

PACS numbers: 42.68.Wt, 95.55.Cs, 95.75.Qr

Адаптивное формирование оптических изображений в атмосфере

В.П. Лукин

1. Введение

Как известно, адаптивная оптика эффективно применяется при формировании оптических пучков и изображений с целью обеспечения концентрации энергии лазерного пучка, повышения четкости оптического изображения, увеличения скорости передачи данных в оптических линиях связи, а также для решения ряда других специфических задач.

Исследования по разработке методов и систем адаптивной оптики (АО) проводятся в Лаборатории когерентной и адаптивной оптики Института оптики атмосферы СО РАН. Эти исследования направлены как на разработку теории адаптивных систем, так и на создание новых элементов, макетов систем и их алгоритмов.

2. Проблемы "видения" через атмосферу

Основную информацию в астрономии получают с помощью инструментов наземного базирования. Однако неоднородности атмосферы Земли (рефракция, турбулентность, поглощающие излучение газы, аэрозоли) серьезно ограничивают возможности астрономических систем. В конце 1960-х годов в работах Колчинского, Татарского, Фрида были сформулированы атмосферные ограничения астрономических систем. Результаты были получены для модели Колмогорова–Обухова спектра флуктуаций показателя преломления:

$$\Phi_n(\kappa, h) = 0,033 C_n^2(h) \kappa^{-11/3}, \quad \frac{1}{L_0} \ll \kappa \ll \frac{1}{l_0}.$$

Здесь $C_n^2(h)$ — структурный параметр показателя преломления атмосферы, h — текущая высота над подстилающей поверхностью в атмосфере, κ — волновое число для турбулентных неоднородностей, L_0, l_0 — внешний и внутренний масштабы турбулентности.

На основе решения задачи распространения оптических волн в случайно-неоднородных средах показано, что структурная функция фазы на расстоянии ρ подчиняется закону "5/3":

$$D_S(\rho) = 2,91 k^2 \int_0^\infty dh C_n^2(h) \rho^{5/3},$$

где $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны излучения. Исходя из последнего соотношения был введен в рассмотрение так называемый радиус когерентности атмосферы r_0 :

$$D_S(\rho) = 2,91 k^2 \int_0^\infty dh C_n^2(h) \rho^{5/3} = 6,88 \left(\frac{\rho}{r_0} \right)^{5/3},$$

который определяет предельное угловое разрешение оптической системы в турбулентной атмосфере $\gamma_0 = \lambda/r_0$, параметр Штреля астрономической системы атмосфера–телескоп $St = \exp(-\sigma^2)$, где σ^2 — дисперсия фазовых искажений, оптическую передаточную функцию, функцию размытия точки и другие параметры астрономического прибора.

Как показали исследования, выполненные в 1960-х годах, эти теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными при оптических апертурах порядка 2–4 м. Однако эффективные апертуры телескопов в наземной астрономии начали стремительно увеличиваться: появились такие телескопы, как БТА (Большой телескоп азимутальный) с апертурой 6 м, ММТ (Multiple Mirror Telescope) с матрицей из шести апертур по 8 м, NTT (New Technology Telescope) — 3,6 м, "Keck" — 10 м, VLTI (Very Large Telescope Interferometer) — 8,2 м, "Subaru" — 8 м. В связи с этим возник интерес к изучению фазовых флуктуаций оптических волн при приеме с большими апертурами.

2.1. Фазовые флуктуации оптических волн в турбулентной атмосфере

В 1970-х годах были созданы [1, 2] интерференционные измерители фазы волн оптического диапазона для исследования турбулентных флуктуаций фазы оптической волны при больших пространственных и временных задержках. Было обнаружено, что структурная функция фазы чувствительна как к интенсивности турбулентности, так и к внешнему масштабу турбулентности. Это заставило переосмыслить результаты работ Татарского и Фрида. В начале 1970-х годов в СССР (В. Покасов, В. Лукин), в Италии (Ронки, А. Консортини) и в США (Окс, Клиффорд) были измерены флуктуации фазы оптических волн, в результате чего практически одновременно был обнаружен эффект "насыщения структурной функции фазы" [1, 2]. Этот эффект получил объяснение в работах [1, 3, 4] на основе привлечения для его описания спектра турбулентности с конечным внешним масштабом. Напомним, что в модели Колмогорова–Обухова внешний масштаб турбулентности считается бесконечным.

В работах 1971–1980-х годов удалось развить последовательную теорию фазовых флуктуаций оптических волн при распространении в турбулентной атмосфере [1, 2] на основе использования спектров турбулентности с конечным внешним масштабом:

$$\Phi_n(\kappa, h) = 0,033 C_n^2(h) (\kappa^2 + \kappa_0^2)^{-11/6}, \quad \kappa_0 = \frac{2\pi}{L_0},$$

$$\Phi_n(\kappa, h) = 0,033 C_n^2(h) \kappa^{-11/3} \left[1 - \exp \left(-\frac{\kappa^2}{\kappa_0^2} \right) \right].$$

Были рассчитаны статистические характеристики флуктуаций фазы (дисперсия, корреляционные функции, спектры, структурная функция) как основного искажающего фактора для систем формирования изображения. Оказалось, что дисперсия дрожания изображения описывается [2] следующей формулой:

$$\sigma^2 \approx \int_0^\infty dh C_n^2(h) \left[(2R)^{-1/3} - \left(\frac{1}{4R^2} + \kappa_0^2 \right)^{1/6} \right],$$

где $2R$ — апертура телескопа, откуда видно, что внешний масштаб начинает оказывать влияние на дрожание изображения, даже когда апертура телескопа не превышает 0,01 от величины внешнего масштаба турбулентности.

В результате была показана существенная зависимость интегральных характеристик астрономических инструментов от астроклиматических характеристик атмосферы, в число которых входит внешний масштаб

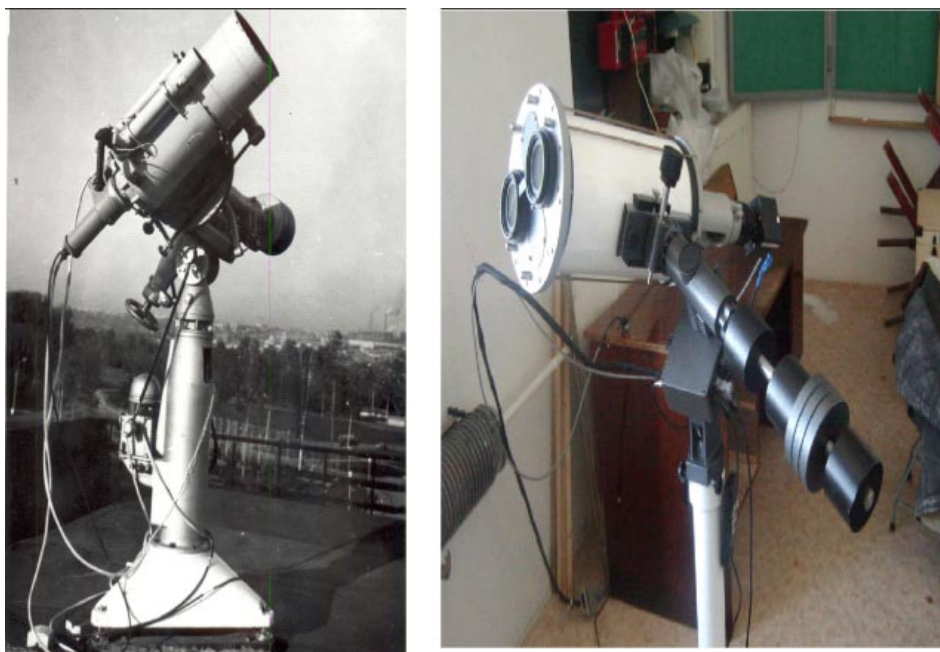


Рис. 1. Фотометрические измерители дрожания изображения астрономических объектов ИФУП (а) и ДИТ (б).

турбулентности. Позднее, используя данные измерений флуктуаций оптических волн при распространении на атмосферных трассах, удалось восстановить [2] значение внешнего масштаба атмосферной турбулентности и связать его величину с уровнем термодинамической устойчивости атмосферы.

2.2. Астроклиматические измерения

Наши расчеты и развитая нами теория позволили разработать новые измерители турбулентности атмосферы. Был создан целый ряд измерителей флуктуаций фазы оптического диапазона, в частности, ИФАС (измеритель фазы аналоговый следящий), испытанный в 1970–1976 гг., ИФУП (измеритель флуктуаций углов прихода), испытания которого прошли в 1979–1983 гг. на БТА [2, 3], ДИТ (дифференциальный измеритель турбулентности), прошедший испытания в 1996–1999 гг. на Большом солнечном вакуумном телескопе (БСВТ). Эти системы работали как с лазерным излучением, так и с излучением ярких (+4) звезд (рис. 1).

Экспериментальные данные, получаемые с помощью указанных приборов, дают возможность оценить как радиус когерентности атмосферы r_0 , так и внешний масштаб турбулентности L_0 . Это позволило уточнить параметры астроклимата атмосферы в ряде регионов России — на Северном Кавказе (Специальная астрофизическая обсерватория), вблизи озера Байкал (Байкальская астрофизическая обсерватория), на юге Иркутской области (обсерватория Монды).

2.3. Эффективный внешний масштаб

На основе анализа данных астроклиматических измерений было введено (1997 г.) новое понятие "эффективный внешний масштаб турбулентности" [4] для атмосферы в целом. Эффективный внешний масштаб турбулентности вводится как аппроксимация значения структурной функции фазы $D_S(\rho, C_n^2(h), L_0(h))$, для расчета которой используются модели или данные прямых измерений

вертикальной эволюции уровня турбулентности $C_n^2(h)$ и внешнего масштаба $L_0(h)$. Аппроксимация сводится к приравниванию:

$$D_S(\rho, C_n^2(h), L_0(h)) = D_S(\rho, C_n^2(h), L_0^{\text{eff}}),$$

т.е. к иному расчету структурной функции: профиль $C_n^2(h)$ задается согласно модели вертикальной эволюции, а внешний масштаб полагается равным постоянной величине, $L_0(h) = L_0^{\text{eff}}$. Это позволило районировать все обсерватории мира по значению параметра L_0^{eff} . Часть данных приведена в табл. 1. В настоящее время этот параметр атмосферы, представляющий собой реальную характеристику места расположения астрономического инструмента, широко используется. Для лучших обсерваторий мира L_0^{eff} находится в интервале 10–30 м [4].

2.4. Развитие теории анизотропной турбулентности

Характеристики атмосферной турбулентности в приземном слое с ровной подстилающей поверхностью хорошо описываются теорией подобия Монина–Обухова. В таком изотропном слое масштаб Монина–Обухова постоянен над всей территорией. Однако над горным рельефом возникают устойчивые вихревые образования, и в этом случае масштаб Монина–Обухова уже нельзя полагать постоянным. В атмосферно-оптических исследованиях, особенно в исследованиях по влиянию турбулентности на качество оптических изображений, часто приходится иметь дело с анизотропным пограничным слоем в горах. Поэтому представляла интерес разработка теории турбулентности, пригодной непосредственно для горных условий.

С использованием полуэмпирических гипотез теории турбулентности теоретически и экспериментально нами было установлено [5], что в произвольном анизотропном слое теория подобия Монина–Обухова выполняется локально, в окрестности каждой точки слоя. Следовательно, произвольный анизотропный слой является

Таблица 1. Сопоставление результатов измерений внешнего масштаба турбулентности

Год	Автор	Внешний масштаб, м	Инструмент измерения	Место измерения
1983	В.П. Лукин и др.	8–15	Телескоп с апертурой 60 см	Специальная астрофизическая обсерватория (САО), Россия
1984	Marriott et al.	8	Интерферометр I2T	Центр по изучению проблем геодинамики и астрономии (CERGA), Франция
1987	Colavita et al.	> 200	Звездный интерферометр "Mark III"	Обсерватория на горе Вильсона, США
1989	Tallon	5–8	Датчик волнового фронта "Hartmann-Shack"	Обсерватория Мауна Кия, США
1991	Rigaut et al.	50	Адаптивная система "Come-on"	Обсерватория Ла Сила, Чили
1991	Nightingale	2	Дифференциальный измеритель дрожания изображения DIMM	Обсерватория Ла Пальма, Испания
1993	Ziad et al.	5–100	Датчик волнового фронта "Hartmann-Shack"	Обсерватория Верхнего Прованса, Франция
1994	Agabi et al.	50–300	Измеритель дрожания изображения GSM1	Обсерватория Лазурного берега, Франция
1995	Busher et al.	10–100	Звездный интерферометр "Mark III"	Обсерватория на горе Вильсона, США
1995	Fuchs	1,5–2,4	Измерения с помощью шаров-пилотов	Обсерватория Сьерра Паранал, Чили

локально слабо анизотропным. Основным параметром турбулентности в таком слое является изменяющееся число Монина–Обухова.

На рисунке 2 приведены результаты сравнения теоретических и экспериментальных результатов, полученных в районе озера Байкал, для внешнего масштаба Татарского L_0^T в горном пограничном слое. Сравнение измеренных тремя разными методами масштабов L_0^T (по определению Татарского, из спектров по насыщению и

из спектров по 5/3-зависимости) показывает, что для анизотропного пограничного слоя результаты эксперимента и полуэмпирической теории находятся в удовлетворительном согласии [5, 6].

3. Развитие теории и практики атмосферных адаптивных систем

В 1977 г. нами были начаты работы по исследованию возможностей применения фазовой коррекции для уменьшения влияния атмосферы на параметры оптических систем. В период 1984–1986-х годов в основном была завершена разработка теории атмосферных адаптивных оптических систем [2, 6]. Основные результаты опубликованы в монографии [2] (1986 г.), которая в 1996 г. была переведена в США. Выделим наиболее значимые результаты.

В работе [6] (1979 г.) впервые были описаны двухцветные адаптивные системы, для которых длины волн корректирующего и опорного излучения не совпадают.

В работах [7, 8] впервые было предложено использовать для создания опорного источника оптический сигнал, рассеянный на неоднородностях атмосферы. В первой публикации по этому вопросу, сделанной нами в 1979 г., была рассчитана взаимная корреляционная функция флуктуаций фазы гауссова пучка и опорной плоской волны. В работе [7] впервые было предложено использовать сигнал обратного рассеяния от неоднородностей атмосферы для коррекции изображения. Предельные возможности коррекции изображения в телескопе с помощью опорного источника, сформированного в атмосфере на фиксированном расстоянии, рассчитаны в [8].

Сейчас эти исследования получили очень широкое развитие, возникло даже новое научное направление — создание и применение лазерных опорных звезд.

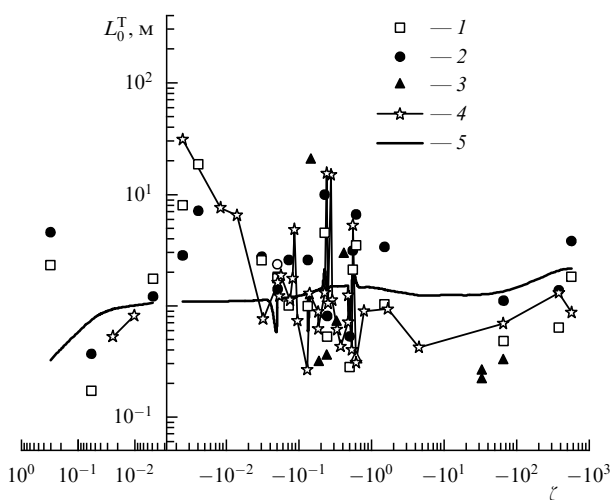


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и теоретических результатов для внешнего масштаба турбулентности L_0^T в горном анизотропном пограничном слое; ζ — безразмерные числа Монина–Обухова, рассчитанные по данным метеостанций. Экспериментальные данные получены из спектров по 5/3-зависимости (1), из спектров по насыщению (2) и по определению Татарского (3). Кривая 4 соответствует полуэмпирической теории для анизотропного слоя, кривая 5 — полуэмпирической теории для изотропного слоя.

Для изучения динамических свойств адаптивных систем впервые было предложено использовать идеи статистического предсказания флуктуаций. Был применен анализ адаптивных систем как динамических систем [9]. Помимо традиционных адаптивных систем постоянного запаздывания, рассмотрены возможности "скоростных" систем, а также "прогнозирующих" адаптивных систем. Определены предельно допустимые для адаптивных систем временные задержки, которые обеспечивают заданный уровень коррекции. Установлено, что они определяются эффективной скоростью ветра, радиусом когерентности атмосферы, а также параметрами оптической системы.

В этот же период были разработаны принципы и созданы макетные образцы [8, 10–14] отдельных компонентов адаптивной оптической системы: составные многокомпонентные зеркала, зеркала для быстрого управления наклонами волнового фронта, гибкие биморфные оптические элементы, следящие системы на диссекторе и координатно-чувствительных фотоприемниках. С помощью созданных макетных образцов отдельных компонентов адаптивных систем в 1981 г. были проведены [7] эксперименты по фазовой коррекции турбулентных и рефракционных искажений при формировании в атмосфере оптических изображений и лазерных пучков.

4. Адаптивная оптическая система для телескопов

В 1993–1994 гг. по заданию Министерства науки РФ была разработана адаптивная оптическая система для телескопа АСТ-10 (русского проекта адаптивного составного 10-метрового телескопа). Сам телескоп, имеющий составное 91-элементное зеркало, оказался слишком медленным для компенсации турбулентных искажений в реальном времени. Поэтому на основе

обобщения мирового опыта разработок подобных систем была предложена концепция коррекции с использованием адаптивного вторичного зеркала. Была промоделирована вся оптическая система телескопа, начиная с ошибок юстировки его первичного зеркала [15–18]. При выполнении проекта была предложена схема телескопа с адаптивным вторичным зеркалом, а также с зеркалом, управляемым по двум углам для стабилизации изображения в целом.

Исследовались также возможности частичной фазовой коррекции изображения с помощью адаптивного вторичного зеркала, различные уровни турбулентности на основе моделей атмосферы, различные типы активных зеркал (составные, гибкие, модовые), различные измерители волнового фронта [15–19]. Мы изучили влияние расфазировки первичного зеркала АСТ-10 на величину параметра Штреля.

Рассчитывалась функция размытия точки телескопа при частичной коррекции турбулентных искажений. Рассматривались как составные, так и гибкие зеркала с различным числом составляющих элементов, исследовано также влияние флуктуаций количества фотонов, приходящего на телескоп светового потока при работе адаптивной системы с излучением слабых звезд. Рассчитаны возможности работы телескопа с использованием лазерной опорной звезды [18–20].

Изучалось влияние турбулентной атмосферы на сигнал в большебазовых интерферометрах, включая звездные интерферометры. Выполнены аналитические и численные расчеты спектров разности фаз для сигналов звездных интерферометров с различными базами при различной ориентации вектора скорости ветра и измерительной базы интерферометра, при этом использовались различные модели спектра турбулентности и скорости ветра [18]. На рисунке 3 приведены спектры разности фаз в звездном интерферометре с различными измеритель-

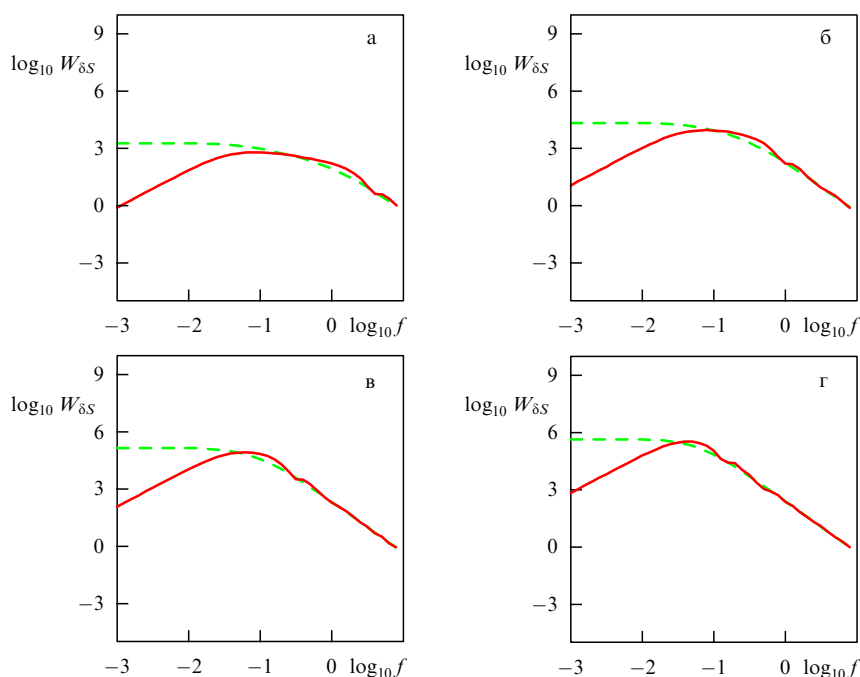


Рис. 3. Частотные спектры $W_{\delta S}(f)$ флуктуаций разности фаз δS для интерферометров с различными измерительными базами: (а) 3 м, (б) 12 м, (в) 38 м, (г) 85 м; δS — безразмерная величина, частота f измеряется в герцах.

ными базами — 3, 12, 38, 85 м. Сплошная и штриховая кривые соответствуют продольной и перпендикулярной взаимной ориентации измерительной базы и скорости ветра. Таким образом, показано, что определяющую роль играет выбор корректной модели высотного хода внешнего масштаба турбулентности.

5. Адаптивный солнечный телескоп

Мы предприняли попытку внедрить систему АО на Большом солнечном вакуумном телескопе (БСВТ) Института солнечно-земной физики СО РАН. Первый сезон был посвящен сбору данных о дневном астроклимате района озера Байкал. Использовался созданный нами прибор ДИТ (дифференциальный измеритель дрожания изображения) (см. рис. 1). Исследовано поведение искажений изображения Солнца, обусловленных особенностями данного региона. На основе этого был создан первый вариант АО-системы для БСВТ [20]. Его задача — обеспечить работу системы при наличии в поле зрения датчика волнового фронта контрастного "пятна" или "пóры" (рис. 4а).

Макет АО-системы, включающий в себя устройство для измерения смещения центра тяжести изображения, стабилизировал фрагмент в изображении Солнца. В качестве элемента для слежения выбиралось пятно (пóра) на поверхности Солнца. Было обеспечено улучшение качества изображения в 4–16 раз. Использовалось управляемое по двум координатам зеркало (рис. 4б) с пьезокерамическим приводом (два таких зеркала были переданы в Нанкинский центр астрономических инструментов Китая).

Результаты испытаний адаптивной системы показали ее высокую эффективность при работе с контрастным объектом. Дальнейшее развитие данного направления связано с созданием макета измерителя смещения изображения, обеспечивающего работоспособность в условиях малых вариаций интенсивности. Во время проведения испытаний адаптивной оптической системы на БСВТ в 2004 г. и 2005 г. контраст грануляционной картины в различных участках солнечного диска в среднем находился в интервале от 1 % до 4 % (рис. 5). Для работы в условиях низкого контраста изображения использовался корреляционный алгоритм измерения смещения фрагмента изображения. Последняя версия нашей адаптивной системы применяется для измерения смещения изображения грануляционной картины Солнца на основе модифицированного корреляционного алго-

ритма слежения [22]. На рисунке 6 видна устойчивая картина стабилизации изображения фрагмента поверхности Солнца. Контраст изображения при "длинной" (2 с) экспозиции в режиме слежения практически остается таким же, как и при "короткой" (2 мс) экспозиции.

Как развитие рассмотренных выше работ, нами предложена система адаптивной коррекции "Ангара" для коррекции высших аберраций волнового фронта, включающая в себя гибкое многоэлементное зеркало и датчик волнового фронта.

6. Лазерные опорные звезды

Применение в астрономии техники лазерных опорных звезд (ЛОЗ) обусловлено тем, что энергия излучения слабых звезд слишком мала, чтобы обеспечить одновременную работу адаптивных систем и самого теле-

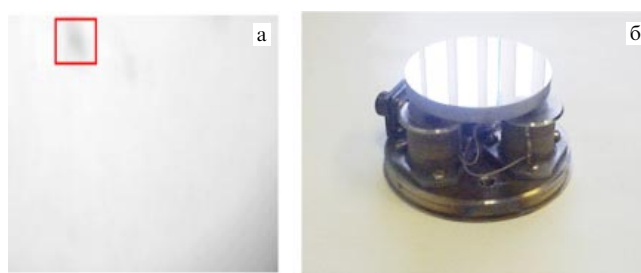


Рис. 4. (а) Фрагмент изображения солнечной поверхности в БСВТ. (б) Корректирующее зеркало.

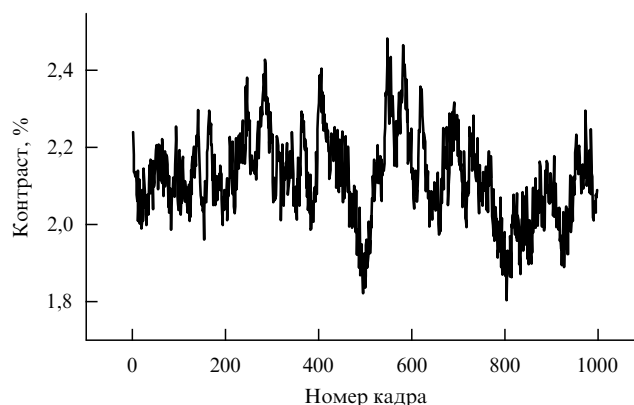


Рис. 5. Контраст изображения солнечной грануляции вблизи пятна в первом фокусе телескопа. Поле зрения приемника составляет 29×29 угловых секунд.

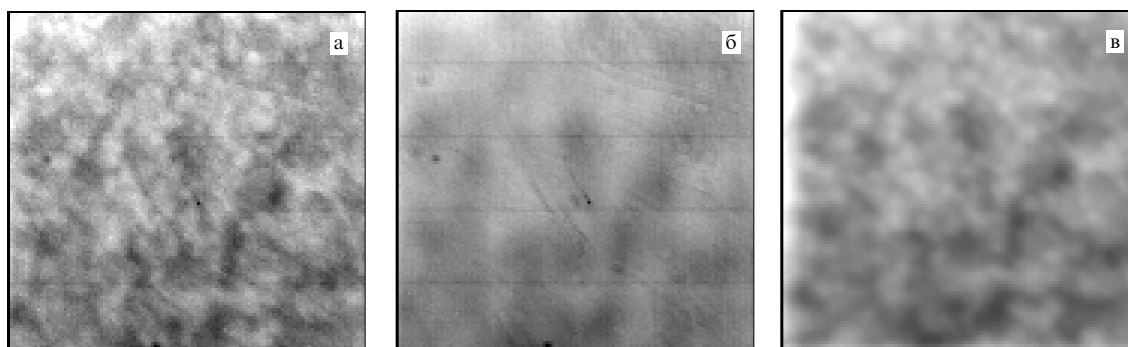


Рис. 6. Кадры грануляционной картины, полученные (а) в режиме короткой экспозиции (2 мс), (б) в режиме "длинной экспозиции" (2 с) без управления, (в) в режиме "длинной экспозиции" (2 с) с модифицированным корреляционным датчиком.

скопа. В работах 1979–1980-х годов [2, 8] впервые была показана возможность использования сигнала обратного рассеяния от неоднородностей атмосферы в качестве опорного бакена. Ряд научных экспериментов в начале 1980-х годов был выполнен в Научно-производственном объединении "Астрофизика" и в нашей лаборатории. Их результаты опубликованы в открытой печати в СССР и за рубежом. Между тем развитие подобных работ в США началось примерно в 1982 г., и вплоть до 1993 г. эти работы являлись засекреченными.

При всей привлекательности техника ЛОЗ имеет один существенный недостаток — это практическая невозможность коррекции общего наклона волнового фронта. Об этой проблеме было заявлено в ряде работ, в том числе в наших работах 1996 года [17–19]. Одним из возможных путей решения указанной проблемы [17, 18, 21–23] является использование алгоритма оптимальной коррекции, обеспечивающего минимум остаточных искажений наклона фронта, обусловленных его флуктуациями. Суть этого алгоритма заключается в масштабировании данных измерения положения изображения ЛОЗ с помощью весового множителя, который получается либо расчетным путем, либо путем прямых измерений.

Мы предложили гибридную схему, свободную от ряда недостатков предшествующих аналогов, а также новый подход к динамическому формированию ЛОЗ. Было показано, что применение ЛОЗ в виде *опорного креста*, создаваемого посредством сканирования двумя узкими лазерными пучками, обеспечивает эффективную коррекцию наклонов волнового фронта даже для телескопов с большой апертурой [21, 22].

7. Фазирование составного зеркала

Применение большого составного главного зеркала для телескопа ставит дополнительную проблему фазирования многоэлементного составного зеркала с оптической точностью. Были рассмотрены искажения в наземном телескопе, вызванные расфазировкой сегментов главного зеркала [22–24]. О характере соответствующего уменьшения критерия Штреля можно судить по рис. 7, который позволяет сравнить данные численного эксперимента с результатами теоретических исследований. Видно, что случайные смещения и наклоны сегментов зеркала приводят к значительным искажениям изображения. В частности, при смещениях с дисперсией порядка одной длины волны критерий Штреля уменьшается в пять и более раз относительно дифракционно-ограниченной величины.

Коррекция случайных смещений сегментов, имеющих амплитуду в несколько сотен длин волн, обычно проводится с помощью емкостных или индуктивных датчиков поверхности. В то же время существует возможность компенсации смещений на основе чисто оптических методов. В качестве целевой функции управления был выбран интерференционный критерий, построенный с использованием эталонной интерферограммы. На начальном этапе исследований для этого использовалась следующая оптическая схема. На стыки сегментов наклеивались специальные отражающие пластины. В плоскости наблюдения регистрировались положения центров тяжести пучков, отраженных от каждой из пластин. Находились смещения, по которым определялись случайные сдвиги сегментов. После определения

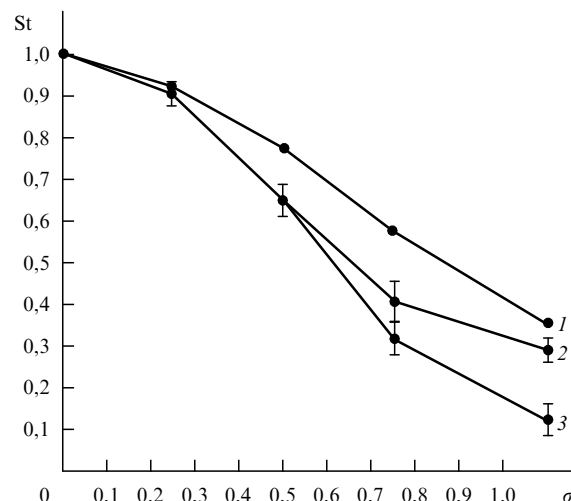


Рис. 7. Зависимость параметра Штреля от дисперсии случайных смещений, нормированной на длину волны излучения. Теоретические результаты (кривая 1) и данные, полученные в численном эксперименте для зеркала с числом сегментов 32×32 (кривая 2) и зеркала с числом сегментов 8×8 (кривая 3).

сдвигов проводилась их компенсация, или автоматическая, например с использованием алгоритма апертурного зондирования, или с помощью ручной юстировки.

Простейшие оценки показывают, что относительный сдвиг сегментов в 10 мкм приводит к смещению центров на расстояния Δz порядка 0,1 мм в плоскости, расположенной на расстоянии 1 м от поверхности сегментированного зеркала. В расчетах полагалось, что продольный размер пластин около 1 см. Такое смещение уверенно может быть зафиксировано современными цифровыми видеокамерами. Поэтому можно заключить, что предложенный алгоритм позволяет сфазировать поверхность составного зеркала с точностью до 1–2 длин волн при относительном начальном смещении, значительно превосходящем длину волны.

Нами предложен алгоритм фазирования, позволяющий уменьшить остаточные смещения сегментов зеркала до значений, меньших, чем длина волны оптического излучения. Когерентные пучки, генерируемые лазерным источником, отражались от двух соседних элементов и с помощью отклоняющих зеркал сводились в одну точку. В плоскости наблюдения регистрировалась интерференционная картина, положение полос которой определялось относительным фазовым сдвигом пучков. Для фазирования элементов использовался алгоритм апертурного зондирования, в котором управление пучками производилось только по одной координате.

В данном случае в качестве целевой функции управления был выбран интерференционный критерий, построенный с использованием эталонной интерферограммы. На начальном этапе исследований фазирование сегментов осуществлялось на длине волны $\lambda = 0,8$ мкм. Результаты численных экспериментов показали, что для значений начального смещения, меньших одной длины волны, $\Delta z = 0,367$ мкм, рассматриваемый алгоритм позволяет компенсировать расфазировку сегментов. В том случае, когда смещение превышает половину длины волны, алгоритм расходится, что приводит к увеличению сдвига сегментов. Расширение допустимого диапазона

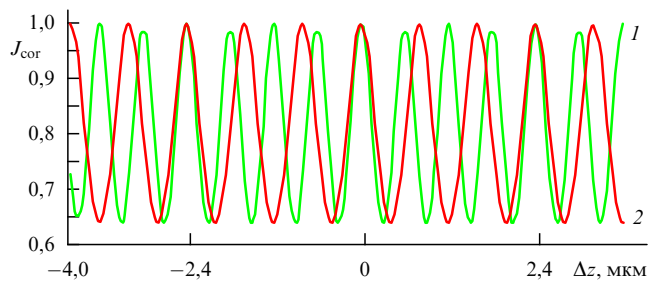


Рис. 8. Зависимости корреляционного критерия J_{cor} от относительного смещения сегментов зеркала Δz . Кривая 1 соответствует длине волны $\lambda_1 = 0,6$ мкм, кривая 2 — длине волны $\lambda_2 = 0,8$ мкм.

начальных смещений возможно при введении в алгоритм управления дополнительной длины волны. Так, значения критерия, вычисленные при изменении относительного сдвига сегментов для длин волн $\lambda = 0,6$ и $\lambda = 0,8$ мкм, приводятся на рис. 8. Из рисунка видно, что физический сдвиг сегментов на одинаковую величину дает для различных длин волн разные фазовые сдвиги. Максимумы критериев совпадают только при сдвигах $\Delta z = 0$ и $\Delta z = 2,4$ (–2,4) мкм. Дополнительное расширение диапазона компенсируемых сдвигов достигается за счет подбора длин волн интерферирующих пучков. Наконец, радикальное увеличение диапазона можно реализовать посредством введения третьей длины волны. Численные эксперименты показали, что при $\lambda_1 = 0,6$, $\lambda_2 = 0,7$ и $\lambda_3 = 0,8$ мкм фазирование осуществляется при начальном отклонении $\Delta z = 33,4$ мкм. Данные, характеризую-

Таблица 2. Максимально допустимое смещение Δz , при котором возможно фазирование поверхности зеркала. λ_i — длины волн, на которых выполняется управление

λ_1 , мкм	λ_2 , мкм	λ_3 , мкм	Δz , мкм
0,8	—	—	0,36
0,6	—	—	0,26
0,6	0,8	—	2,34
0,7	0,8	—	5,55
0,6	0,7	0,8	33,4

щие допустимые интервалы отклонений, приведены в табл. 2.

В заключение подведем итоги работ ИОА СО РАН по проблеме применения адаптивной оптики для улучшения видения через атмосферу как случайно-неоднородную среду. Предложенные методы и макеты систем успешно прошли лабораторные и натурные испытания, показав, что применение даже простейших систем АО дает существенный выигрыш. Разработки ИОА СО РАН можно внедрять в оптические системы видения и астрономические приборы для работы в рутинном режиме.

Список литературы

1. Lukin V P, Pokasov V V *Appl. Opt.* **20** 121 (1981)
2. Лукин В П *Атмосферная адаптивная оптика* (Новосибирск: Наука, 1986) [Lukin V P *Atmospheric Adaptive Optics* (Bellingham, Wash.: SPIE Press, 1996)]
3. Губкин С М и др. *Астрон. журн.* **60** 789 (1983)
4. Лукин В П *Оптика атмосферы и океана* **10** 516 (1997)
5. Носов В В и др. *Оптика атмосферы* **18** 845 (2005)
6. Lukin V P *Opt. Lett.* **4** 15 (1979)
7. Лукин В П, Емалеев О Н *Квантовая электроника* **7** 1270 (1980)
8. Лукин В П, Матюхин В Ф *Квантовая электроника* **10** 1264 (1983)
9. Zuev V E, Lukin V P *Appl. Opt.* **26** 139 (1987)
10. Емалеев О Н, Лукин В П *Квантовая электроника* **9** 2264 (1982)
11. Lukin V P et al. *J. Opt. Soc. Am. A* **11** 903 (1994)
12. Lukin V P *Proc. SPIE* **2222** 527 (1994)
13. Витриченко Э А и др. *Проблемы оптического контроля* (Отв. ред. И В Самохвалов) (Новосибирск: Наука, 1990).
14. Витриченко Э А и др. *ДАН СССР* **300** 312 (1988)
15. Fortes B V, Lukin V P *Proc. SPIE* **1688** 477 (1992)
16. Lukin V P et al. *Proc. SPIE* **2222** 522 (1994); Лукин В П и др. *Оптика атмосферы и океана* **8** 409 (1995)
17. Lukin V P, in *Adaptive Optics. Proc. of a Topical Meeting, October 2–6, 1995, Garching Germany* (ESO Workshop Proc., No. 54, Ed. M Cullum) (Garching bei München: European Southern Observatory, 1996) p. 373
18. Лукин В П, Фортес Б В *Астрон. журн.* **73** 419 (1996)
19. Лукин В П *Оптика атмосферы и океана* **9** 1433 (1996)
20. Лукин В П и др. *Оптика атмосферы и океана* **12** 1161 (1999)
21. Lukin V P *Appl. Opt.* **37** 4634 (1998)
22. Лукин В П и др. *Оптический журн.* **73** (3) 55 (2006)
23. Лукин В П, Фортес Б В *Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере* (Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999) [Lukin V P, Fortes B V *Adaptive Beaming and Imaging in the Turbulent Atmosphere* (Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2002)]
24. Канев Ф Ю, Лукин В П *Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования* (Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2005)