

АДАПТИВНАЯ ОПТИКА

Возможность совместного использования техники адаптивной оптики и нелинейно-оптического обращения волнового фронта для компенсации турбулентных искажений

В.П.Лукин, Ф.Ю.Канев, О.В.Кулагин

Показана эффективность объединения нелинейно-оптической техники, основанной на формировании обращенного волнового фронта, и традиционной адаптивной оптики в едином комплексе, например для адаптивной фокусировки квазинепрерывного лазерного излучения. Нелинейно-оптическое обращение волнового фронта может обеспечить более точную информацию о флуктуациях фазы корректируемого волнового фронта по сравнению с информацией, получаемой методами адаптивной оптики. В то же время традиционные адаптивные методы управления позволяют эффективно управлять проецируемым на цель лазерным излучением в течение достаточно долгого времени.

Ключевые слова: турбулентность атмосферы, адаптивная оптика, обращение волнового фронта, управление, радиус когерентности.

Одной из важных задач оптики атмосферы является повышение эффективности передачи оптического излучения через случайно-неоднородные среды, такие как турбулентная атмосфера, на основе применения современной адаптивной оптики (АО). С этой целью используются как традиционные элементы АО, работающие по алгоритму фазового сопряжения (ФС) [1], так и нелинейные элементы АО, реализующие адаптивную коррекцию с помощью обращенного волнового фронта (ОВФ) излучения [2–4].

В литературе [2–5] есть много примеров создания высокоскоростных элементов (реализующих формирование обращенных волновых фронтов), совмещенных с отражающими элементами. В научной литературе эти элементы называют ОВФ-зеркалами. Амплитудно-фазовое управление (по схеме ОВФ) возможно, например, при оптическом четырехволновом взаимодействии в нелинейной среде [6]. Известны достоинства и недостатки линейной АО и различных реализаций нелинейных методов адаптивной коррекции искажений оптического излучения. К безусловным достоинствам линейной АО относятся гибкость построения различных схем ее применения и возможность работы как с мощным, так и с достаточно слабым оптическими излучениями. К недостаткам же следует отнести невысокие частоты управления, связанные с применением механических элементов для введения коррекции (гибкие и составные управляемые зеркала и др.). В свою очередь достоинством нелинейной АО является как раз возможность очень быстрого управления оптическим излучением, однако «время жизни» такого скорректированного состояния очень мало: не превышает десят-

ков, может быть сотен, наносекунд. За такое короткое время передать существенную энергию затруднительно. Есть еще ряд недостатков нелинейной техники ОВФ и ограничений для ее применения.

Ранее неоднократно обсуждалась идея объединения этих двух подходов в одном устройстве (см., напр., [7, 8], однако ни серьезного численного анализа его возможной эффективности, ни, тем более, экспериментального моделирования не проводилось. Авторы настоящей статьи уже сообщали о результатах моделирования [6, 9, 10] такого гибридного устройства. В нашей работе представлены результаты численного анализа его эффективности в зависимости от уровня турбулентности атмосферы и некоторых характеристик оптического сценария. Моделирование адаптивной коррекции искажений оптических волн, обусловленных действием турбулентности, проводилось с учетом конечного быстродействия системы АО в условиях, когда искажения на трассе распространения пучка менялись во времени (случайные турбулентные неоднородности смещались поперек направления распространения излучения [5]).

Одна из возможных принципиальных схем такой гибридной системы, в которой используются линейная АО и нелинейно-оптическое ОВФ, приведена на рис. 1. В гибридной системе лазер 3 генерирует импульс опорного излучения, которое направляется через атмосферу на объект-цель 7, отражается от него, а затем часть отраженного излучения собирается телескопом 8 (используется схема Кассегрена) и поступает на вход принимающего сигнал ОВФ-зеркала 1. Мы предлагаем использовать в качестве ОВФ-зеркала нелинейно-оптический приемник (НОП) на основе четырехволнового взаимодействия света с гиперзвуком. Обзор результатов экспериментального исследования НОПа представлен в [11]. Данный приемник обеспечивает усиление оптических сигналов и имеет уникальное сочетание параметров, а именно:

– достаточно большое поле зрения – до 10° ($\sim 500 \times 500$ пикселей изображения);

– предельно узкая частотная полоса приема, соответствующая времени срабатывания ~ 10 нс;

В.П.Лукин, Ф.Ю.Канев. Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, Россия, 634021 Томск, пл. Акад. Зуева, 1; e-mail: lukin@iao.ru

О.В.Кулагин. Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: ok@appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 5 июня 2015 г., после доработки – 3 марта 2016 г.

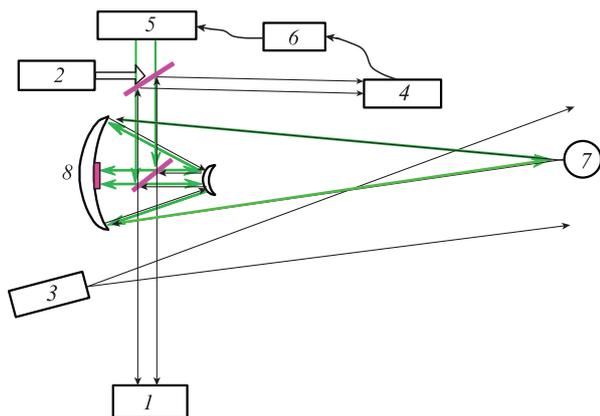


Рис.1. Гибридная система фокусировки:

1 – ОВФ-зеркало (нелинейно-оптический приемник); 2 – управляемый лазер; 3 – импульсный лазер подсветки; 4 – датчик волнового фронта; 5 – гибкое управляемое зеркало; 6 – компьютер, управляющий зеркалом 5 на основании сигнала датчика 4; 7 – объект-цель; 8 – приемопередающий телескоп.

– высокая чувствительность, ограниченная только квантовыми шумами входных усилителей, при этом минимальный принимаемый и обрабатываемый сигнал составляет порядка 5×10^{-19} Дж (т.е. примерно два кванта сигнала) на пиксель;

– коэффициент усиления порядка $10^{12} - 10^{13}$.

Такой НОП позволяет селективировать и принимать предельно слабый сигнал на фоне интенсивной некогерентной засветки (рэлеевского и аэрозольного рассеяний в атмосфере, солнечного света и т.д.).

Далее усиленный сигнал поступает на вход датчика волнового фронта 4, т.е. в линейную часть адаптивного устройства коррекции. Этот датчик измеряет волновой фронт, с помощью специальных программ вырабатывает сигнал для управления поверхностью гибкого зеркала 5, и его поверхность воспроизводит волновой фронт принятого и обращенного НОПом сигнала. Усиление отраженного от цели сигнала при его приеме НОПом обеспечивает работу датчика волнового фронта системы АО даже тогда, когда реальная величина отраженного сигнала от объекта-цели 7 очень мала. Если большую часть отраженного излучения направить через тракт приемопередающего телескопа 8 назад на цель, то компенсация искажений, внесенных атмосферой в отраженное излучение, и последующая концентрация энергии на близких точках цели позволят еще на несколько порядков увеличить сигнал.

В системе также присутствует лазер 2, излучение которого через гибкое зеркало 5 постоянно направляется на объект 7. Под действием сигнала управления, подаваемого от датчика волнового фронта 4 на гибкое зеркало 5, обеспечивается постоянная адаптивная фокусировка излучения лазера 2 на объект 7. В течение времени «замороженности» фазовых флуктуаций в канале между объектом и излучателем излучение лазера 2, исправленное с помощью активного зеркала, поступает на объект. Безусловно, фазовые искажения изменяются с течением времени за счет наличия турбулентности в канале между гибридной системой и объектом, и рано или поздно происходят такие серьезные изменения, что эффективность фокусировки излучения лазера 2 снижается, и тогда цикл компенсации искажений с помощью излучения импульсного лазера 3 опять повторяется. В итоге, посредством

совместного использования техники нелинейно-оптического приема сигнала и линейной АО для собственно адаптивной коррекции, периодически происходит фокусировка излучения на объект. Следует специально отметить, что для работы гибридной схемы АО уже несущественно то, что принимаемый датчиком волнового фронта 4 сигнал является обращенным по отношению ко входному. Заметим также, что для наглядности на рис.1 не показаны проецирующие и управляющие поляризацией сигнала оптические элементы схемы.

Качественно понятно, что временной цикл работы такой гибридной системы будет определяться как уровнем турбулентных флуктуаций, так и скоростью изменения фазовых флуктуаций в канале между объектом и адаптивной системой. Здесь мы проверили это в численном эксперименте. Для количественного расчета цикла использовался развитый ранее аппарат для моделирования распространения лазерного излучения в случайно-неоднородной среде [1, 5]. При численном анализе работы данной системы использовалась упрощенная схема, в которой одновременно включаются источники, генерирующие опорный и корректируемый пучки лазерного излучения, причем оба пучка в начальный момент времени должны быть коллимированными. Это связано с тем, что расстояние от устройства до объекта, на который посылается излучение, зачастую бывает неизвестно.

Наше численное моделирование начнем с того, что предварительно в плоскости наблюдения (т.е. в плоскости объекта 7) в течение некоторого времени, необходимого для регистрации параметров опорного излучения и генерации сигналов управления, вычислим критерий фокусировки оптического пучка (эта величина численно равна доле энергии в пределах дифракционного диаметра пучка) без адаптивного управления. Далее проанализируем распространение пучка в случайной среде, для чего в корректируемом пучке зададим амплитудное и фазовое распределения, обусловленные присутствующими в атмосфере случайными факторами. Затем через некоторое время (варьируемое при решении задачи) выполним отдельный цикл чисто фазового управления. При работе системы в реальных атмосферных условиях имеет место ветровое смещение турбулентных неоднородностей в поперечную сторону. В численной модели это учитывалось за счет поперечного (ветрового) сноса уже измеренного фазового фронта. Таким образом, численная модель полностью имитирует работу гибридной системы.

Полученные численными методами для описанной системы результаты управления приведены на рис.2 и 3. Во всех экспериментах полное время одного цикла управления составляло 0.1 с при начальном радиусе пучка 5 см и скорости ветра 5 м/с, искажения в оптической волне, прошедшей через слой среды, контролировались заданием уровня фазовых флуктуаций (использовалась модель Колмогорова–Обухова для турбулентной среды [1, 6]). Уровень фазовых искажений в оптической волне задавался через радиус когерентности излучения (так называемый радиус Фрида r_0), который варьировался в довольно широких пределах.

В начале исследований был проведен сравнительный анализ эффективности ФС и ОВФ при коррекции стационарных искажений (т.е. при компенсации воздействия «замороженной» турбулентности) [6]. Результаты, полученные на основе численного эксперимента, представлены на рис.2, где показана зависимость от радиуса Фрида

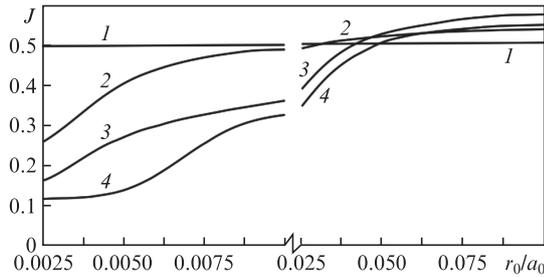


Рис.2. Сопоставление эффективностей амплитудно-фазового (1) и фазового (2–4) управления на однородных атмосферных трассах протяженностью $Z = 0.5$ (1), 0.3 (2), 0.5 (3) и 0.7 (4).

критерия фокусировки, который пропорционален мощности излучения, регистрируемой в пределах заданной апертуры:

$$J(t) = \frac{1}{P_0} \iint \rho(x, y) I(x, y, t) dx dy.$$

Здесь P_0 – полная мощность пучка; $\rho(x, y) = \exp[-(x^2 + y^2)/S_t^2]$ – апертурная функция; S_t – радиус апертуры; $I(x, y, t)$ – интенсивность излучения.

Результаты расчетов были получены для различных длин атмосферных трасс. На рис.2 радиус Фрида нормирован на исходный поперечный размер формируемого пучка излучения a_0 . Нормированная длина атмосферной трассы Z равна отношению длины трассы L к дифракционной длине $z_d = ka_0^2$, где k – волновое число излучения. Поскольку атмосфера является случайно-неоднородной средой, было выполнено усреднение получаемых данных по 50 случайным реализациям.

Из рис.2 видно, что результаты, полученные при ОВФ-управлении, не зависят от интенсивности турбулентности (для всех значений радиуса Фрида критерий равен 0.5), тогда как при чисто фазовом управлении (кривые 2–4) критерий J уменьшается при уменьшении радиуса когерентности r_0 , причем на длинных трассах это уменьшение становится более выраженным.

Алгоритмы амплитудно-фазового управления, реализуемые как ОВФ, обеспечивают высокую эффективность компенсации атмосферных искажений, но и в случае их применения качество коррекции ограничено быстродействием адаптивной системы [9, 12]. Эту особенность иллюстрируют представленные на рис.3 зависимости критерия фокусировки от времени, полученные при использовании ФС и ОВФ для компенсации нестационарных искажений (время на рис.3 нормировано на характерное время переноса неоднородностей через сечение пучка $\tau = a_0/v$, где v – скорость потока). Из рис.3,а видно, что во время цикла ОВФ критерий фокусировки значительно увеличивается. Затем, при смещении неоднородностей, фиксированные значения амплитуды и фазы волнового фронта пучка уже не соответствуют точно показателю преломления среды на трассе распространения, и критерий уменьшается. Аналогичное поведение системы наблюдается и во время цикла ФС, но здесь значения критерия значительно меньше, чем при использовании ОВФ.

Средние значения критерия увеличиваются, а их различие при фазовом и амплитудно-фазовом управлении уменьшается с уменьшением интенсивности турбулентности. Это показано на рис.3,б и в, для которых параметр турбулентности был взят меньшим, чем для рис.3,а. Та-

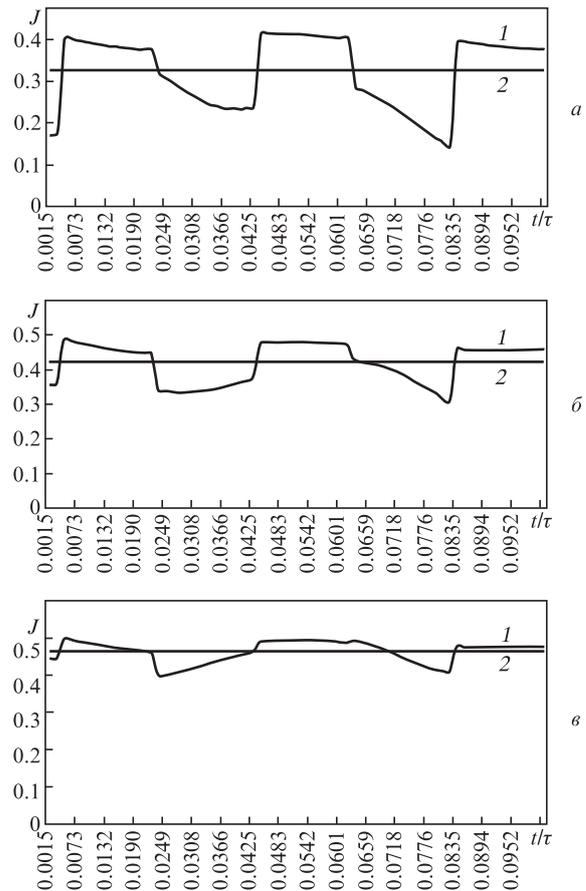


Рис.3. Временные зависимости критерия фокусировки при совместном использовании ФС и ОВФ, для $r_0/a_0 = 0.025$ (а), 0.05 (б) и 0.075 (в). Кривые 1 получены при работе гибридной адаптивной системы, линии 2 соответствуют среднему значению критерия фокусировки.

ким образом, при относительно невысокой интенсивности турбулентности гибридная система, включающая в себя НОП и линейную адаптивную систему, действительно обеспечивает практически такую же эффективность коррекции искажений, как и система ОВФ.

Кроме того, было обнаружено, что улучшение качества компенсации искажений возможно также за счет увеличения быстродействия системы [6, 8, 9]. Это иллюстрирует табл.1, где приведены средние значения критерия фокусировки, полученные в системах с различным быстродействием при различной интенсивности турбулентности. Варьируемыми параметрами являются интервал времени, в течение которого выполняются ФС и ОВФ, т.е. цикл системы, и параметр турбулентности, характеризующий радиусом Фрида r_0 . Было обнаружено, что уве-

Табл.1. Среднее значение критерия фокусировки $\langle J \rangle$, регистрируемое при различном быстродействии системы и различной интенсивности турбулентности (длина трассы $Z = 0.5$).

r_0/a_0	Полное время управления (с)	Период срабатывания гибридной системы (с)	Среднее значение критерия фокусировки
0.075	0.1	0.02	0.463 ± 0.072
	0.1	0.04	0.461 ± 0.091
0.025	0.1	0.02	0.325 ± 0.044
	0.1	0.04	0.279 ± 0.086

личение времени срабатывания системы (уменьшение быстродействия) приводит к уменьшению средних значений критерия, причем это уменьшение тем больше, чем выше интенсивность турбулентных искажений.

Приведенные результаты позволяют заключить, что эффективность применения гибридной адаптивной системы всегда ниже, чем в случае ОВФ. При этом в системах с высоким быстродействием при малой интенсивности турбулентности это уменьшение относительно мало. В то же время именно гибридная система может обеспечить длительное взаимодействие с объектом и передать на него большое количество энергии.

Здесь уместно еще раз подчеркнуть, что основная проблема при использовании ОВФ в мощных лазерных системах заключается в том, что сформированный с помощью ОВФ волновой фронт «живет» недолго (т. к. ОВФ – это импульсная техника): в большинстве случаев длительность существования сформированного состояния составляет десятки–сотни наносекунд. За такое короткое время передать большое количество энергии невозможно. Поэтому канал ОВФ мы предлагаем использовать прежде всего для формирования опорного источника путем подсветки и для формирования с его помощью отраженного сигнала.

Медленная линейная АО позволяет осуществлять предварительную селекцию объекта-цели. Если же использовать изображение цели в качестве опорного источника [13], мы можем выполнять селекцию объекта и формировать излучение в интересующей нас области. Для улучшения качества коррекции и динамических характеристик адаптивных оптических систем в настоящее время разрабатывается метод «опережающей» коррекции, в основе которого лежит решение задачи прогноза фазового распределения в последующий момент времени, исходя из результатов фазовых измерений и измерений поперечной составляющей скорости ветра, полученных в данный момент. Это необходимо, поскольку адаптивная оптическая система для коррекции турбулентных искажений лазерного излучения представляет собой динамическую систему с обратной связью и характеризуется временем срабатывания, которое включает в себя время обработки информации, полученной видеокамерой, время вычисления управляющих воздействий на адаптивное зеркало и время отработки управляющих сигналов зеркалом, определяющееся его инерционностью и переходными процессами в механической конструкции зеркала [1, 10, 13, 14]. Время срабатывания может превышать допустимое время, в течение которого турбулентность «заморожена», прямо пропорциональное радиусу когерентности оптического поля и обратно пропорциональное поперечной составляющей скорости ветра (точнее, скорости эволюции фазовых искажений в канале распространения волны).

Традиционные адаптивные системы не могут осуществлять эффективную коррекцию, если собственное время срабатывания системы больше времени «замороженности». Можно улучшить характеристики адаптивной системы фокусировки, используя, например, текущие данные фазового профиля для прогноза фазовой поверхности в последующие моменты времени с учетом характерных параметров турбулентности и текущих смещений координат центров тяжести системы фокальных пятен на датчике волнового фронта. Нами было выполнено численное моделирование алгоритмов управления, учитывающих такой прогноз. Доказано, что «опережающая» адап-

тивная фазовая коррекция остается эффективной даже для медленного управления [1, 14].

Определим требования к характеристикам системы АО, обусловленным параметрами задачи (удаленность объекта, его скорость и т. д.) [9–13]. Будем исходить из того, что возможная оперативная дальность работы системы составляет 200–500 км. Прохождение лазерного пучка через атмосферу по столь длинной трассе будет ограничено облачностью и атмосферной турбулентностью.

В настоящее время стало очевидным следующее:

- в литературе практически отсутствуют экспериментальные данные о прохождении лазерного излучения по протяженным трассам;

- известные модели высотного хода для интенсивности атмосферной турбулентности неадекватны реальности: практически отсутствует информация о так называемой перемежаемости атмосферы [15];

- необходима более подробная информация о свойствах турбулентности на больших высотах (10–15 км над уровнем моря).

Разработчики подобных систем исходили из принципа, что мощный лазерный источник должен работать в отсутствие облачности вдоль трассы распространения излучения. Чтобы не иметь дело с облаками, которые серьезно блокируют излучение, система подсветки объекта должна располагаться на высоте 12–15 км, где в средних и высоких широтах Земли облака будут практически отсутствовать, однако для областей, близких к экватору, облака могут быть на высотах вплоть до 20 км. Объектом-целью для передачи лазерного излучения могут служить объекты, находящиеся на околоземных орбитах [16, 17].

При проведении оценок влияния турбулентности на параметры лазерного излучения мы исходили из известных параметров лазеров, являющихся потенциальными кандидатами для рассматриваемого применения: CO₂-лазера с длиной волны излучения $\lambda = 10.6$ мкм и иодного лазера с $\lambda = 1.315$ мкм. Известно, что турбулентность сильнее влияет на коротковолновое излучение. Сейчас можно уверенно сказать только то, что ожидаемый уровень турбулентности на высоте 10–15 км составит $10^{-17} - 10^{-18} \text{ м}^{-2/3}$.

Покажем, каких флуктуаций оптических параметров лазерных пучков следует ожидать. Возьмем в качестве исходной дистанцию $L = 300$ км, а также предположим, что апертура основного передающего телескопа равна 1.5 м. Коротковолновое излучение фокусируется более эффективно: можно показать, что плотность его мощности при фокусировке (для $\lambda = 1.315$ мкм) в 65 раз больше, чем при фокусировке длинноволнового излучения (для $\lambda = 10.6$ мкм). В то же время атмосферная турбулентность сильнее проявляется именно на коротких волнах. Это приводит к тому, что фаза и амплитуда оптической волны испытывают флуктуации, и радиус когерентности фокусируемого лазерного пучка уменьшается до 5–15 см (что примерно в 10–30 раз меньше размера исходной апертуры лазера). Кроме того, появляются также флуктуации интенсивности, дисперсия которых достигает 0.1–10.

Таким образом, даже при умеренных флуктуациях атмосферной турбулентности на дистанциях 200–300 км будут иметь место «сильные» флуктуации интенсивности. При таких флуктуациях интенсивности и фазы кака-либо фокусировка излучения (без применения адаптивной коррекции) практически неэффективна.

Считается, что применение систем АО может обеспечить компенсацию действия турбулентности. Однако соз-

дание реальной адаптивной системы встречает на своем пути серьезные проблемы, как технические, так и общезначимые. Для подобных систем одной из таких специфических проблем являются высокие требования к быстродействию системы. Из теории адаптивных систем известно, что система коррекции фазы оптической волны должна работать с частотой, определяемой скоростью переноса турбулентных неоднородностей через когерентную часть лазерного пучка. В то же время известно, что работающие сейчас адаптивные системы имеют полосу частот 300–500 Гц. Попробуем рассчитать, какие принципиальные ограничения на допустимые скорости объекта и уверенную дальность работы традиционных адаптивных систем это налагает.

Известно, что для эффективной коррекции необходимо, чтобы за время одного цикла адаптивного управления, равного $2L/c + \tau_a$, объект не уходил из изопланарной зоны [1, 16, 17], т. е. должно быть реализовано следующее неравенство:

$$\frac{v_{\text{об}}(2L/c + \tau_a)}{L} < \Theta_{\text{iso}},$$

где $v_{\text{об}}$ – скорость поперечного движения пучка или скорость движения объекта; τ_a – постоянная времени собственно адаптивной системы (она складывается из времени измерения волнового фронта датчиком, времени обработки сигналов и выработки управляющих воздействий на активный элемент (зеркало), а также времени управления активным зеркалом); Θ_{iso} – изопланарный угол в турбулентной атмосфере между источником излучения и объектом, примерно равный отношению радиуса Фрида к эффективной толщине турбулентной среды.

Предположим, что наша лазерно-оптическая система нацелена в зенит на объект через всю толщину атмосферы при длине волны излучения 0.55 мкм. Возьмем радиус когерентности Фрида, соответствующий лучшим по уровню турбулентности местам на Земле (примерно 20 см). Как известно, эффективная толщина атмосферной турбулентности при близких к зениту углах наблюдения составляет около 2 км приземной трассы. Следовательно, в хороших условиях угол изопланатизма атмосферы для обеспечения полной фазовой коррекции равен примерно 10^{-4} рад. Далее мы условно будем называть адаптивную систему «быстрой», если $2L/c > \tau_a$, в противном случае – «медленной».

В итоге получаем:

- для трассы длиной 150 км быстрой адаптивной системой будет считаться система с полосой частот шире 1 кГц. Для такой системы предельная скорость объекта $v_{\text{об}} < \Theta_{\text{iso}}c/2$, по которому «успевает» работать система, составляет менее 15 км/с;

- медленная система, работающая на трассе длиной 300 км, с полосой частот порядка 200 Гц может обеспечить работу по объекту с предельной скоростью менее 6 км/с.

Вместе с тем, применение ОВФ, а также любой другой адаптивной системы со сколь угодно большим быстродействием будет ограничено принципом оптической обратимости, лежащим в основе применения ОВФ для адаптивной коррекции. На языке математики функция Грина задачи при прямом и обратном проходах пучка по оптической трассе должна оставаться одинаковой, и, значит, вся система «заморожена». Если же оптическая трасса до-

статочно длинна, то функции Грина будут отличаться друг от друга (за счет времени пролета $2L/c$), что приведет к неполной коррекции. Это обстоятельство изначально ограничивает предельную дальность работы системы и связывает воедино уровень остаточных искажений, скорость движения объекта, параметры передатчика и радиус когерентности системы.

Как известно, традиционные адаптивные системы нуждаются в опорном источнике. Если же в качестве такового использовать сам объект, то необходимо учитывать принципиальные ограничения, связанные с временем прохождения лазерного пучка по трассе. Запаздывание можно оценить как время $t = 2L/c$, которое для трассы длиной 300 км составляет 2 мс. За такое время объект, движущийся со скоростью 2 км/с, сместится на 4 м, т. е. на угол 10^{-5} рад. Известно, что допустимое угловое рассогласование направления лазерного пучка и направления на объект (так называемый угол изопланатизма атмосферы) равно примерно $(5-10) \times 10^{-5}$ рад.

Здесь следует иметь в виду, что данная оценка угла изопланатизма предполагает, что речь идет о полной коррекции. Если же стремиться к коррекции только низших модовых составляющих фазовых флуктуаций, то угол изопланатизма можно увеличить в два-три раза. Так, например, радиус пространственной корреляции наклонов волнового фронта составляет $(1.2-1.8) \times 10^{-4}$ рад (для направления в зенит). Для полной фазовой коррекции мы получаем, что за время запаздывания целевой объект успевает уйти из изопланарной зоны, что делает адаптивную коррекцию неэффективной. Это опять ограничивает скорость объекта и его возможную дальность.

Единственный способ борьбы с данным явлением – применение техники лазерных опорных «звезд» [16]. В этом случае общее время запаздывания будет примерно в три раза меньше: для натриевых звезд на расстоянии около 100 км запаздывание составляет 0.8 мс. В итоге допустимые скорости для быстрых систем (типа ОВФ) можно оценить в ~ 150 км/с. Получаем, что даже для медленных адаптивных систем (с полосой частот 200 Гц) на дальности 300 км можно успеть захватить объекты, движущиеся со скоростью до 60 км/с.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при решении задач управления передачей лазерного излучения и задач повышения эффективности применения современных оптико-электронных систем при наблюдении в случайных средах (таких, например, как турбулентная атмосфера). При этом предлагаемый подход, заключающийся в применении традиционной АО в сочетании с нелинейно-оптической техникой, позволяет проводить измерения искажений волнового фронта с помощью датчика волнового фронта даже в случае, когда объект, на который направляется оптическое излучение, является слабо отражающим. Предполагается, что нелинейно-оптическая техника обеспечивает прием слабого оптического сигнала и его усиление до уровня, приемлемого для работы традиционного измерителя – датчика волнового фронта. Информация о флуктуациях фазы «сохраняется» в системе с помощью гибкого активного зеркала до тех пор, пока следующий импульс облучения цели не даст возможности обновить фазовую информацию. Частота обновления информации будет определяться условиями работы самой оптико-электронной системы. В частности, для работы в турбулент-

ной атмосфере требуемая частота будет определяться динамикой фазовых искажений в канале распространения излучения [16].

Настоящая работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН № 3.6. (проект 3.6.1 «Формирование оптических изображений и лазерных пучков излучения в турбулентной атмосфере при применении адаптивной оптики»).

1. Лукин В.П. *УФН*, **184** (6), 599 (2014).
2. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. *Обращение волнового фронта* (М.: Наука, 1985).
3. Беспалов В.И., Пасманик Г.А. *Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы* (М.: Наука, 1986).
4. Дмитриев В.Г. *Нелинейная оптика и обращение волнового фронта* (М.: Физматлит, 2003).
5. Канев Ф.Ю., Макенова Н.А., Хохлова Т.Е., Цыро Е.И. *Изв. Томского политехнического ун-та*, **314** (4), 119 (2009).
6. Lukin V.P., Kanev F.Yu., Kulagin O.V. *Proc. Int. Conf. «Laser Optics 2010»* (St.-Petersburg, 2010).
7. Berenberg V.A., Leshchev A.A., Soms L.N., Vasil'ev M.V., Venediktov V.Yu. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 465 (2001).
8. Sprangle P., Penano J.R., Markov V., Khizhnyak A., Ting A., Hafizi B., Davis C.C., DeSandre L. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8535**, 85350F1-10 (2012).
9. Кулагин О.В., Лукин В.П., Сергеев А.М., Петерсон Д., Вэлли М. *Труды XVI Междунар. симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»* (Томск, 2009, с. 2–5).
10. Lukin V.P. *Proc. Conf. High Power Laser Beams* (N.Novgorod, 2006, 68–70).
11. Кулагин О.В., Пасманик Г.А., Шилов А.А. *УФН*, **162** (6), 129 (1992).
12. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Коняев П.А. *Труды XVI Междунар. симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»* (Томск, 2009, с. 135–138).
13. Лукин В.П. *Оптика атмосферы и океана*, **27** (11), 949 (2014).
14. Fortes B.V., Kanev F.Yu., Lukin V.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1628**, 253 (1992).
15. Lukin V.P., Nosov V.V., Nosov E.V., Torgaev A.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **9292**, 9292OV (2014).
16. Lukin V.P. *J. Opt. Soc. Am. A*, **27** (11), A216 (2010).
17. www.airbornelaser.com.

ПОПРАВКА

В.А.Волков, М.В.Волков, С.Г.Гаранин, Ф.А.Стариков. Расчетное исследование фазировки многоканального лазерного пучка в турбулентной атмосфере («Квантовая электроника», 2015, т. 45, № 12, с. 1125–1131).

В статье допущены следующие опечатки.

1. Формула (2) для радиуса когерентности на с. 1126 должна иметь вид

$$r_0 = (0.159 C_n^2 k^2 L)^{-3/5}.$$

2. Формула для параметра Рытова на с. 1130 должна иметь вид

$$\sigma^2 \approx C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \approx \left[\frac{d^2}{r_0^2} \frac{L}{L_{\text{dif}}} \right]^{5/6}.$$