

В.П. Лукин, Н.Н. Майер, Б.В. Фортес

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЗЕМНОГО АДАПТИВНОГО ТЕЛЕСКОПА

Исследуется эффективность фазовой коррекции искажений, вносимых атмосферными флуктуациями показателя преломления при формировании изображения астрономических объектов. Рассматривается два типа корректора — модовый и составной. Описываются два метода моделирования фазовых искажений, один из которых основан на генерации ансамбля спектральной амплитуды, а другой — на генерации случайных коэффициентов аберраций. В расчетах была использована комбинация этих методов.

Известно, что атмосферная турбулентность ограничивает угловое разрешение при наблюдении астрономических объектов величиной порядка 1 угловой секунды, в то время как дифракционное разрешение для наблюдения в оптическом диапазоне длин волн ($\lambda \approx 0,5$ мкм) составляет для телескопа диаметром 3,6 м около 0,03 угловой секунды. Существуют три основных направления, позволяющих улучшить разрешение астрономического инструмента:

1. Регистрация ансамбля короткоэкспозиционных изображений с последующей корреляционной обработкой (спекл-интерферометрия) [1];
2. Измерение искажений волнового фронта и коррекция этих искажений в процессе наблюдения (адаптивная техника) [2].
3. Одновременная регистрация короткоэкспозиционных изображений и искажений волнового фронта опорного источника с последующей обработкой.

Мы будем рассматривать телескоп, снабженный системой коррекции искажений волнового фронта. Оснащению телескопов такими системами уделяется в последние годы большое внимание [6, 7]. В настоящее время просматриваются как минимум три области астрономических исследований, в которых применение адаптивной коррекции искажений может найти широкое применение: 1) спектрографические наблюдения — регистрация спектра исследуемого объекта, который одновременно является опорным источником для системы регистрации искажения ВФ; 2) исследования протопланетарного вещества вокруг ярких звезд: в этом случае применение адаптивной компенсации уменьшает рассеяние на оптике коронографа; 3) разрешение двойных и кратных звезд с применением последующей обработки короткоэкспозиционных изображений методами спекл-интерферометрии или без таковой. Во всех случаях применение адаптивной техники позволит уменьшить время, необходимое для регистрации астрономической информации и, следовательно, увеличить производительность телескопа. Таким образом, создание адаптивного телескопа будет эквивалентно постройке целого ряда инструментов, не использующих технику адаптивной компенсации.

В этой статье мы представляем результаты расчета функции рассеяния точки адаптивного телескопа с круглой апертурой диаметром 1 м для монохроматической волны $\lambda = 0,55$ мкм. Мы планируем включить в нашу численную модель, программу, имитирующую работу датчика волнового фронта (ВФ), но пока мы считаем фазовые искажения падающей волны известными и результаты наших расчетов иллюстрируют только ограничения, связанные с конечным числом степеней свободы фазового корректора. Мы рассматриваем два типа фазового корректора: модовый корректор, компенсирующий аберрации от наклона до комы и составное зеркало с гексагональной структурой. В отличие от [9, 10] наша программа позволяет варьировать количество сегментов составного зеркала. Кроме того, в [5, 9, 10] не рассматривалась эффективность коррекции аберраций модовым корректором.

Метод моделирования турбулентных искажений фазы

Используемая методика моделирования искажений фазы плоской - монохроматической волны, обусловленных атмосферными турбулентными неоднородностями показателя преломления, отличается от известных [5, 8, 9], хотя тоже основана на Фурье преобразовании спектральной амплитуды фазовых искажений. По существу метод включает две независимые программы, одна из которых методом Фурье преобразования генерирует фазовые искажения, пространственные масштабы которых ограничены снизу шагом, а сверху — размером расчетной сетки. Вторая программа пересчитывает масштабы, большие, чем размер расчетной сетки, в классические аберрации, которые считаются гауссовскими случайными величинами с нулевым средним и дисперсией, равной [11]

$$\sigma_n^2 = 8\pi(n+1) \int \Phi(x) \frac{J_{n+1}^2(xR)}{(xR)^2} x dx,$$

где n — радиальная степень соответствующего полинома; R — радиус круга; J — функция Бесселя; $\Phi(\kappa) = 0,489r_0^{-5/3}\kappa^{-11/3}$ — пространственный спектр фазовых искажений; r_0 — радиус когерентности Фрида. Верхний предел интегрирования по κ задавался равным $2\pi G$, где G — размер расчетной сетки.

Задаваемые таким образом случайные aberrации добавлялись к фазовым искажениям, генерируемым в пределах расчетной области методом Фурье преобразования. Суть этого метода состоит в вычислении дискретного Фурье преобразования от случайной реализации дискретного аналога спектральной амплитуды $F(\kappa_x, \kappa_y)$, генерируемого таким образом, чтобы $\langle |F(\kappa_x, \kappa_y)|^2 \rangle = \Phi(\kappa_x, \kappa_y)$. Данное условие не дает однозначного определения статистики комплексного поля F и поэтому остается определенный произвол в способе генерации ансамбля F . В нашей методике эта проблема решается следующим образом: $|F|$ считается детерминированной величиной $|F| = \Phi^{1/2}$, а $\arg F$ случайной, равномерно распределенной в диапазоне $[-\pi, \pi]$. Кроме того, мы накладываем условие $F(-\kappa_x, -\kappa_y) = F^*(\kappa_x, \kappa_y)$, которое обеспечивает вещественность двумерного ДПФ от поля F . Данная методика тестировалась следующим образом: в пределах круга диаметром D удалялись постоянная и линейная составляющие (наклоны), затем вычислялась дисперсия фазы в пределах круга, которая усреднялась по ансамблю и сравнивалась с теоретическим значением $\Delta_3 = 0,134(D/r_0)^{5/3}$ [11]. Такое тестирование показало хорошее согласие между аналитическим и вычисленным значением Δ_3 .

Таким образом, наш метод моделирования турбулентных искажений имеет следующие преимущества перед известными: во-первых, радиус когерентности атмосферы r_0 является входным, а не оцениваемым параметром задачи, как это имеет место в [10]; во-вторых, метод позволяет учитывать масштабы, большие, чем размер расчетной области, и, в-третьих, случайная спектральная амплитуда искажений генерируется таким образом, что фазовые искажения получаются чисто вещественными (в противном случае энергия спектра искажений делится между вещественной и мнимой частью выходного массива).

В этой статье мы приводим результаты, полученные путем статистического усреднения изображения. В дальнейшем мы планируем осуществлять динамическое моделирование процесса фазовой коррекции. В настоящее время мы создали программу, генерирующую случайные реализации коэффициентов aberrаций $a_i(t)$, являющихся функциями времени. Такая программа может быть использована как для моделирования динамики фазовых искажений, обусловленных движением турбулентных неоднородностей, размер которых больше, чем размер вычислительной сетки, так и для исследования динамических характеристик атмосферных фазовых искажений и динамических характеристик остаточных фазовых искажений в адаптивной системе. На входе этой программы задаются следующие параметры: внутренний и внешний масштабы турбулентности, радиус когерентности Фрида, угол \hat{v} между направлением ветра и осью OX и скорость ветра v , радиальная степень n и азимутальная частота m полинома Цернике, описывающего интересующую нас aberrацию. Первая часть программы рассчитывает корреляционную функцию соответствующего aberrационного коэффициента [3]:

$$B(\tau) = 8\pi(n+1) \int \Phi(\kappa) \frac{J_{n+1}^2(\kappa R)}{(\kappa R)^2} [J_0(\kappa v \tau) \pm \delta_{om} (-1)^m J_{2m}(\kappa v \tau) \cos(2m\hat{v})] \kappa d\kappa.$$

Знак «плюс» соответствует \cos -полиному, а знак «минус» — \sin -полиному, δ — символ Кронекера. Вторая часть программы рассчитывает спектр aberrационного коэффициента

$$W(f) = 2 \int_0^{\infty} d\tau B(\tau) \cos 2\pi f \tau.$$

Спектр $W(f)$ может быть рассчитан двумя способами: вычислением интеграла по κ после аналитического его вычисления по τ , либо вычислением косинус-преобразования от дискретного представления корреляционной функции $B(\tau)$. Генерирование случайной реализации $a_i(t)$ осуществляется методом, аналогичным тому, который используется для создания случайных реализаций фазовых искажений.

Результаты расчета функции рассеяния точки (ФРТ)

Теперь приступим к обсуждению результатов расчета. Усредняя по ансамблю случайные реализации ФРТ, мы получали длинноэкспозиционное распределение интенсивности в плоскости изображения $I(\gamma_x, \gamma_y)$. Затем мы вычисляли долю энергии, содержащейся в круге радиуса ω (на рис. 1, 2, 3 ω дано в угловых секундах):

$$E(\omega) = \int \int_{\gamma_x^2 + \gamma_y^2 < \omega^2} I(\gamma_x, \gamma_y) d\gamma_x d\gamma_y / \int \int I(\gamma_x, \gamma_y) d\gamma_x d\gamma_y$$

Напомним, что расчеты проводились для телескопа диаметром $D = 1$ м, а радиус когерентности r_0 принимал значения 10 и 20 см.

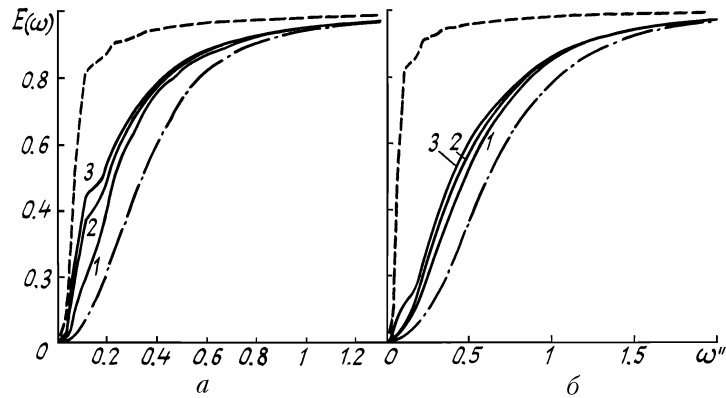


Рис. 1. Распределение энергии в искаженной ФРТ при компенсации: 1 — наклона; 2 — наклона, дефокусировки и астигматизма; 3 — наклона, дефокусировки, астигматизма и комы; штриховая — дифракционная зависимость; штрихпунктирные соответствуют турбулентным искажениям ($a - r_0 = 20$ см, $b - r_0 = 10$ см)

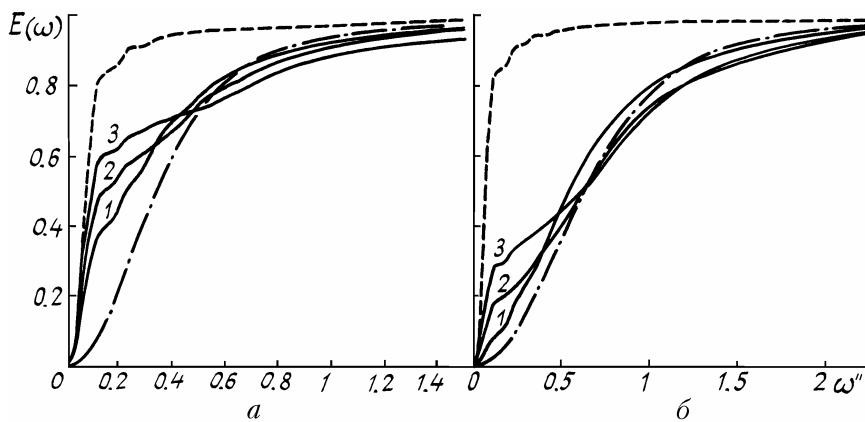


Рис. 2. Распределение энергии в искаженной ФРТ при компенсации средней фазы сегментами 7-, 19- и 37-элементных зеркал (соответственно кривые 1, 2, 3); штриховая кривая — дифракционная зависимость, штрихпунктирная соответствует турбулентным искажениям ($a - r_0 = 20$ см, $b - r_0 = 10$ см)

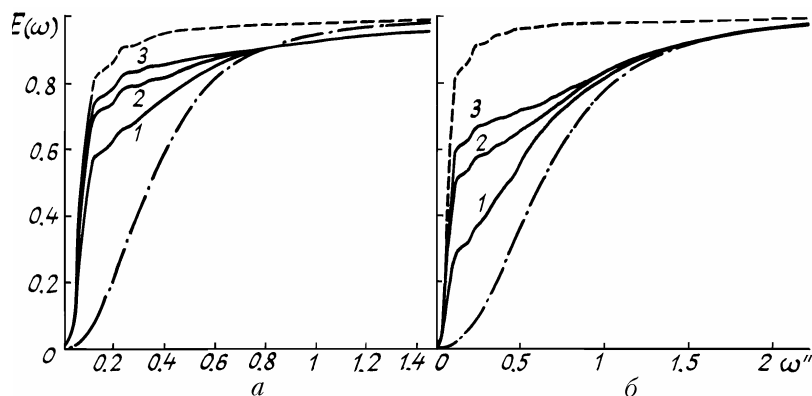


Рис. 3. Распределение энергии в искаженной ФРТ при компенсации средней фазы и локального наклона сегментами 7-, 19- и 37-элементных зеркал; $a - r_0 = 20$ см, $b - r_0 = 10$ см; штриховая кривая — дифракционная зависимость; штрихпунктирная соответствует турбулентным искажениям

На каждом рисунке обозначены зависимости, соответствующие дифракционному случаю (штриховая линия) и нескорректированному (штрихпунктирная). Для модового корректора мы провели расчеты: 1) для коррекции общего наклона, 2) коррекции общего наклона, дефокусировки и астигматизма и 3) коррекции общего наклона, дефокусировки, астигматизма и комы. Для составного корректора были проведены расчеты с количеством сегментов, равным 7, 19 и 37, причем предварительно устранялся общий наклон на апертуре входного зрачка. Каждый сегмент имел одну, две или три степени свободы, что соответствовало компенсации постоянной составляющей либо локальных наклонов, либо и того и другого в пределах каждого сегмента. Мы не приводим на рисунках графики, со-

ответствующие режиму компенсации локальных наклонов, т.к. такая компенсация не привела к сколько-нибудь заметному увеличению $E(a)$ относительно режима компенсации общего наклона по всей апертуре. Из рисунков видно, что коррекция локальной средней фазы сегментированным зеркалом дает многократное увеличение доли энергии в круге дифракционного размера $\lambda/D \approx 0,1$ угл. с, а при коррекции локальной средней фазы и наклона сегментированным зеркалом распределение энергии $E(\omega)$ приближается к дифракционному при количестве сегментов 19 и 37. Коррекция aberrаций от наклона до комы включительно также дает неплохой результат для значения $r_0 = 20$ см ($D/r_0 = 5$), но эффективность такой коррекции быстро уменьшается при увеличении интенсивности турбулентности до $r_0 = 10$ см. Самые нижние кривые на всех рисунках соответствуют формированию изображения без коррекции фазы. Видно, что радиус круга, в который попадает 80% энергии, составляет $0,55''$ для $r_0 = 20$ см и $1,1''$ для $r_0 = 10$ см, что хорошо согласуется с известными из практики астрономических наблюдений значениями.

1. Hardy J. W. //Proc. IEEE. 1978. V. 66. P. 651–680.
2. Labeyrie A. //Astron. Astrophys. 1970. № 6. P. 85–87.
3. Лукин В. П. Атмосферная адаптивная оптика. Новосибирск: Наука, 1986. 248 с.
4. Коняев П. А. //Прикладное математическое обеспечение. Новосибирск: Наука, 1986. С. 69–74.
5. Коняев П. А., Майер Н. Н. //Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 5. С. 474–478.
6. Merkle F. //Tech. Rept. LEST Foundat. № 28. 1987. P. 117–130.
7. Beckers J. M., Roddier F. J., Eisenhardt P. R., Goad L. E., Shu K. L. // SPIE. 1986. V. 628. P. 290–297.
8. Martin J. M., Flatte S. M. //Appl. Opt. 1988. V. 27. № 11. P. 2111–2126.
9. Smithson R. C., Peri M. L. //JOSA. 1989. V. 6. № 1. P. 92–97.
10. Smithson R. C., Peri M. L., Benson R. S. //Appl. Opt. 1988. V. 27. № 8. P. 1615–1620.
11. Noll R. J. //JOSA. 1976. V. 66. № 3. P. 207–211.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
26 сентября 1991 г.

V. P. Lukin, N. N. Mayer, B. V. Fortes. **Numerical Simulation of a Ground Based Adaptive Telescope.**

This paper is devoted to the analysis of the efficiency of a phase correction for distortions introduced into the formation of astronomical objects images by the atmospheric fluctuations of the radiative index. Two types of correctors are considered, the mode one and the combined one. Also two methods of modelling the phase distortions are described. The first one is based on the use of generating the ensemble of spectral amplitudes and the second one on generating random coefficients of aberrations. The calculations used a combination of the both approaches.