

П.А. Бакут, И.В. Бояркина, А.Д. Ряхин

О РАЗРЕШЕНИИ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ С ЧЕТЫРЕХСЕГМЕНТНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ СЛУЧАЙНЫХ НАКЛОНОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Проведено моделирование адаптивной оптической системы с непрерывным гибким зеркалом. Оценка случайных наклонов волнового фронта осуществлялась по сдвигам центров тяжести изображений, формируемых 4-мя участками апертуры. Получена зависимость разрешающей способности системы от значения отношения диаметра апертуры к размеру области корреляции атмосферных искажений. Оценена потенциальная разрешающая способность системы. Проведено сравнение характеристик вышеназванной системы с характеристиками систем с компенсацией общего наклона и четырехсегментным зеркалом. Показано, что исследуемая система в 2,1 раза эффективнее системы с компенсацией общего наклона и в 1,2 раза — системы с четырехсегментным зеркалом.

В настоящее время во всем мире активно исследуются различные адаптивные системы оценки и компенсации атмосферных искажений принимаемого светового излучения с целью формирования по нему изображения наблюдаемого объекта [1]. Одной из простейших оказывается система, основанная на измерении наклонов волнового фронта излучения по сдвигам соответствующих короткоэкспозиционных изображений (КИ) и их компенсации в процессе формирования длинноэкспозиционного изображения (ДИ). Ее теоретический анализ, подтвержденный реальными экспериментами [2, 3, 4], показывает, что подобная компенсация может обеспечить почти четырехкратное повышение разрешения, но для сравнительно малых приемных апертур D . Максимальный выигрыш обеспечивается при $D \approx 4r_0$, где r_0 — параметр Фрида, характеризующий размер области корреляции искажений поля излучения [2], а при $D > 6r_0$ эффективность системы резко падает.

Очевидным путем расширения границ ее практической эффективности является определение и компенсация частных наклонов волнового фронта на отдельных сегментах апертуры. В четырехсегментной системе, как было показано путем математического моделирования в [5], удастся увеличить выигрыш по разрешению до 4,5 раз и расширить диапазон эффективности до $10r_0$. Однако практическая реализация подобной системы предполагает использование не четырех жестких сегментов — секторов круговой апертуры, а обычного компенсатора общего наклона и гибкого зеркала с 16 толкателями. Эти толкатели, будучи почти равномерно распределенными по апертуре (по четыре на каждый сегмент), обеспечивают компенсацию частных наклонов, оцениваемых, как и ранее, по сдвигам КИ, параллельно сформированных по соответствующим участкам волнового фронта принимаемого излучения. Это обусловило необходимость уточнения результатов предыдущей работы [5].

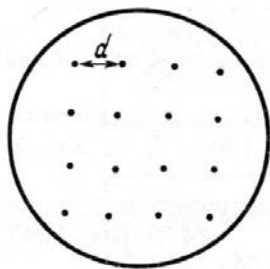


Рис. 1. Размещение толкателей по апертуре

Было проведено математическое моделирование процесса формирования ДИ точечного источника для описанной адаптивной системы при следующих условиях:

- для получения ДИ достаточно усреднения 100 КИ;
- функция отклика зеркала $F_j(\mathbf{v})$ на воздействие j -го толкателя имеет вид

$$F_j(\mathbf{v}) = A_j \exp \left\{ - \frac{(\mathbf{v} - \mathbf{v}_j)^2}{2\sigma^2} \right\},$$

где A_j — амплитуда воздействия; \mathbf{v}_j — точка приложения j -го толкателя; σ — параметр, характеризующий ширину отклика;

— оценка углового разрешения R формируется как отношение интенсивности в центре ДИ к его полной энергии и сравнивается с предельным разрешением R_∞ , достигаемым при $D/r_0 \rightarrow \infty$ и равным [2]

$$R_\infty = \frac{\pi}{4} \left(\frac{r_0}{\lambda} \right)^2,$$

где λ — длина волны.

Размещение 16 толкателей по апертуре представлено на рис. 1, при этом шаг d равен $\sim 1/5D$.

Как уже отмечалось, при практической реализации рассматриваемой системы мгновенные амплитуды A_j предполагается определять из условия компенсации наклона волнового фронта на соответствующем i -м сегменте как

$$A_j = (\mathbf{a}_i - \mathbf{a}) (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_{ci}),$$

где \mathbf{v}_{ci} — геометрический центр сегмента; $a_i = S_i^{-1} \int d\mathbf{v} W_i(\mathbf{v}) \text{grad} \varphi(\mathbf{v})$ — частный наклон волнового фронта; $W_i(\mathbf{v})$ — апертурная функция i -го сегмента; $S_i = \int d\mathbf{v} W_i(\mathbf{v})$ — площадь i -го сегмента;

$\varphi(\mathbf{v})$ — мгновенное распределение атмосферных искажений фазы поля излучения; $\mathbf{a} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \mathbf{a}_i$ — независимый компенсируемый общий наклон.

Для определения потенциальных возможностей дайной системы дополнительно исследовался случай, когда амплитуды A_j находились из условия

$$\int d\mathbf{v} W(\mathbf{v}) [\varphi(\mathbf{v}) - \sum_{i=1}^{16} F_j(\mathbf{v})]^2 = \min.$$

В процессе моделирования при значениях D/r_0 от 1 до 15 наигрывалось по 100 случайных реализаций искажений $\varphi(\mathbf{v})$ со структурной функцией, изменяющейся по закону $5/3$. Исследование системы проводилось при различных значениях параметра σ . Полученные результаты отражены на рис. 2, 3, где для сравнения приведены аналогичные характеристики ранее исследованных систем. Здесь для простоты обозначены: исследуемая система — I, «потенциальная» система — II, с компенсацией общего по всей апертуре наклона — III, с четырехсегментным зеркалом — IV. Нетрудно убедиться, что: 1) максимальное разрешение системы I достигается при $D/r_0 = 4$, $D/\sigma = 5$ и равно $5,65 R_\infty$; 2) максимальный выигрыш системы I по сравнению с системой III составляет 2,1 при $D/r_0 = 6$, а по сравнению с IV — 1,2 при $D/r_0 = 4$; 3) максимальное разрешение системы II достигается при $D/r_0 = 7$, $D/\sigma = 3$ и равно $20,6 R_\infty$, что в 3,5 раза больше, чем разрешение системы I.

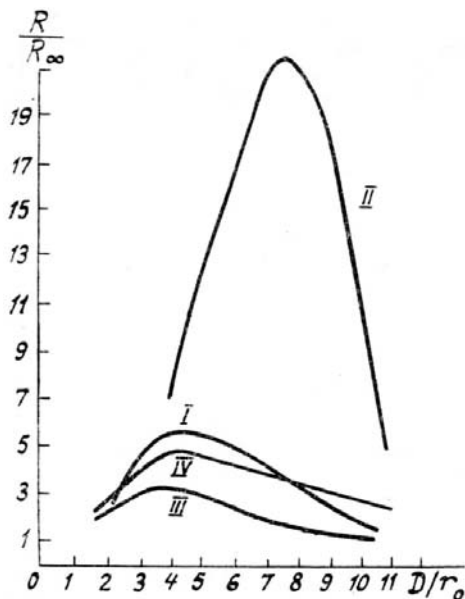


Рис. 2. Зависимость R/R_∞ от D/r_0 для систем: I — исследуемая система $\sigma \neq 3$; II — «потенциальная» система $\sigma = 6$; III — система с компенсацией общего наклона; IV — система с четырехсегментным зеркалом

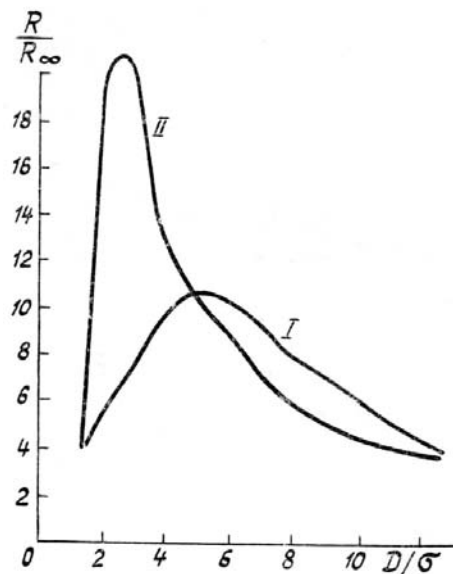


Рис. 3. Зависимость R/R_∞ от D/σ при $D/r_0 = 4$ для системы I, при $D/r_0 = 7$ для системы II

Таким образом, можно прийти к выводу, что при оценке наклонов волнового фронта по сдвигу центра тяжести КИ, адаптивная система с непрерывным гибким зеркалом является малоэффективной по отношению к системе с сегментированным зеркалом. Однако потенциальные возможности данной системы велики, и при разработке соответствующих алгоритмов можно существенно повысить разрешение исследуемой адаптивной системы.

1. Parent R. R. // SPIE. V. 1000. 1988. P. 101–109.
2. Fried D. L. // J. Opt. Soc. Amer. 1966. V. 56. № 10. P. 1372.
3. Бакут П. А., Белкин Н. Д., Ряхин А. Д., Свиридов К. Н., Устинов Н. Д. // Автометрия. 1983. Т. 5. С. 72–76.
4. Протасов Ю. П., Ситников В. Н. // Оптические свойства земной атмосферы, бильность и адаптивные телескопы. Л.: Наука, 1988.
5. Бакут П. А., Бояркина И. В., Ряхин А. Д. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 5. С. 527–530.

Поступило в редакцию
25 февраля 1990 г.

P. A. Bakut, I. V. Boyarkina, A. D. Ryakhin. The Resolution of the Adaptive System with the Four Segments Compensation of Random Wavefront Tilts.

The simulation of the adaptive system with a continuous flexible mirror was carried out. Random tilts of wavefront were estimated by shifts of gravity centers of images from four parts of the aperture. The resolution of the system was obtained as a function of the ratio of the aperture diameter to atmospheric perturbation correlation domain and the potential system resolution was estimated. The characteristics of the system were compared with the characteristics of the systems with compensation of the overall tilt and with four segmented mirror.