

## ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 621.378.325.535.3

**МОДЕЛЬ АДАПТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ****А. В. Корябин, М. Моради, В. И. Шмальгаузен***(кафедра общей физики и волновых процессов)*

E-mail: shm@lado8.phys.msu.su.

**Описывается комплекс программ для моделирования влияния анизопланатизма на работу адаптивной оптической системы фазового сопряжения в условиях неоднородной атмосферной турбулентности. Удаленные опорный и наблюдаемый объекты считались точечными. Атмосферная турбулентность моделировалась с помощью движущихся случайных фазовых экранов с заданной статистикой. Разработанное программное обеспечение позволяет рассчитывать мгновенные и усредненные значения фазовых ошибок коррекции при различном угловом разнесении источников и широком диапазоне параметров адаптивной системы и атмосферных неоднородностей.**

Получение неискаженного изображения протяженного объекта является актуальным вопросом многих приложений волновой оптики, в частности задач, связанных с видением сквозь турбулентную атмосферу. Адаптивная система может компенсировать фазовые искажения, вызванные флуктуациями показателя преломления турбулентной среды, но такая компенсация эффективна только в пределах области изопланатизма. Это ограничение связано с тем, что атмосферная турбулентность формирует трехмерное случайное поле, тогда как адаптивная оптическая система осуществляет коррекцию фазы в одной плоскости, определяемой положением корректора волнового фронта (ВФ). Если геометрические размеры объекта превышают размер изопланатической области (протяженный объект), то оптические пути, по которым идут волны от разных точек такого объекта, различны. Следовательно, существенно различны и приобретаемые этими волнами фазовые искажения. Этот эффект называется анизопланатизмом оптической системы [1].

По мере увеличения угла между направлениями на точку наблюдения на объекте и на опорный источник корреляция между фазовыми искажениями, накопленными вдоль этих направлений, уменьшается, что приводит к неполной коррекции изображения удаленных от опорного источника областей. Этот эффект сильно зависит от статистики атмосферных неоднородностей и их высотного распределения. Все это затрудняет анализ работы адаптивной оптической системы в атмосфере. При расчетах обычно пользуются приближением однородной атмосферы или однородного слоя [2].

Метод численного моделирования [3] позволяет обойти большинство трудностей и получить типичные реализации фазовых искажений в адаптивной системе в условиях анизопланатизма.

Используемая модель должна позволять рассчитывать мгновенные (неусредненные) распределения фазы опорной волны в плоскости приемной апертуры, реакцию датчика ВФ и его выходные сигналы, вносимую фазовую коррекцию. На основе этих данных можно рассчитать остаточные ошибки коррекции и оценить качество изображения любой области объекта.

Программа включает блоки, моделирующие распространение световой волны в турбулентной атмосфере, воздействие волны от опорного источника на датчик ВФ, коррекцию ВФ наблюдаемого объекта и производящие вычисление и обработку остаточных ошибок.

Для моделирования атмосферы применялся метод фазовых экранов. Слой турбулентной атмосферы, находящийся между объектом и приемной апертурой, представлялся в виде некоторого числа тонких фазовых экранов (рис. 1). Волны от опорного источника  $p_1$  и некоторой точки наблюдаемого объекта  $p_2$ , разнесенных на расстояние  $r$  под углом  $\alpha$  к оси  $x$ , регистрируются отдельно в пределах приемной апертуры диаметра  $D$ . Считается, что от экрана к экрану волна распространяется без искажений, а на экранах приобретает только случайные фазовые набегии. Интенсивность излучения предполагается неизменной (фазовое приближение). Варьируя распределения фазовых набегов на экранах можно моделировать турбулентную атмосферу с различными свойствами. Реализации экранов были получены по известной методике [4], позволяющей синтезировать экраны, соответствующие различным параметрам и спектрам турбулентности. При расчетах обычно использовались четыре экрана, которые могли двигаться с некоторой скоростью (модель ветра) поперек направления наблюдения.

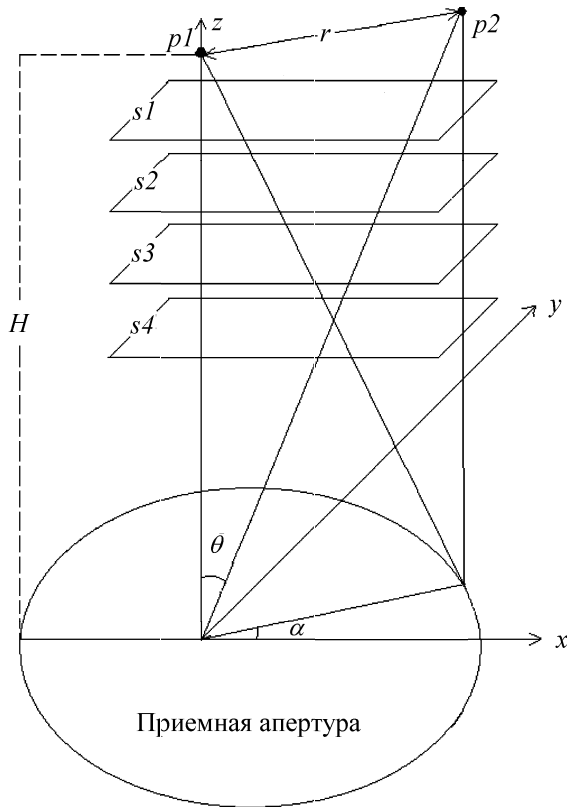


Рис. 1. Расчетная схема модели атмосферы

В качестве анализатора ВФ моделировался датчик Шака–Гартмана [5]. В плоскости приемной апертуры располагался линзовый растр, а перед каждой линзой — аподизирующая диафрагма. Смещения центров тяжести фокальных пятен служили мерой локальных наклонов ВФ в пределах каждой линзы (субапертуры). По измеренным локальным наклонам восстанавливались коэффициенты Цернике опорной волны по методу наименьших квадратов.

В адаптивной системе реализован алгоритм фазового сопряжения. Корректирующая фазовая добавка была равна по величине и обратна по знаку измеренной фазе опорного источника. При коррекции учитывалось лишь некоторое ограниченное число членов разложения по полиномам Цернике — таким образом учитывалось ограниченное число степеней свободы корректора. ВФ скорректированной таким образом волны от объекта анализировался и определялись остаточные aberrации в зависимости от величины разнесения источников. Модель позволяла регистрировать изменение во времени aberrационных коэффициентов так, как это происходит в адаптивной системе при наблюдении сквозь движущийся турбулентный слой.

На рис. 2 приведены зависимости величин нормированных квадратов ошибки  $\varepsilon_i^2$  компенсации для нескольких различных aberrаций, усредненные по 50 измерениям. Расчеты проведены для однородного турбулентного слоя с колмогоровским спектром. Видно, что область хорошей компенсации наклонов

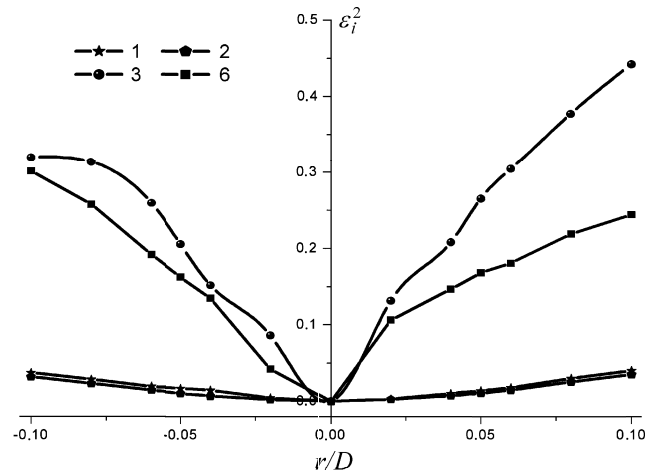


Рис. 2. Нормированная ошибка коррекции различных aberrаций в зависимости от разнесения точки наблюдения и опорного источника; 1 — X-наклон, 2 — Y-наклон, 3 — дефокус, 6 — X-кома (4 экрана,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $D/r_0 = 2$ )

(кривые 1 и 2) значительно шире, чем для aberrаций высших порядков. Эта характерная особенность согласуется с теоретическими представлениями. Нерегулярный характер кривых для высших aberrаций при значительных разнесениях источников связан с недостаточным числом усреднений.

На рис. 3 показаны флуктуации квадрата остаточной ошибки  $\delta_i^2$  коррекции с учетом 10 мод Цернике за вычетом наклонов при снос турбулентности поперечным ветром. Как видно из рисунка, можно выделить интервалы времени заметной протяженности, в течение которых aberrации существенно меньше среднего значения. Это обстоятельство иллюстрирует возможность получения высококачественных короткоэкспозиционных снимков сквозь турбулентную атмосферу при удачном выборе момента съемки [6].

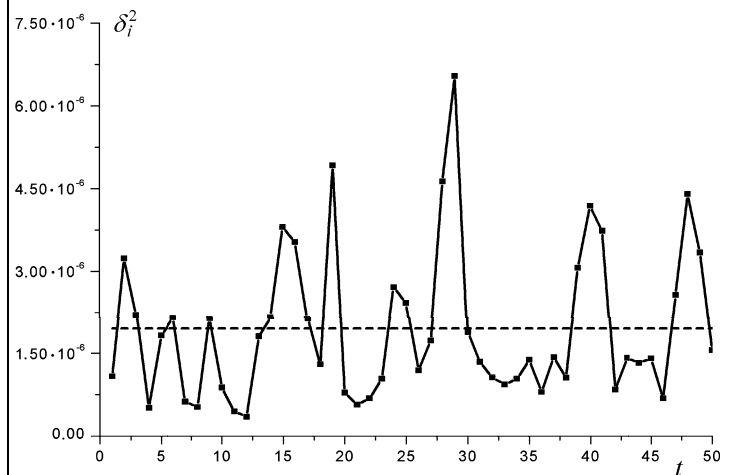


Рис. 3. Флуктуации остаточной квадратичной ошибки коррекции во времени при снос турбулентности поперечным ветром. Пунктиром показано среднее значение квадратичной ошибки (4 экрана,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $r = 0.5D$ ,  $D/r_0 = 2$ )

Авторы благодарны С. С. Чеснокову за предоставленные файлы фазовых экранов.

**Литература**

1. *Fried D.L.* // J. Opt. Soc. Am. 1982. **72**. P. 52.
2. *Шмальгаузен В.И., Яицкова Н.А.* // Оптика атмосферы и океана. 1996. **9**, № 11. С. 1462.
3. *Лукин В.П., Фортес Б.В.* Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере. Новосибирск, 1999. Гл. 1, 2.
4. *Chesnokov S.S., Kandidov V.P., Shlenov S.A., Tamarov M.P.* // SPIE. **3432/25**. P. 14.
5. *Platt B.C., Shack R.* // J. of Refractive Surgery. 2001. **17**, Sep./Oct. P. 573.
6. *John, S., Vorontsov, M.A.* // Proc. Intern. Confer. Multimedia and Expo, 2003. ICME'03. **1**. P. 6.

Поступила в редакцию  
05.10.04