

Лекция 9

Аберрации в турбулентной атмосфере II

Содержание

1	Анизопланатизм адаптивных систем	1
1.1	Угол изопланатизма	1
1.2	Исключение средней фазы	2
2	Взаимная структурная функция	2
2.1	Взаимная структурная функция	2
2.2	Использование взаимной структурной функции	3
2.3	Расчет корреляционных функций	3
3	Задания по Лекции 9	3
4	Вопросы по Лекции 9	4

1 Анизопланатизм адаптивных систем

1.1 Угол изопланатизма

Рассмотрим два объекта, наблюдаемые через атмосферу. Обозначим через φ_1 и φ_2 волновые фронты соответствующих источников в плоскости приемной апертуры. Пусть $u(\mathbf{r})$ — корректирующая фаза, вносимая в этой плоскости системой. Тогда остаточные ошибки будут:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1(\mathbf{r}) &= \varphi_1(\mathbf{r}) - u(\mathbf{r}) \\ \varepsilon_2(\mathbf{r}) &= \varphi_2(\mathbf{r}) - u(\mathbf{r})\end{aligned}\quad (1)$$

Рассмотрим случай идеальной коррекции для первого источника: $\varphi_1(\mathbf{r}) = u(\mathbf{r})$, $\varepsilon_1(\mathbf{r}) = 0$, тогда

$$\begin{aligned}\varepsilon_2(\mathbf{r}) &= \varphi_1(\mathbf{r}) - \varphi_2(\mathbf{r}), \\ \langle \varepsilon_2^2 \rangle &= \langle [\varphi_1(\mathbf{r}) - \varphi_2(\mathbf{r})]^2 \rangle = \tilde{D}_{sf}(\theta) \quad (\text{от } \mathbf{r} \text{ не зависит}),\end{aligned}\quad (2)$$

что в силу оптической обратимости совпадает со структурной функцией \tilde{D}_{sf} фазы сферической волны, излучаемой источником, расположенным в плоскости приемной апертуры. Для слоя однородной турбулентности толщиной H имеем:

$$\tilde{D}_{sf} = D_{sf} = \frac{3}{8} 6.88 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}} = \frac{3}{8} 6.88 \left(\frac{\theta H}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}} = \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{\frac{5}{3}}, \quad (3)$$

здесь r_0 — Фридовский радиус, θ_0 — угол изопланатизма:

$$\theta_0 = \left(\frac{3}{8} 6.88 \right)^{-\frac{3}{5}} \left(\frac{r_0}{H} \right) \approx 0.57 \left(\frac{r_0}{H} \right). \quad (4)$$

Оценки (3) и (4) чувствительны к распределению неоднородностей вдоль оптической трассы. Кроме того, эти формулы в значительной степени определяются флуктуациями средней фазы и дают заниженное значение угла анизопланатизма (для изображения флуктуации средней фазы не существенны).

1.2 Исключение средней фазы

Исключим из (1) среднюю фазу, представив $\varepsilon(\mathbf{r})$, в виде разложения:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(\mathbf{r}) &= \sum_{i=1}^{\infty} (a_i^{(1)} - u_i) \varphi_i(\mathbf{r}), \\ \varepsilon_2(\mathbf{r}) &= \sum_{i=1}^{\infty} (a_i^{(2)} - u_i) \varphi_i(\mathbf{r}), \end{aligned} \quad (5)$$

аналогично, при идеальной коррекции первой звезды ($u_i = a_i^{(1)}$), для дисперсии ошибки коррекции второго изображения получим:

$$\langle \varepsilon_2(\mathbf{r})^2 \rangle = \sum_{i=1}^{\infty} \left\langle \left(a_i^{(2)} - a_i^{(1)} \right)^2 \right\rangle = 2 \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_{ii} (1 - K_i(\theta)) \quad (6)$$

$$\text{здесь} \quad \alpha_{ii} = \left\langle \left(a_i^{(1)} \right)^2 \right\rangle = \left\langle \left(a_i^{(2)} \right)^2 \right\rangle, \quad K_i(\theta) = \frac{\langle a_i^{(2)} a_i^{(1)} \rangle}{\alpha_{ii}}$$

По-прежнему $\alpha_{ii} = \left(\frac{D}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}} \gamma_{ii}$, где γ_{ii} — Нолловские коэффициенты, а $K_i(\theta)$ — корреляционные функции коэффициентов аберраций для разнесенных источников (раньше не встречались): $K_i(0) = 1$, $K_i(\infty) \rightarrow 0$ (формально, так как при больших углах все эти формулы не работают).

2 Взаимная структурная функция фазы

2.1 Взаимная структурная функция

Необходимые для описания анизопланатизма функции \tilde{D}_{sf} и $K_i(\theta)$ могут быть вычислены на основании взаимной структурной функции фазы $D_{int}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ — (рис.1). **1,2** — когерентные источники, M_1, M_2 — точки приема волн.

$$D_{int}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \langle [\varphi_1(M_1) - \varphi_2(M_2)]^2 \rangle \quad (7)$$

при этом векторы \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 не обязаны лежать в одной плоскости. Разобьем средю на слои толщиной dh и будем считать флуктуации в этих слоях независимыми. Рассуждая так же, как в Лекции 8, получим интегральное представление:

$$D_{int}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = 2.92k^2 \int_0^H C_n^2(h) \rho^{\frac{5}{3}}(h) dh. \quad (8)$$

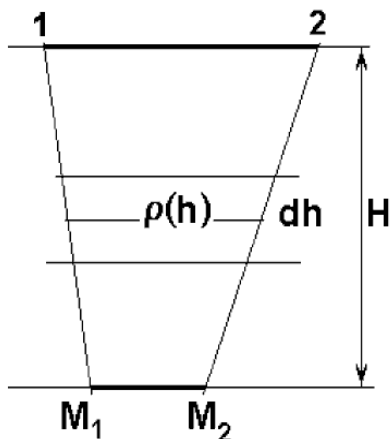


Рис. 1: Геометрия хода лучей при наблюдении 2-х объектов

где $\rho(h)$ — расстояние на высоте h между скрещивающимися прямыми, соединяющими концы векторов \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 .

2.2 Использование взаимной структурной функции

Легко убедиться, что через $D_{int}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ выражаются все функции, использовавшиеся ранее:

$$\begin{aligned} D_{pl}(r) &= D_{int}(\mathbf{r}, \mathbf{r}), \\ D_{sf}(r) &= D_{int}(0, \mathbf{r}), \\ \tilde{D}_{sf}(r) &= D_{int}(\mathbf{r}, 0). \end{aligned} \quad (9)$$

В однородной турбулентной среде ($C_n^2 = const$) две последние функции совпадают и $D_{sf}(r) = \frac{3}{8}D_{pl}(r)$. В общем случае это не так.

Для задачи, поставленной в п.(1.2) можно получить:

$$\begin{aligned} \left\langle \left(a_i^{(2)} - a_i^{(1)} \right)^2 \right\rangle &= \\ &= 2a_{ii} (1 - K_i(\theta)) = \frac{1}{S^2} \int \int [D_{int}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) - D_{int}(0, \mathbf{r}_2)] \varphi_i(\mathbf{r}') \varphi_i(\mathbf{r}'') d^2 r' d^2 r'', \end{aligned} \quad (10)$$

где $r_1 = \theta H$, $\mathbf{r}_2 = \mathbf{r}' - \mathbf{r}''$.

2.3 Расчет корреляционных функций

Формулы (9) и (10) позволяют рассчитать $K_i(\theta)$, хотя практически удобнее это делать через спектры, так как взаимная структурная функция даже для однородного слоя не имеет аналитического представления. В случае однородного слоя толщины H функции $K(\theta)$ зависят только от безразмерного параметра $\xi = \theta H/R$, где R — радиус апертуры. Примеры нескольких таких функций приведены на рис.2.

3 Задания по Лекции 9

1. —

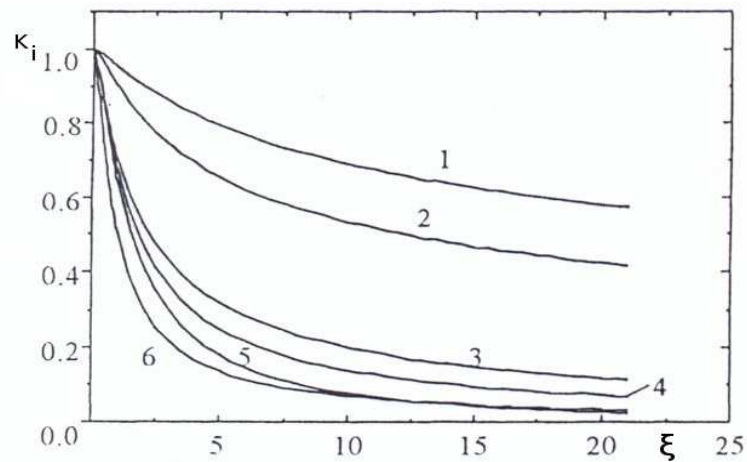


Рис. 2: 1 — наклон в плоскости разнесения пучков, 2 — наклон в ортогональном направлении, 3,4 — астигматизмы, 5 — дефокус, 6 — сферическая аберрация.

2. —

4 Вопросы по Лекции 9

1. —

Список литературы

1. Воронцов М.А., Шмальгаузен В. И. Принципы адаптивной оптики, М.: Наука, 1985, 288 с.
2. А.В. Токовинин. Учебное пособие по адаптивной оптике обсерватории Серро Тололо, <http://www.astronet.ru/db/msg/1205112/intro.html>
3. Шмальгаузен В. И., Яицкова Н. А. Ошибка коррекции изображения протяженных объектов при видении сквозь турбулентную атмосферу. Оптика атмосферы и океана. том 9, 1996г., № 11, стр.1462 -1471.