

П.А. Бакут, И.В. Бояркина, А.Д. Ряхин

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЕ С КОМПЕНСАЦИЕЙ СЛУЧАЙНЫХ НАКЛОНОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА НА СЕГМЕНТАХ АПЕРТУРЫ

Проведено моделирование адаптивной оптической системы с независимой компенсацией случайных локальных наклонов волнового фронта на четырех сегментах (секторах) апертуры. Оценка наклонов осуществлялась по сдвигам центров тяжести изображений, формируемых соответствующими сегментами апертуры. Получена зависимость разрешающей способности системы от значения отношения диаметра апертуры к размеру области корреляции атмосферных искажений (параметру Фрида). Показано, что компенсация четырех локальных наклонов позволяет повысить разрешение в 1,9 раза по сравнению с компенсацией общего по всей апертуре наклона волнового фронта.

При использовании телескопов небольшого размера, диаметр апертуры D которых незначительно превышает размер области корреляции атмосферных искажений поля светового излучения (величину параметра Фрида) $r_0(D/r_0 < 4)$, каждую короткоэкспозиционную реализацию фазовых искажений достаточно точно можно аппроксимировать средним по апертуре постоянным фазовым сдвигом и наклоном волнового фронта \mathbf{a} . Хорошо известно, что дисперсия ошибки подобной аппроксимации равна $0,14(D/r_0)^{5/3}$ и вплоть до $D = 3,5r_0$ практически не превышает 1 рад^2 . Поскольку постоянные фазовые сдвиги не влияют на качество изображения, а наклоны волнового фронта приводят к простому смещению изображения, то в этом случае оказывается эффективной адаптивная компенсация, обеспечивающая отслеживание смещений формируемого изображения и тем самым совмещающая короткоэкспозиционные изображения в процессе их длинноэкспозиционного накопления [1]. Исследованию подобных систем был посвящен ряд теоретических и экспериментальных работ [2–4]. Было показано, что компенсация случайных наклонов может обеспечивать заметное (до 4 раз) повышение разрешающей способности системы. Однако эффективность подобной системы резко падает при увеличении диаметра апертуры до значений, больших чем $4r_0$. Одним из очевидных путей расширения ее границ применимости является определение и компенсация частных наклонов волнового фронта на отдельных сегментах апертуры. Простейшая реализация данного подхода заключается в разбиении апертуры на четыре равных сектора (сегмента). Оценивая максимальный размер сегментов как $3-4r_0$, можно ожидать значительного улучшения качества формируемого подобной системой изображения при диаметрах апертур вплоть до $6-8r_0$. В настоящей статье исследуется адаптивная система с компенсацией четырех локальных наклонов, определяемых по сдвигам центров тяжести короткоэкспозиционных изображений.

С целью определения потенциальной зависимости средней разрешающей способности R от отношения D/r_0 системы с компенсацией четырех субнаклонов по четырем сегментам апертуры и оценки ожидаемого выигрыша по сравнению с ранее исследованными системами было осуществлено математическое моделирование процессов формирования среднего (длинноэкспозиционного) изображения точечного источника в следующих системах.

- 1) Обычная система без какой-либо компенсации.
- 2) Система с адаптивной компенсацией общего по апертуре наклона \mathbf{a}' волнового фронта, оцениваемого по сдвигу центра тяжести соответствующего короткоэкспозиционного изображения.
- 3) Система с компенсацией наклонов \mathbf{a}_i , оцениваемых по сдвигам центров тяжести короткоэкспозиционных изображений, сформированных соответствующими сегментами апертуры.
- 4) Система 3 с дополнительной компенсацией средних по сегментам постоянных фазовых сдвигов γ_i , определяемых из условия минимальной «изломанности» компенсирующего волнового фронта вида:

$$\int d\mathbf{v} W_i(\mathbf{v}) [\mathbf{a}_0\mathbf{v} - \gamma_i - \mathbf{a}_i\mathbf{v}]^2 = \min, \quad (1)$$

где \mathbf{v} — координаты в плоскости апертуры; $W_i(\mathbf{v})$ — апертурная функция i -го сегмента. Наклон \mathbf{a}_0 выбирается из условия минимума (1).

Полезно отметить, что \mathbf{a}_0 оказывается равным \mathbf{a}' . Для доказательства достаточно вспомнить, что наклоны волнового фронта \mathbf{a} связаны с распределением короткоэкспозиционной реализацией фазовых искажений $\varphi(\mathbf{v})$ равенствами [5]:

$$\mathbf{a} = S^{-1} \int d\mathbf{v} W(\mathbf{v}) \text{grad } \varphi(\mathbf{v});$$

$$\mathbf{a}_i = S_i^{-1} \int d\mathbf{v} W_i(\mathbf{v}) \text{grad } \varphi(\mathbf{v}),$$

где $W(\mathbf{v}) = \sum_i W_i(\mathbf{v})$ — полная апертурная функция; $S = \int d\mathbf{v} W(\mathbf{v})$, $S_i = \int d\mathbf{v} W_i(\mathbf{v}) = S/4$, а мини-

мум (1) достигается при $\mathbf{a}_0 = \frac{1}{4} \sum_i \mathbf{a}_i$.

5) «Оптимальная» четырехсегментная адаптивная система, в которой локальные значения наклонов и сдвигов γ_i определяются непосредственно по каждой реализации фазовых искажений $\varphi(\mathbf{v})$ в соответствии с условием вида:

$$\int d\mathbf{v} W_i(\mathbf{v}) [\varphi(\mathbf{v}) - \gamma_i - \mathbf{a}_i \mathbf{v}]^2 = \min. \quad (2)$$

6) Адаптивная система, в которой локальные наклоны волнового фронта определяются по сдвигам центров тяжести короткоэкспозиционных изображений, а постоянные фазовые сдвиги по реализациям фазовых искажений из условия (2).

Забегаая вперед, заметим, что характеристики адаптивной системы, в которой осуществляется компенсация только наклонов волнового фронта, определяемых по реализациям фазовых искажений, практически совпадают с характеристиками системы п. 3. В силу этого данная система здесь не рассматривается.

В процессе моделирования при отношениях D/r_0 от 1 до 15 наигрывалось по 128 случайных реализаций фазовых искажений $\varphi(\mathbf{v})$ с структурной функцией, изменяющейся по закону 5/3. После чего для каждой системы при фиксированном значении D/r_0 усреднялись соответствующие 128 короткоэкспозиционных изображений и осуществлялась оценка разрешения R как отношения интенсивности в центре (максимуме) среднего изображения к его полной энергии. Необходимо подчеркнуть, что для всех 6-ти систем существует общий предел разрешения, достигаемый при $D/r_0 \rightarrow \infty$ и равный [5]:

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

где λ — длина волны; F — фокусное расстояние.

На рисунке представлены полученные зависимости R_k/R_∞ от отношений D/r_0 для 1–6 систем.

На основании полученных результатов можно сделать следующие основные выводы.

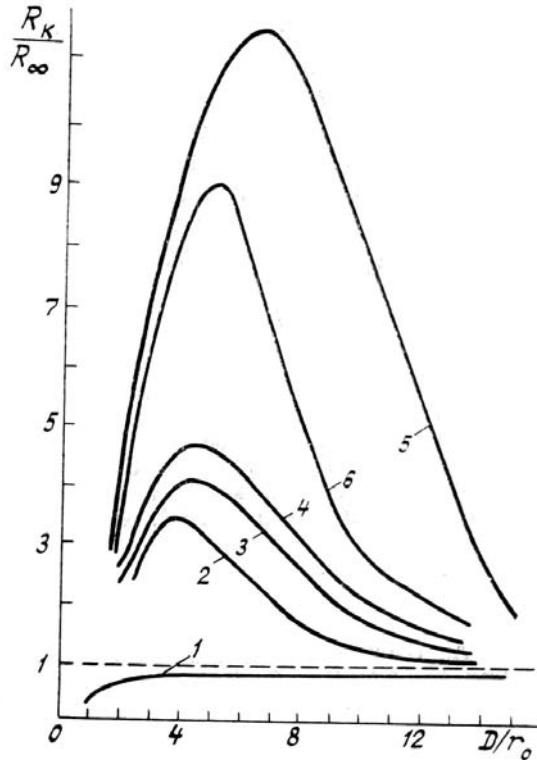
1. Максимальный выигрыш в разрешении адаптивной системы с компенсацией общего наклона волнового фронта по сравнению с системой без какой-либо компенсации составляет 3,7 и достигается при $D/r_0 = 3,5$. Максимальное значение разрешения адаптивной системы с компенсацией общего наклона волнового фронта достигается при $D/r_0 = 3,5$ и равно $3,3R_\infty$. В ранее проводимых исследованиях максимальное значение разрешения подобной системы достигало $3,5R_\infty$, а выигрыш в разрешении данной системы по сравнению с системой без какой-либо компенсации составлял 4. Различие в значениях разрешения и в значениях выигрыша данной системы можно объяснить тем фактом, что в предыдущих работах оценка наклонов волнового фронта проводилась непосредственно по реализациям фазовых искажений, что является более точным способом (но, как правило, не реализуемым на практике) по сравнению с оценкой наклона волнового фронта по сдвигу центра тяжести изображения.

2. Исследуемая система с компенсацией четырех субнаклонов волнового фронта по отдельным сегментам апертуры, определяемых по сдвигу центров тяжести короткоэкспозиционных изображений, является эффективной по отношению к системе с компенсацией общего наклона волнового фронта. При этом максимальный выигрыш данной системы составляет 1,7 и достигается при $D/r_0 = 6$. Отношение D/r_0 , при котором разрешающая способность системы достигает максимального значения $3,95R_\infty$ равно 4,5.

3. Диапазон значений D/r_0 , при которых исследуемая система эффективна по отношению к системе с компенсацией общего наклона волнового фронта, составляет от 3 до 10.

4. При осуществлении дополнительной компенсации продольных смещений с целью устранения разрывов волнового фронта на границах сегментов, качество формируемого изображения улучшается. Максимальное значение разрешения такой системы достигает $4,5R_\infty$ при $D/r_0 = 4,5$. Максимальный выигрыш такой системы по отношению к исследуемой равен 1,14.

5. Однако, как видно из рисунка, потенциальное максимальное значение разрешения системы с компенсацией четырех субнаклонов и постоянных фазовых сдвигов равно $11,45R_\infty$ и достигается при $D/r_0 = 6$, что в 2,5 раза больше полученного разрешения системы 4.



Зависимости разрешения R_k/R_∞ от отношения D/r_0 для 1–6 систем

6. Из анализа зависимости разрешающей способности системы с компенсацией четырех субнаклонов волнового фронта, определяемых по сдвигам центров тяжести изображений и постоянных фазовых сдвигов, рассчитываемых непосредственно по фазовым искажениям, с учетом того, что характеристики систем с компенсацией только наклонов волнового фронта, определяемых по фазовым искажениям и по сдвигам центров тяжести изображений, практически совпадают, видно, что основным моментом в решении проблемы дальнейшего улучшения характеристик исследуемой системы является определение продольных смещений сегментов.

Таким образом, приходим к общему выводу, что хотя система с компенсацией наклонов на отдельных сегментах апертуры и обладает заметно лучшим разрешением (в 1,7 раза по сравнению с ранее исследованной системой 2), но не обеспечивает потенциально возможного разрешения. Для устранения этого недостатка необходима разработка метода независимого определения близких к оптимальным значений фазовых сдвигов γ_i , так как оценка значений γ_i по измеряемым наклонам не эффективна.

1. Гудмен Дж. Статистическая оптика. М.: Мир, 1988.
2. Fried D. L. // J. Opt. Soc. Am. 1966. V. 56. № 10. P. 1372.
3. Fried D. L. // J. Opt. Soc. Am. 1965. V. 55. № 11. P. 1427.
4. Young A. T. // The Astrophys. J., 1974. V. 189. P. 587.
5. Бакут П. А., Белкин Н. Д., Ряхин А. Д., Свиридов К. Н., Устинов Н. Д. // Автометрия. 1983. № 5. С. 72–74.

Поступила в редакцию
30 мая 1989 г.

P. A. Bakut, I. V. Boyarkina, A. D. Ryakhin. **Analysis of Quality of Imaging by Adaptive System with Compensation of Random Tilts of the Wavefront on the Segments of Aperture.**

Simulation of the adaptive optical system with independent compensation of random local tilts of the wavefront on four systems (sectors) of the aperture is carried out. To estimate tilts of the wavefront the shifts of the centres of gravity of the images which are formed by corresponding segments of the aperture are used. The resolution as a function of the ratio of the diameter of aperture to the correlation domain of atmospheric perturbations (Fried's parameter) is obtained. It is shown, that compensation of four local tilts allows one to increase the resolution of the system by a factor of 1.9 in comparison with the compensation of the tilt on the whole aperture.