

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В АТМОСФЕРЕ

УДК 536.8

Э.А. Витриченко, Г.Е. Попова, С.М. Чернявский, Н.К. Юнусов

### СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АТМОСФЕРНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПО КИНОЛЕНТЕ ГАРТМАНА

Обсуждается гипотеза представления атмосферных искажений волнового фронта в виде фазового экрана, перемещающегося как единое целое относительно апертуры. Предлагается методика определения вероятности существования фазового экрана по киноленте Гартмана.

Современная астрономическая оптика все чаще для повышения разрешающей способности телескопов использует адаптивные средства. Для построения эффективных адаптивных систем для борьбы с атмосферной турбулентностью требуются надежные статистические сведения о ней в месте, где непосредственно установлена эта система. Они определяют требования к основным элементам этой системы.

Важно установить, какой класс искажающих волновых фронтов создает астроклимат, каковы пространственные и временные характеристики этих волновых фронтов. Исследования в этом направлении по-прежнему являются актуальными.

Важным понятием является время «замороженности атмосферы», в течение которого пространственное распределение атмосферных искажений (АИ) принимается неизменным. Оно определяет время, необходимое для коррекции АИ, и по [1] равно 0,01.

Можно допустить еще ситуацию, когда атмосфера рассматривается как некий фазовый экран (или пакет экранов), который как единое целое перемещается относительно оптической системы.

Если гипотеза фазового экрана правомерна, то при наличии информации об его движении относительно апертуры можно по известной фазе  $\Phi(M_0, t_0)$  в точке  $M_0$  апертуры в момент времени  $t_0$  определить фазу в точке  $M$  апертуры в момент времени  $t$  вдоль траектории точки  $N_0$  экрана, которая совпадает с  $M_0$  в момент времени  $t_0$ .

Кинолента Гартмана запечатлевает динамику АИ волнового фронта, поэтому она должна содержать информацию о фазовом экране, если таковая гипотеза имеется.

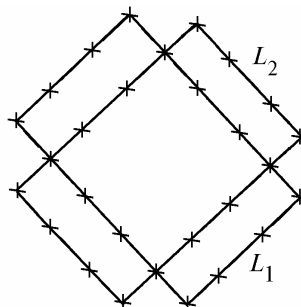


Рис. 1

В данной статье предлагается методика определения вероятности существования гипотезы фазового экрана по киноленте Гартмана. Конкретно речь идет о киноленте Гартмана, снятой с частотой 48 кадров/с на телескопе Цейсс-600 Симеизской научной базы бывшего Астровета АН СССР. В 28 точках апертуры (рис. 1) зафиксированы локальные наклоны волнового фронта, вносимые атмосферой. Эти точки расположены на 2-х контурах с шагом 0,1м.

Первые результаты обработки этой киноленты приведены в [2]. В ней получены временные корреляционные характеристики коэффициентов ряда Цернике, которым аппроксимировалось двумерное распределение АИ волнового фронта по апертуре.

В данном эксперименте обработке были подвергнуты 200 кадров. Были определены координаты центров интенсивности пятен на пленке с помощью микрофотометра ИФО-451. Погрешность измерения по оси  $Oy$  составляла 0,005 мм (при цене деления индикатора перемещений 0,01 мм), а по оси  $Ox$  – 0,025 мм. Из-за низкой точности по оси  $Ox$  обработка велась только по измерениям в направлении оси  $Oy$ .

Отклонение центра интенсивности  $i$ -го пятна на пленке от его теоретического значения за счет АИ в  $k$ -м кадре определялось равенством

$$\Delta y(i, k) = y(i, k) - \sum_{j=1}^{200} y(i, j) / 200, \quad k = \overline{1, 200}.$$

Отклонение  $\Delta y(i, k)$  определяет с точностью до масштабного множителя локальный наклон волнового фронта в направлении оси  $Oy$   $i$ -й субапертуры, вызванный АИ.

### Схема обработки

На рис. 2 изображен контур  $L_1$  с 16 субапертурами. В момент времени  $t_k = k \Delta t$  ( $\Delta t = 1/48$ ) движение фазового экрана задавалось вектором  $\mathbf{V}$ , определяемым углом  $\alpha$  и величиной  $V$ , причем значения  $V$  могли быть положительными и отрицательными. При положительном  $\alpha$ , как показано на рис. 2, отклонение  $\Delta y(M_i, t_k)$  в точке  $M_i$  контура  $ABC$  сравнивалось с отклонением  $\Delta y(N_i, t_k + \tau_i)$  в точке  $N_i$  контура  $ADC$  в момент времени  $t_k + \tau_i$ , где запаздывание (опережение)  $\tau_i$  определялось равенством  $\tau_i = |M_i N_i| / V$ . Так как точка  $N_i$  может не совпадать с центром какой-либо субапертуры контура  $ADC$  и запаздывание может быть не кратным  $\Delta t$ , то вычисление отклонения  $\Delta y(N_i, t_k + \tau_i)$  осуществлялось путем линейной интерполяции вдоль контура и во времени. Если  $\alpha = 0$ , то таким же образом сравнивались точки на  $AB$  с точками на  $DC$ . При отрицательных  $\alpha$  сравнивались точки контура  $DAB$  с точками на контуре  $DCB$ .

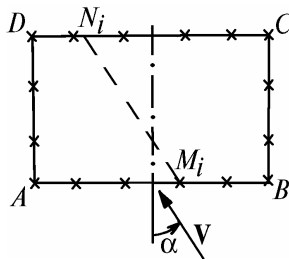


Рис. 2

На контуре  $L_1$  сравнение осуществлялось для углов  $|\alpha| \ll \pi/4$ . Аналогичное сравнение отклонений проводилось на контуре  $L_2$ . Рассмотренные варианты сравнения отклонений охватывают весь диапазон изменения вектора  $\mathbf{V}$ .

Если в момент времени  $t_k$  имеет место гипотеза фазового экрана, то при некотором векторе  $\mathbf{V}_k$  невязка

$$\varepsilon^2(\mathbf{V}) = \sum_{i=1}^n (\Delta y(M_i, t_k) - \Delta y(N_i, t_k + \tau_i))^2 / n$$

будет близкой к нулю. При таком подходе задача существования фазового экрана в момент времени  $t_k$  свелась к решению относительно  $\mathbf{V}$  неравенства

$$\min_{\mathbf{V}} \varepsilon(\mathbf{V}_k) = \min_{\mathbf{V}} \varepsilon(\mathbf{V}) \ll \delta \approx 0. \quad (1)$$

### Результаты обработки

Для кадров  $k = 25 \div 175$  по описанной схеме были вычислены векторы скорости  $\mathbf{V}_k$  и соответствующие им распределения отклонений  $\Delta y(N_i, t_k + \tau_i)$ . На рис. 3 приведены примеры графиков отклонений  $\Delta y(M_i, t_k)$  – сплошная линия и  $\Delta y(N_i, t_k + \tau_i)$  – штриховая линия с нарастающим значением  $\min$ , но не выходящего за ограничение  $\delta = 0,023$ . Величина  $\delta$  была выбрана из условия, чтобы отклонения  $\Delta y(N_i, t_k + \tau_i)$  достаточно хорошо отслеживали изменение отклонения  $\Delta y(M_i, t_k)$ .

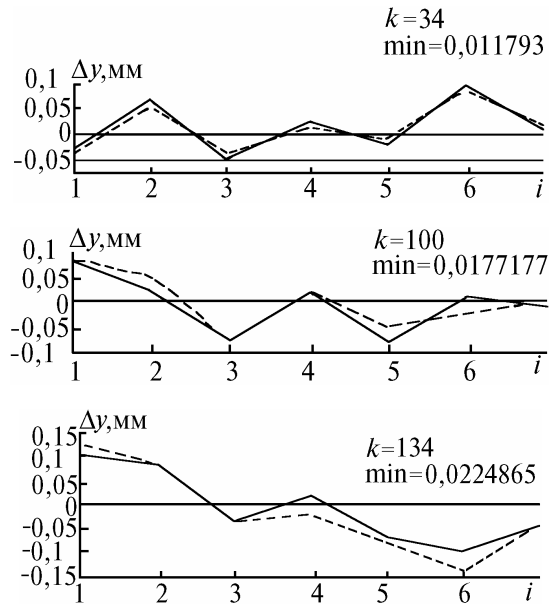


Рис. 3

Из 151 кадра условию (1) удовлетворили 20 кадров. Поэтому оценка вероятности существования фазового экрана  $p \approx 0,13$ .

По аналогичной методике выполнено сравнение отклонений на контурах  $AB \cup CD$  с отклонениями на контурах  $A'B' \cup C'D'$  (рис. 4, 5) при  $|\alpha| \ll \pi/4$ .

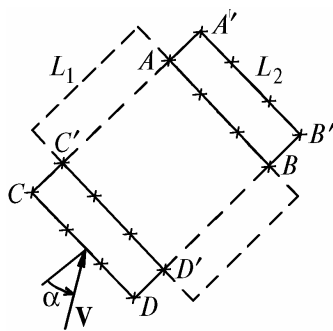


Рис. 4

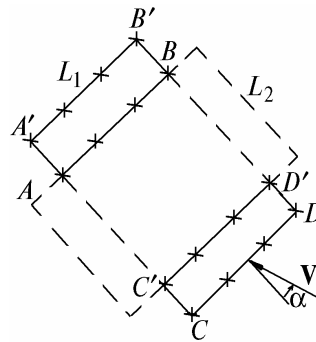


Рис. 5

На рис. 6 приведены примеры графиков отклонений  $\Delta y(M_i, t_k)$  – сплошная линия и  $\Delta y(N_i, t_k + \tau_i)$  – штриховая линия для данной схемы.

Из 151 кадра условию (1) удовлетворили 17. Поэтому оценка вероятности существования фазового экрана  $p \approx 0,11$ . Здесь заметим, что векторы скорости  $\mathbf{V}_k$ , входящие в условие (1), в указанных схемах изменялись по различному закону и это требует своего объяснения. В связи с этим следует отметить, что установление факта существования фазового экрана по указан-

ной методике зависит от геометрии системы точек  $M_i$ , а точнее от расстояния  $l = M_i N_i$ , которое определяет запаздывание  $\tau$ , от скорости  $V$  и интервала отсчета измерений  $\Delta t$ . Поэтому, если  $V$  и  $\Delta t$  большие, то вторая схема не установит факт существования фазового экрана. Аналогично, если время «жизни» фазового экрана мало и его скорость мала, то первая схема не установит факт существования фазового экрана. Отсюда следует, что выбором схемы точек сравнения вносится элемент селективности выбора фазового экрана по его скорости и времени «жизни». В частности, средний модуль скоростей, удовлетворяющих условию (1), в данных схемах равен  $4,03 - 1,66$  м/с соответственно.

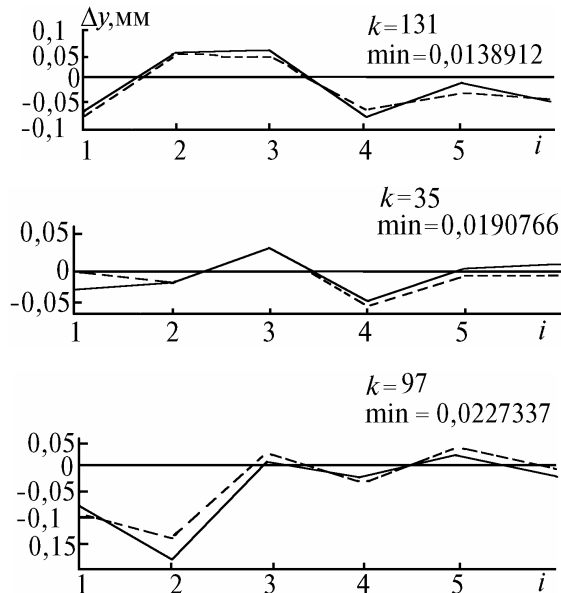


Рис. 6

1. Адаптивная оптика / Под ред. Д. Фрида. М.: Мир, 1980. 456с.
2. Витриченко Э. А. // Атмосферная нестабильность и адаптивный телескоп. Л.: Наука, 1988. С. 31–37.

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева

Поступила в редакцию  
23 сентября 1994 г.

E.A. Vitrichenko, G.E. Popova, S.M. Chernyavskii, N.K. Junusov. **Statistical Analysis of Wave Front Distortions in the Atmosphere by Hartmann Film.**

A hypothesis is discussed in the paper on representation of atmospheric distortions of wave front as a phase screen moving as a unit relative to aperture. A method of determination of probability of the phase screen existence by means of Hartmann film is proposed.