерентности плоской оптической волны в турбулентной атмосфере [1, 84].

Данные, представленные на рис. 7, доказывают наличие высокой чувствительности интегрального масштаба степени когерентности ρ_m вихревых КВ, в отличие от радиуса когерентности ρ_c этих волн, к влиянию атмосферной турбулентности. Установленные закономерности [87] позволяют дать конкретные рекомендации по использованию масштабов когерентности БГ-пучков и КВ при получении информации об атмосферной турбулентности. Для этих целей предлагается использовать не измеритель радиуса когерентности оптического пучка ρ_c , а измеритель интегрального масштаба степени когерентности ρ_m этого пучка. Связано это с тем, что интегральный масштаб степени когерентности таких пучков, в отличие от радиуса когерентности, при любых условиях распространения максимально чувствителен к искажающему влиянию среды и только во вторую очередь зависит от параметров оптического излучения.

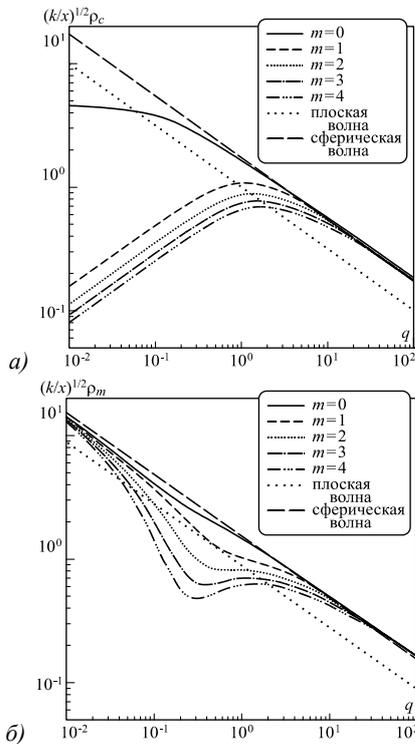


Рис. 7. Радиусы когерентности (а) и интегральные масштабы (б) степени когерентности конических, плоской и сферической волн

Кроме того, приведённые в работе [87] результаты анализа интегрального масштаба степени когерентности показывают, что вихревые ($m \geq 1$) пБ-пучки при распространении в турбулентной атмосфере обладают более низкой когерентностью, чем безвихревые ($m = 0$). Это связано с появлением кольцевой дислокации степени когерентности $\mu(x, \rho)$, которая формируется при распространении вихревых пучков в турбулентной атмосфере [87]. Формирование и исчезновение кольце-

вой дислокации происходит в области перехода от низких уровней флуктуаций в турбулентной атмосфере к высоким ($0,1 \leq q \leq 10$), т.е. когда пБ-пучки всё ещё продолжают сохранять (хотя бы и частично) свои инвариантные свойства. Отметим, что пБ-пучок окончательно теряет свойство инвариантности в тот момент, когда его радиус когерентности сравнивается с радиусом когерентности сферической волны.

Полученные результаты позволяют сформулировать количественные требования к параметрам ОЭС, работающих в атмосфере на протяжённых трассах (сотни метров – километры): линий оптической связи или же дальномерных систем. Упомянутые эффекты ослабления флуктуаций параметров БГ-пучков дают возможность предложить использовать в качестве несущего излучения БГ-пучки. БГ-пучки в роли несущей позволят существенно снизить уровень шумов, вносимых средой распространения в полезный сигнал, что должно привести к повышению помехозащищённости, или точности вышеупомянутых систем.

4. Адаптивная коррекция изображений по данным измерения турбулентности

Этапы измерения, расчётов и прогнозирования обеспечивают необходимую информацию для проведения заключительного этапа – создания систем АО. В результате это позволило исследователям из ИОА СО РАН перейти к построению систем АО. Предварительные этапы работы дали информацию об уровне турбулентности в регионе расположения оптической системы, в частности, дали величину радиуса когерентности (или параметра Фрида), а также среднее значение скорости ветра по трассе распространения оптической волны. Это позволило начать проектирование [7] элементной базы для системы АО, а именно, датчика волнового фронта, корректора наклонов и гибкого зеркала для адаптивной коррекции изображения.

Была выбрана наиболее сложная задача по созданию систем АО для солнечных телескопов. Эти астрономические инструменты работают в дневное время в условиях сильной турбулентности при высоких скоростях ветра и значительных помехах. Так, определённым этапом развития методов коррекции стала одноконтурная адаптивная система коррекции изображения в солнечном телескопе АНГАРА [89]. Этому этапу предшествовали многолетние исследования турбулентности региона юга Сибири, включая озеро Байкал, и создание элементной базы систем АО. В результате система АНГАРА была внедрена и установлена в 2011 году на Большом солнечном вакуумном телескопе (БСВТ) (пос. Листвянка Иркутской области). Разработка защищена патентом РФ, полученным совместно с сотрудниками Института солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН). Система АО использует датчик волнового фронта Шэка–Гартмана и гибкое управляемое биморфное зеркало. Рабочая частота системы составляет 75 Гц. С её по-

мощью были получены стабилизация и улучшение качества изображения фрагментов солнечной поверхности в условиях Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН.

Следующим этапом развития систем АО для коррекции изображений стала 3-каскадная система [90] адаптивной коррекции на БСВТ – крупно-апертурном солнечном телескопе. В системе используются три отдельных каскада коррекции формируемого изображения: коррекция наклонов волнового фронта, выполняемая с помощью датчика наклонов и корректора наклонов, фазовая коррекция с использованием датчика волнового фронта Шэка-Гартмана и деформируемого гибкого зеркала, а также пост-детекторная коррекция на основе использования инверсной обратной цифровой фильтрации. На рис. 8 показана схема сопряжения системы АО с БСВТ, установленная для коррекции изображения в солнечном телескопе. На ней обозначены M3, M4, M6, M7 – коллиматорные зеркала, F1, F2, F3, F4 – положения фокальной плоскости солнечного телескопа, M5 – полупрозрачное плоское зеркало, BS – светоделитель, TM1 – зеркало – корректор наклонов волнового фронта, DM1 – деформируемое управляемое зеркало, WFS1 и WFS2 – датчики волнового фронта.

После фокальной плоскости БСВТ F1 изображение, вырезанное полевой диафрагмой, падает на первое коллиматорное зеркало M3, строящее параллельными пучками первое промежуточное изображение зрачка на корректоре наклонов волнового фронта TM1. Фокусное расстояние обоих коллиматорных зеркал таково, что при рабочем диаметре главного объектива 720 мм изображение зрачка имеет диаметр 40 мм, а при рабочем диаметре 600 мм – 35 мм. Первое камерное зеркало M4 строит первое промежуточное изображение F2 на «полупрозрачном» зеркале M5, за которым расположена оптическая система, питающая датчик волнового фронта WFS-1 для корректора наклонов. Расходящиеся пучки первого промежуточного изображения, отражённые «полупрозрачным» зеркалом M5, попадают на второе коллиматорное зеркало M6, которое строит на «деформируемом» зеркале DM1 второе изображение зрачка, диаметр которого для 720 и 600 мм входного зрачка точно такой же, как на «качающемся» зеркале. Окончательное изображение F4 формируется вторым камерным зеркалом M7, от радиуса кривизны которого зависит фокусное расстояние системы. Светоделительный кубик BS1 разделяет пучок на два фокуса: F3 – для датчика волнового фронта деформируемого зеркала WFS-2 и рабочий фокус F4, в котором установлено научное регистрирующее оборудование.

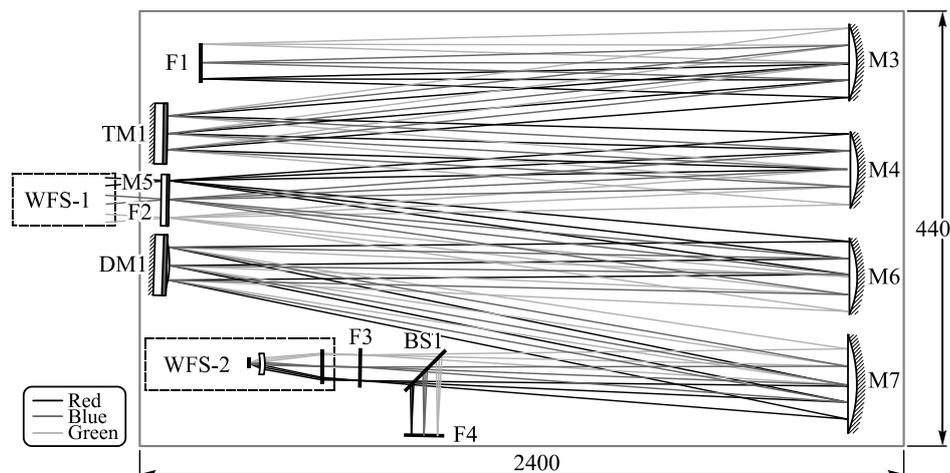


Рис. 8. Схема сопряжения адаптивной системы с Большим солнечным вакуумным телескопом. Масштаб оптической схемы для наглядности изменён

Способность коррекции традиционных однокаскадных систем АО существенно ограничена при сильной оптической турбулентности, когда значения изопланатического угла уменьшаются до значений 1 – 3 угл.с [7]. Такие значения изопланатического угла налагают ограничения на поле зрения, которое для мест расположения Байкальской астрофизической обсерватории и Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН для солнечного телескопа, работающего при «средних атмосферных условиях», должно составлять около 10 угл. с. Это заставляет в настоящее время строить системы АО как многокаскадные и многозеркальные [7, 85].

Заключение

Известно, что создание современных крупных ОЭС – это достаточно длительный процесс, который обычно проводится в условиях отсутствия полной информации об особенностях среды распространения оптического излучения. А поскольку самые современные ОЭС достаточно дороги, так как требуют на начальном этапе своего проектирования проведения соответствующих расчётов и оценок эффективности применения различного рода алгоритмов и программ, реализуемых на основе использования современной техники АО, и создание их проходит в течение ряда

лет, то основные параметры системы не могут не претерпевать изменений. Это заставляет строить такие системы с учётом возможного изменения их основных параметров на различных этапах проектирования и изготовления. Возможность гибкого изменения параметров оптической системы является в настоящее время одним из основных требований современного проектирования оптико-электронной аппаратуры, и АО-системы дают такую возможность. Это связано, прежде всего, с тем, что кардинальное изменение основных параметров оптической системы можно обеспечить только на основе смены алгоритма работы систем АО. На пути создания оптических систем стоят неизбежные этапы проектирования систем и определения потенциальных возможностей их применения в условиях реальной атмосферы. Каждый элемент оптической схемы требует предварительных расчётов, поэтому часто приходится проводить расчёты не только параметров адаптивной оптики, но и всей системы в целом.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

References

- [1] Gurvich AS, Kon AI, Mironov VL, Khmelevtsov SS. Laser radiation in the turbulent atmosphere [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1976.
- [2] Bol'basova LA, Lukin VP. Atmospheric research for adaptive optics problems [In Russian]. *Optika Atmosfery i Okeana* 2021; 34(04): 254-271. DOI: 10.15372/AOO2021040.
- [3] Tokovinin A. From differential image motion to seeing. *Publ Astron Soc Pac* 2002; 114: 1156-1166. DOI: 10.1086/342683.
- [4] Sarazin M, Roddier F. The ESO differential image motion monitor. *Astron Astrophys* 1990; 227(1): 294-300.
- [5] Antoshkin LV, Botygina NN, Emaleev ON, Lavrinova LN, Lukin VP. Differential optical meter of the parameters of atmospheric turbulence. *Atmos Oceanic Opt* 1998; 11(11): 1046-1050.
- [6] LeMaster DA, Hardie RC, Gladysz S, Howard MD, Rucci MA, Trippel ME, Power JD, Karch BK. Differential tilt variance effects of turbulence in imagery: comparing simulation with theory. *Proc SPIE* 2016; 9846: 984606. DOI: 10.1117/12.2223470.
- [7] Lukin VP. Adaptive optics in the formation of optical beams and images. *Adv Phys Sci* 2014; 57(6): 556-592. DOI: 10.3367/UFNe.0184.201406b.0599.
- [8] Botugina NN, Emaleev ON, Konyaev PA, Lavrinov VV, Lukin VP. Differential turbulence and wind velocity meters. *Proc SPIE* 2007; 6733: 67330N. DOI: 10.1117/12.753106.
- [9] Bolbasova LA, Gritsuta AN, Kopylov EA, Lavrinov VV, Lukin VP, Selin AA, Soin EL. Atmospheric turbulence meter based on a Shack-Hartmann wavefront sensor. *J Opt Tech* 2019; 86(7): 426-430. DOI: 10.1364/JOT.86.000426.
- [10] Lukin VP, Charnotsky MI. On the use of the Hartmann method for determining the characteristics of the radiation wavefront. *Optika i Spektroskopiya* 1989; 66(5): 1131-1133.
- [11] Gladysz S, Segel M, Eisele C, Barros R, Sucher E. Estimation of turbulence strength, anisotropy, outer scale and spectral slope from an LED array. *Proc SPIE* 2015; 9614: 961402. DOI: 10.1117/12.2191287.
- [12] Gladysz S. Absolute and differential G-tilt in turbulence: theory and applications. *Proc SPIE* 2016; 10002: 100020F. DOI: 10.1117/12.2241016.
- [13] Gladysz S, Filimonov G, Kolosov V. Validation of tilt anisoplanatism models through simulation. *OSA Technical Digest (Imaging and Applied Optics)* 2018; PW3H.2. DOI: 10.1364/PCAOP.2018.PW3H.2.
- [14] Andreeva MS, Iroshnikov NG, Koryabin AB, Larichev AV, Shmalgauzen VI. Usage of wavefront sensor for estimation of atmospheric turbulence parameters. *Optoelectron Instrum Data Process* 2012; 48(2): 197-204. DOI: 10.3103/S8756699012020136.
- [15] Borzilov AG, Gritsuta AN, Konyaev PA, Lukin VP, Nosov VV, Soin EL, Torgaev AV. Image jitter meter for low intensity radiation. *Proc SPIE* 2022; 12341: 123410F. DOI: 10.1117/12.2644417.
- [16] Konyaev PA, Lukin VP, Nosov VV, Nosov EV, Soin EL, Torgaev AV. Comparative measurements of atmospheric turbulence parameters by optical methods. *Atmos Oceanic Opt* 2022; 35(3): 310-318. DOI: 10.1134/S102485602203006X.
- [17] Noll RJ. Zernike polynomials and atmospheric turbulence. *J Opt Soc Am* 1976; 66(3): 207-211. DOI: 10.1364/JOSA.66.000207.
- [18] Monin AS, Yaglom AM. Statistical hydromechanics [In Russian]. Vol 1. Saint-Petersburg: "Hydrometeoizdat" Publisher; 1992. ISBN: 5-286-00857-7.
- [19] Azbukin AA, Bogushevich AY, Ilyichevsky VS, Korolkov VA, Tikhomirov AA, Shmelev VD. Automated ultrasonic meteorological complex AMK-03. *Meteorology and Hydrology* 2006; 31(11): 89-97.
- [20] Nosov VV, Lukin VP, Nosov EV, Torgaev AV. Simulation of coherent structures (topological solitons) inside closed rooms by solving numerically hydrodynamic equations. *Opt Atmos Okeana* 2015; 28(2): 120-133.
- [21] Popinet S. The Gerris flow solver – a free, open source, general-purpose fluid mechanics code. 2013. Source: <https://the-gerris-flow-solver.soft112.com>.
- [22] Popinet S. Gerris: A tree-based adaptive solver for the incompressible Euler equations in complex geometries. *Journal of Computational Physics* 2003; 190(2): 572-600. DOI: 10.1016/S0021-9991(03)00298-5.
- [23] Popinet S, Smith M, Stevens C. Experimental and numerical study of the turbulence characteristics of air flow around a research vessel. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 2004; 21(10): 1574-1589. DOI: 10.1175/1520-0426(2004)021<1575:EANSOT>2.0.CO;2.
- [24] Chorin AJ. The numerical solution of the Navier-Stokes equations for an incompressible fluid. *Bulletin of the American Mathematical Society* 1967; 73(6): 928-931. DOI: 10.1090/s0002-9904-1967-11853-6.
- [25] Chorin AJ. Numerical solution of the Navier-Stokes equations. *Mathematics of Computation* 1968; 22(104): 745-762. DOI: 10.2307/2004575.
- [26] Lukin VP, Kopylov EA, Lavrinov VV, Selin AA. Methods of image correction formed on horizontal long paths. *Proc SPIE* 2018; 10677: 1067765. DOI: 10.1117/12.2309327.
- [27] Lukin VP, Nosov VV, Torgaev AV. Features of optical image jitter in a random medium with a finite outer scale. *Appl Opt* 2014; 53(10): B196-B204. DOI: 10.1364/AO.53.00B196.
- [28] Lukin VP, Nosov VV, Kovadlo PG, Nosov EV, Torgaev AV. Causes of non-Kolmogorov turbulence in the atmosphere. *Appl Opt* 2016; 55(12): B163-B168. DOI: 10.1364/AO.55.00B163.
- [29] Bolbasova LA, Lukin VP, Nosov VV. Comparison of Kolmogorov's and coherent turbulence. *Appl Opt* 2014; 53(10): B231-B236. DOI: 10.1364/AO.53.00B231.

- [30] Nosov VV, Lukin VP, Kovadlo PG, Nosov EV, Torgaev AV. Proof of Hopf's conjecture on the structure of turbulence (Tatarsky's memory). *Opt Atmos Okeana* 2023; 36(1): 12-18. DOI: 10.15372/AOO20230102.
- [31] Willner AE, Huang H, Yan Y, Ren Y, Ahmed N, Xie G, Bao C, Li L, Cao Y, Zhao Z, Wang J, Lavery MPJ, Tur M, Ramachandran S, Molisch AF, Ashrafi N, Ashrafi S. Optical communications using orbital angular momentum beams. *Adv Opt Photon* 2015; 7(1): 66-106. DOI: 10.1364/AOP.7.000066.
- [32] Ding P, Ren H. Propagation law of partially coherent vortex beam. *Opt Eng* 2012; 51(1): 018002. DOI: 10.1117/1.OE.51.1.018002.
- [33] Kotlyar VV, Kovalev AA, Porfirev AP. Hermite-gaussian laser beams with orbital angular momentum. *Computer Optics* 2014; 38(4): 651-657. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-4-651-657.
- [34] Lukin, VP, Konyaev PA, Sennikov VA. Beam spreading of vortex beams propagating in turbulent atmosphere. *Appl Opt* 2012; 51(1): C84-C87. DOI: 10.1364/AO.51.00C84.
- [35] Soifer VA, Korotkova O, Khonina SN, Shechpakina EA. Vortex beams in turbulent media: review. *Computer Optics* 2016; 40(5): 605-624. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
- [36] Aksenov VV, Kolosov VV, Filimonov GA, Pogutsa CE. Orbital angular momentum of a laser beam in a turbulent medium: preservation of the average value and variance of fluctuations. *J Opt* 2016; 18: 054013. DOI: 10.1088/2040-8978/18/5/054013.
- [37] Konyaev PA, Lukin VP. Computational algorithms for simulations in atmospheric optics. *Appl Opt* 2016; 55(12): 107-112. DOI: 10.1364/AO.55.00B107.
- [38] Karpeev SV, Pararin VD, Kirilenko MS. Comparison of the stability of Laguerre-Gauss vortex beams to random fluctuations of the optical environment. *Computer Optics* 2017; 41(2): 208-217. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-208-217.
- [39] Charnotskii M. Turbulence effects on fluctuations of the aperture-averaged orbital angular momentum. *J Opt Soc Am* 2018; 35(5): 702-711. DOI: 10.1364/JOSAA.35.000702.
- [40] Lukin VP, Konyaev PA, Sennikov VA. Phase correction of coherent scalar vortex light beams under turbulence conditions. *Proc SPIE* 2020; 11532: 115320P. DOI: 10.1364/AO.41.005616.
- [41] Aksenov VP, Dudurov VV, Kolosov VV, Filimonov GA. Fluctuations of the orbital angular momentum of a laser beam registered by a finite-size receiver aperture after propagation through a turbulent atmosphere. *OSA Continuum* 2021; 4(7): 1945-1955. DOI: 10.1364/OSAC.430142.
- [42] Konyaev PA, Lukin VP. Computation algorithms for simulation in atmospheric optics. *Appl Opt* 2016; 55(12): B107-B112. DOI: 10.1364/AO.55.00B107.
- [43] Asanov SV, Geintz YE, Zemlyanov AA, Ignatyev AB, Matvienko GG, Morozov VV, Tarasenkova AV. Forecast of intense near- and mid-IR laser radiation propagation along slant atmospheric paths. *Atmos Oceanic Opt* 2016; 29(4): 315-323. DOI: 10.1134/S1024856016040035.
- [44] Konyaev PA, Lukin VP. Computer simulations of multi-channel laser beams system focusing in turbulent atmosphere. *MDPI Photonics* 2023; 10(4): 431. DOI: 10.3390/photonics10040431.
- [45] Volostnikov VG. Modern optics of Gaussian beams. *Adv Phys Sci* 2012; 55(4): 412-420. DOI: 10.3367/UFNr.0182.201204f.0442.
- [46] Kuga T, Torii Y, Shiokawa N, Hirano T, Shimizu Y, Sasaki H. Novel optical trap of atoms with a doughnut beam. *Phys Rev Lett* 1997; 78(25): 4713-4716. DOI: 10.1103/PhysRevLett.78.4713.
- [47] Rao L, Pu J. Generation of partially coherent vortex bottle beams. *Chin Opt Lett* 2007; 5(7): 379-382.
- [48] Carbajal-Domingues A, Bernal J, Martin-Ruiz A, Niconoff GM. Generation of J_0 Bessel beams with controlled spatial coherence features. *Opt Express* 2010; 18(8): 8400-8405. DOI: 10.1364/OE.18.008400.
- [49] He X, Lu B. Propagation of partially coherent flat-topped vortex beams through non-Kolmogorov atmospheric turbulence. *J Opt Soc Am A* 2011; 28(9): 1941-1948. DOI: 10.1364/JOSAA.28.001941.
- [50] Abramochkin EG, Volostnikov VG. Spiral light beams. *Adv Phys Sci* 2004; 47(12): 1177-1203. DOI: 10.1070/PU2004v047n12ABEH001802.
- [51] Kiselev AP. Localized light waves: paraxial and exact solutions of the wave equation (a review). *Opt Spectrosc* 2007; 102(4): 603-622. DOI: 10.1134/S0030400X07040200.
- [52] Andrews DL. Structured light and its applications: An introduction to phase-structured beams and nanoscale optical forces. New York: Academic Press; 2008. ISBN: 978-0-12-374027-4.
- [53] Kotlyar VV, Kovalev AA. Accelerating and vortex laser beams [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2018. ISBN: 978-5-9221-1818-7.
- [54] Lopez-Moriscal C, Bandres MA, Gutierrez-Vega JC. Observation of the experimental propagation properties of Helmholtz-Gauss beams. *Opt Eng* 2006; 45(6): 068001. DOI: 10.1117/1.2210485.
- [55] Morse P, Feshbach H. *Methods of theoretical physics*. New York: McGraw-Hill; 1953.
- [56] Miller W. *Symmetry and separation of variables*. London: Addison-Wesley Publishing Company; 1977. ISBN: 0-201-13503-5.
- [57] Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory. *J Opt Soc Am A* 1987; 4(4): 651-654. DOI: 10.1364/JOSAA.4.000651.
- [58] Gori F, Guattari G, Padovani C. Bessel-Gauss beams. *Opt Commun* 1987; 64(6): 491-495. DOI: 10.1016/0030-4018(87)90276-8.
- [59] Pyatnitskii LN. Optical discharge in the field of a Bessel laser beam. *Adv Phys Sci* 2010; 53(2): 159-177. DOI: 10.3367/UFNe.0180.201002c.0165.
- [60] Pyatnitskii LN. *Wave Bessel beams* [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2012. ISBN: 978-5-9221-1318-2.
- [61] Chen B, Chen Z, Pu J. Propagation of partially coherent Bessel-Gaussian beams in turbulent atmosphere. *Opt Laser Technol* 2008; 40(6): 820-827. DOI: 10.1016/j.optlastec.2007.11.011.
- [62] Birch P, Ituen I, Young R, Chatwin Ch. Long-distance Bessel beam propagation through Kolmogorov turbulence. *J Opt Soc Am A* 2015; 32(11): 2066-2073. DOI: 10.1364/JOSAA.32.002066.
- [63] Palacios DM, Maleev ID, Marathay AS, Swartzlander GA. Spatial correlation singularity of a vortex field. *Phys Rev Lett* 2004; 92(14): 143905. DOI: 10.1103/PhysRevLett.92.143905.
- [64] Maleev ID, Palacios DM, Marathay AS, Swartzlander GA. Spatial correlation vortices in partially coherent light: theory. *J Opt Soc Am B* 2004; 21(11): 1895-1900. DOI: 10.1364/JOSAB.21.001895.
- [65] Ding Ch, Pan L, Lu B. Phase singularities and spectral changes of spectrally partially coherent higher-order Bessel-Gauss pulsed beams. *J Opt Soc Am A* 2009; 26(12): 2654-2661. DOI: 10.1364/JOSAA.26.002654.
- [66] McLeod JH. The axicon: A new type of optical element. *J Opt Soc Am* 1954; 44(8): 592-597. DOI: 10.1364/JOSA.44.000592.

- [67] McLeod JH. Axicons and their uses. *J Opt Soc Am* 1960; 50(2): 166-169. DOI: 10.1364/JOSA.50.000166.
- [68] Friberg AT. Stationary-phase analysis of generalized axicons. *J Opt Soc Am A* 1996; 13(4): 743-750. DOI: 10.1364/JOSAA.13.000743.
- [69] Popov SYu, Friberg AT. Design of diffractive axicons for partially coherent light. *Opt Lett* 1998; 23(21): 1639-1641. DOI: 10.1364/OL.23.001639.
- [70] Golub I. Fresnel axicon. *Opt Lett* 2006; 31(12): 1890-1892. DOI: 10.1364/OL.31.001890.
- [71] Burvall A, Kolacz K, Goncharov AV, Jaroszewicz Z, Dainty Ch. Lens axicons in oblique illumination. *Appl Opt* 2007; 46(3): 312-318. DOI: 10.1364/AO.46.000312.
- [72] Akturk S, Zhou B, Pasquiou B, Franco M, Mysyrowicz A. Intensity distribution around the focal regions of real axicons. *Opt Commun* 2008; 281(17): 4240-4244. DOI: 10.1016/j.optcom.2008.05.027.
- [73] Fedotowsky A, Lehovc K. Optimal filter design for annular imaging. *Appl Opt* 1974; 13(12): 2919-2923. DOI: 10.1364/AO.13.002919.
- [74] Khonina SN, Kotlyar VV, Shinkaryev MV, Soifer VA, Uspleniev GV. The phase rotor filter. *J Mod Opt* 1992; 39(5): 1147-1154. DOI: 10.1080/09500349214551151.
- [75] Khonina SN, Kotlyar VV, Skidanov RV, Soifer VA, Jefimovs K, Simonen J, Turunen J. Rotation of microparticles with Bessel beams generated by diffractive elements. *J Mod Opt* 2004; 51(4): 2167-2184. DOI: 10.1080/09500340408232521.
- [76] Arlt J, Dholakia K. Generation of high-order Bessel beams by use of an axicon. *Opt Commun* 2000; 177(1-6): 297-301. DOI: 10.1016/S0030-4018(00)00572-1.
- [77] Kotlyar VV, Kovalev AA, Khonina SN, Skidanov RV, Soifer VA, Elfstrom H, Tossavainen N, Turunen J. Diffraction of conic and Gaussian beams by a spiral phase plate. *Appl Opt* 2006; 45(12): 2656-2665. DOI: 10.1364/AO.45.002656.
- [78] Yu Y, Dou W. Generation of pseudo-Bessel beams at THz frequencies by use of binary axicons. *Opt Express* 2009; 17(2): 888-893. DOI: 10.1364/OE.17.000888.
- [79] Degtyarev SA, Porfirev AP, Khonina SN. Photonic nanohelix generated by a binary spiral axicon. *Appl Opt* 2016; 55(12): B44-B48. DOI: 10.1364/AO.55.000B44.
- [80] Khonina SN. Simple way for effective formation various nondiffractive laser beams. *Computer Optics* 2009; 33(1): 70-78.
- [81] Lukin IP. Bessel-Gaussian beam phase fluctuations in randomly inhomogeneous media. *Atmos Oceanic Opt* 2010; 23(3): 236-240. DOI: 10.1134/S1024856010030139.
- [82] Lukin IP. Phase fluctuations of optical waves in the case of cone focusing in turbulent atmosphere. *Atmos Oceanic Opt* 2012; 25(3): 199-203. DOI: 10.1134/S1024856012030074.
- [83] Lukin IP. Intensity fluctuations of the Bessel-Gaussian beams propagating in turbulent atmosphere. *Proc SPIE* 2019; 11208: 112082N. DOI: 10.1117/12.2540931.
- [84] Rytov SM, Kravtsov YA, Tatarskii VI. Wave propagation through random media. Volume 4: Principles of statistical radiophysics. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin; 1989. ISBN: 978-3-642-72684-2.
- [85] Lukin IP. Integral momenta of vortex Bessel-Gaussian beams in turbulent atmosphere. *Appl Opt* 2016; 55(12): B61-B66. DOI: 10.1364/AO.55.000B61.
- [86] Chen Sh, Li Sh, Zhao Y, Liu J, Zhu L, Wang A, Du J, Shen L, Wang J. Demonstration of 20-Gbit/s high-speed Bessel beam encoding/decoding link with adaptive turbulence compensation. *Opt Lett* 2016; 41(20): 4680-4683. DOI: 10.1364/OL.41.004680.
- [87] Lukin IP. Coherence of vortex Bessel-like beams in a turbulent atmosphere. *Appl Opt* 2020; 59(13): 3833-3841. DOI: 10.1364/AO.387549.
- [88] Malakhov AN. Cumulative analysis of random non-Gaussian processes and their transformations [In Russian]. Moscow: "Sovetskoe Radio" Publisher; 1978.
- [89] Antoshkin LV, Botygina NN, Emaleev ON, Kovadlo PG, Konyaev PA, Kopylov EA, Lukin VP, Skomorovsky VI, Trifonov VD, Chuprakov SA. Telescope with adaptive optical system [In Russian]. Utility model Pat RF of Invent N 111695 of June 29, 2011, Russian Bull of Inventions N76, 2012.
- [90] Lukin VP, Konyaev PA, Borzilov AG, Soin EL. Adaptive imaging and stabilization system for a large-aperture solar telescope. *Atmos Oceanic Opt* 2022; 35(3): 240-249. DOI: 10.1134/S1024856022030101.

Сведения об авторах

Лукин Владимир Петрович, 1946 года рождения, в 1970 году окончил радиофизический факультет Томского государственного университета (ТГУ, ныне – Национальный исследовательский Томский государственный университет) по специальности 12.04.02 – «Оптические и оптико-электронные приборы», в 1975 году защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика», а в 1986 году – диссертацию на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика», в 2005 году ему присвоено звание «профессор» по специальности «Оптика», работает главным научным сотрудником в ИОА СО РАН. Область научных интересов: распространение оптических волн в случайно-неоднородных средах, адаптивная оптика, теория атмосферной турбулентности. E-mail: lukin@iao.ru <https://orcid.org/0000-0001-8847-0119>.

Лукин Игорь Петрович, 1952 года рождения, в 1975 году окончил радиофизический факультет Томского государственного университета (ТГУ, ныне – Национальный исследовательский Томский государственный университет) по специальности 12.04.02 – «Оптические и оптико-электронные приборы», в 1985 году защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика», а в 2005 году – диссертацию на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика», в 1995 году ему присвоено звание «старший научный сотрудник» по специальности «Оптика», работает ведущим научным сотрудником в ИОА СО РАН. Область научных интересов: распространение оптических волн в непрерывных и дискретных случайно-неоднородных средах. E-mail: lukin_ip@iao.ru ID ORCID: 0000-0002-0369-7312.

ГРНТИ: 29.31.29, 29.31.27, 29.31.15

Поступила в редакцию 22 мая 2023 г. Окончательный вариант – 13 июля 2023 г.

Overview of modern technologies for measuring, predicting and correcting turbulent distortions in optical waves

V.P. Lukin¹, I.P. Lukin¹

¹ V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 634055, Tomsk, Russia, sq. Academician Zuev 1

Abstract

This work is an analytical review of the components of modern technology for creating adaptive optics systems for correcting the distortion of optical waves propagating in a turbulent atmosphere. The work consists of the following parts: description of a technique for measuring fluctuations of optical waves in an atmospheric path, theoretical calculations of fluctuations by analytical analysis and mathematical modeling methods, technology for predicting turbulent air movement by the numerical solution of the Navier–Stokes equations and, finally, constructing adaptive optics systems that compensate for the turbulent distortions in optoelectronic image construction systems. Attention is focused on the peculiarities of fluctuations of specially created Laguerre–Gaussian and Bessel–Gaussian beams. Features of the propagation of vortex Laguerre–Gaussian and vortex Bessel–Gaussian beams for the transfer of orbital angular momentum through a turbulent medium are shown. Effects of the relative attenuation of phase and intensity fluctuations of the vortex-free Bessel–Gaussian beams in comparison with similar characteristics of the Gaussian beams are found. The integral scale of the coherence degree of the vortex Bessel–Gaussian beams and vortex conic waves is revealed to be highly sensitive to the influence of atmospheric turbulence, in contrast to the coherence radius of these beams and waves. Arguments are given in favor of the feasibility of constructing adaptive optical systems for a wide-aperture solar telescope operating under a strong atmospheric turbulence.

Keywords: optical waves, atmospheric turbulence measurements, fluctuations, Laguerre–Gaussian beams, Bessel–Gaussian beams, adaptive correction.

Citation: Lukin VP, Lukin IP. Overview of modern technologies for measuring, predicting and correcting turbulent distortions in optical waves. *Computer Optics* 2024; 48(1): 68–80. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1355.

Acknowledgements: This work was financially 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).

Authors' information

Vladimir Petrovich Lukin (b. 1946) graduated from Radiophysics department of Tomsk State University (presently, Tomsk National Research University, short – Tomsk University) in 1970, majoring in Optical and Optical-electronic Devices. He received his CS degree in Physics and Mathematics in 1975 and his DS degree in Physics and Mathematics in 1987. Currently he works as the chief researcher in the Laboratory of Coherent and Adaptive Optics of the V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia. Research interests are the propagation of optical waves in randomly inhomogeneous media, adaptive optics, theory of atmospheric turbulence. E-mail: lukin@iao.ru <https://orcid.org/0000-0001-8847-0119>

Igor Petrovich Lukin, (b. 1952), graduated from Radiophysics department of Tomsk State University (presently, Tomsk National Research University, short – Tomsk University) in 1985, majoring in Optical and Optical-electronic Devices. He received his CS degree in Physics and Mathematics in 1985 and his DS degree in Physics and Mathematics in 2005. Currently he works as the leading researcher in the Laboratory of Wave Propagation of the V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia. Research interests are the propagation of optical waves in randomly inhomogeneous media. E-mail: lukin_ip@iao.ru ID ORCID: 0000-0002-0369-7312.

Received May 22, 2023. The final version – July 13, 2023.
