

Р. Рагациони, Е. Маркетти

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЭЛЕЕВСКОГО И НАТРИЕВОГО ОПОРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПРИ ЧАСТИЧНОЙ КОРРЕКЦИИ В ШИРОКОМ ПОЛЕ ЗРЕНИЯ

Приземные и находящиеся на низких высотах атмосферные слои, вносящие возмущения в волновой фронт падающей волны, характеризуются высоким изопланатизмом поля зрения. Однако на изображения натриевого бакена и естественных звезд оказывают влияние и высотные слои, характеризующиеся малым углом изопланатизма. При коррекции смещенного с оси изображения объекта, из-за отсутствия корреляции между высотными слоями, видимыми под различными углами, использование подобной опорной волны вносит дополнительные искажения в волновой фронт, тогда как на эффективность использования находящегося на небольшой высоте рэлеевского опорного источника влияет только потеря информации о высотных слоях. В статье сопоставляются охватываемое поле зрения и поведение структурной функции $C_n^2(z)$ и обсуждаются различия между этими двумя подходами.

1. Введение

При создании любой адаптивной оптической системы возникает проблема изопланатизма. Попытка снятия этого ограничения рассматривалась различными авторами [1, 2] с использованием так называемой мультисопряженной адаптивной оптики. Такой подход позволяет получить полностью скорректированное изображение в поле зрения даже большем, чем участок изопланатизма.

Поведение волнового фронта падающей волны, корректируемого с использованием опорного источника, смещенного на угол Θ , описывалось следующим образом [3]:

$$\sigma^2 = (\Theta / \Theta_0)^{5/3}, \quad (1)$$

где σ^2 – стандартное отклонение волнового фронта, выраженное в радианах в квадрате; Θ_0 – параметр, характеризующий атмосферу и задаваемый как

$$\Theta_0 = \left[2,91 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \int_0^\infty C_n^2(z) z^{5/3} dz \right]^{-3/5}, \quad (2)$$

где использованные обозначения являются общепринятыми.

Выражение (1) не выполняется при $\Theta \gg \Theta_0$, где получающиеся значения σ^2 существенно превышают истинные. Асимптотическое поведение истинной функции $\sigma^2(\Theta)$ может быть получено при условии, что для очень больших углов Θ излучение объекта и опорный волновой фронт полностью некоррелированы, так что

$$\sigma^2(\Theta \rightarrow \infty) \approx 2 \sigma^2, \quad (3)$$

где σ – стандартное отклонение для источника, находящегося на бесконечной высоте. Значение стандартного отклонения волнового фронта σ_h для произвольной высоты h задается выражением [4]:

$$\sigma_h^2 = 0,134 (D/r_h)^{5/3}, \quad (4)$$

где D – диаметр телескопа; r_h – радиус Фрида для высот, ограниченных h , определяемый обычным методом

$$r_h = \left[0,423 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \int_0^h C_n^2(z) z^{5/3} dz \right]^{3/5}. \quad (5)$$

В (4) мы предполагали, что наклоны были удалены из волновых фронтов объекта и опорного источника.

Подобным образом можно определить угол Θ_h , подставляя в уравнении (2) h на место ∞ , и значение σ_∞ , заменяя в уравнении (4) r_h на r_0 .

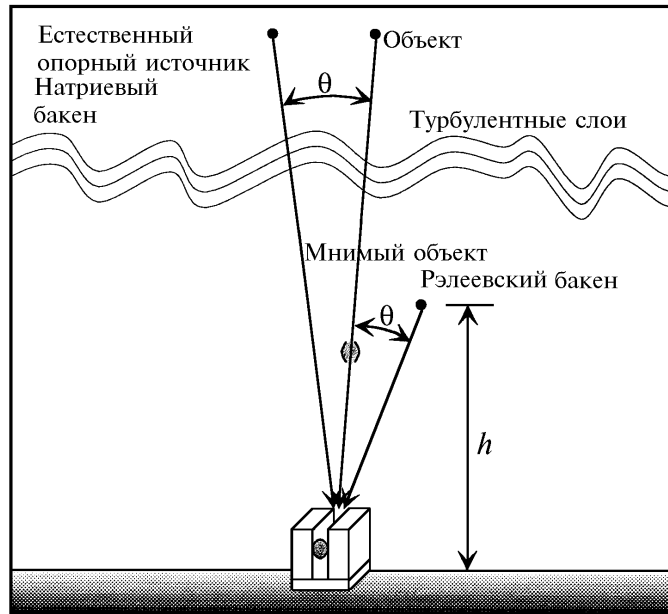


Рис. 1. Концептуальная схема сопоставления рэлеевского и натриевого (или естественного) опорных источников

Поскольку в приземных слоях C_n^2 имеет наибольшую концентрацию, характеризующую величинами Θ_h , в большинстве случаев намного более высокими, чем значения Θ_0 (обычно на высоте 1 км превышение на порядок), то мы исследуем возможность использования рэлеевского бакена (рис. 1) для умеренного повышения контраста изображения в секторах поля зрения, значительно больших Θ_0 .

2. Аналитический подход

В качестве примера рассмотрим телескоп с диаметром зеркала $D = 3,5$ м, расположенный на Канарских островах (проект итальянского национального телескопа <Галилей> [5]), для которых профиль C_n^2 можно найти в литературе. Мы использовали табличные значения профиля, опубликованные Барлетти [6], масштабированные для приведения в соответствие с последними измерениями, выполненными на <Nordic optical telescope> [7]. Результирующие графики, для получения которых использовалась сплайн-интерполяция, показаны на рис. 2.

Соответствующее значение для радиуса Фрида составляет приблизительно 10 см в предположении, что $\lambda = 500$ нм (в дальнейшем используется именно эта длина волны). Такое значение r_0 обеспечивает разрешение порядка $1''$, т.е. значение, которое анализ статистики для Канарских островов позволяет считать консервативным [8].

Соответствующие значения для $\sigma^2(\Theta)$ были получены следующими методами:

1) При $-h = \infty$ мы вычисляли r_0 и Θ_0 с помощью выражений (5) и (2) и оценивали асимптотическое значение на основе (3). Стыковка двух кривых $[\sigma^2(\Theta)]$, задаваемой (1), и σ^2 , зада-

ваемой (3)] выполнялась на основе сплайн-интерполяции, реализация которой была выполнена только в районе перегиба и не являлась строгой. Как будет показано ниже, область графика, представляющая наибольший интерес, расположена достаточно далеко от рассмотренного участка результирующей кривой;

2) При $h < \infty$ соответствующие значения r_h и Θ_h вычислены с использованием уравнений (5) и (2), модифицированных так, как это было описано выше. Для стыковки уравнений (1) и (3) был применен тот же метод, что и в предыдущем случае. Это соответствует поведению волнового фронта гипотетического объекта (см. рис. 1), при коррекции с использованием в качестве опорного источника рэлеевского бакена. При этом должна быть добавлена константа, отвечающая ухудшению параметров на высотах от h до бесконечности. Можно показать, что этот аддитивный член приблизительно равен разности $\sigma^2 - \sigma_h^2$. Асимптотическое поведение вычисляется с учетом вклада двух входящих в задачу волновых фронтов, т.е. $\sigma^2(\Theta \rightarrow \infty) \approx \sigma^2 - \sigma_h^2$ в рассмотренном выше предположении отсутствия корреляции между ними.

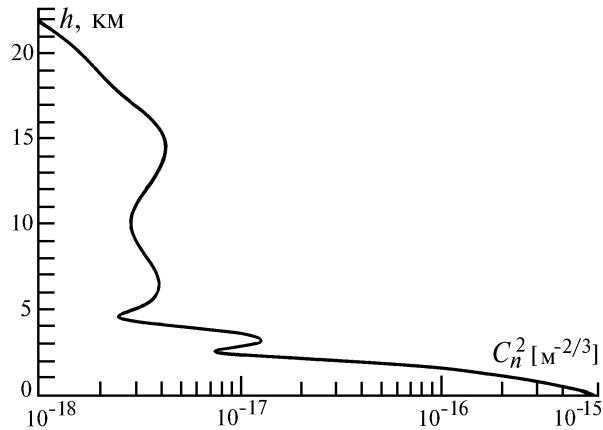


Рис. 2. Распределение $C_n^2(z)$ в выбранной модели атмосферы

В таком приближении не учитывается проблема изопланатизма фокуса. Этого можно избежать, применив опорный источник, состоящий из нескольких бакенов, каждый из которых используется для коррекции отдельного участка полной апертуры телескопа. Привлеченная технология относится к тому же типу, что и в мультисопряженной адаптивной оптике (хотя влияние эффектов рассеянного света, с точки зрения ухудшения изображения изучаемого объекта, значительно меньше для рэлеевского бакена, который размещается на значительно больших расстояниях от объекта). На некоторые моменты должно быть обращено особое внимание:

- если сетка бакенов реализуется последовательным запуском одного маяка в различные точки, то продолжительность этого процесса должна быть меньше, чем атмосферная константа времени;
- для измерения фазового градиента между бакенами датчик волнового фронта должен регистрировать излучение от всех бакенов;
- относительные положения источников в слое рассеяния должны быть известны с максимально возможной точностью.

Необходимое количество источников n_{Na} для случая натриевого бакена по порядку величины определяется как

$$n_{Na} \approx (\text{Поле зрения} / \Theta_0)^2, \tag{6}$$

тогда как в случае рэлеевского бакена необходимое количество источников n_{Ra} приблизительно вычисляется следующим образом:

$$n_{Ra} \approx (D / r_h)^2. \tag{7}$$

Так как $\Theta_0 \approx 0,6 r_0 / L$, где L – характерная высота возмущающих слоев (разумным является предположение $L \approx 10$ км), полагая $r_h \approx r_0$, получаем

$$n_{\text{Na}} / n_{\text{Ra}} \approx 23,7 \text{ (Поле зрения (в угл. мин.))}^2 / (D(\text{м}))^2, \quad (8)$$

для $D = 3,5$ м отношение близко к 1 в поле зрения около 2 угл. мин. Результаты приводятся на рис. 3.

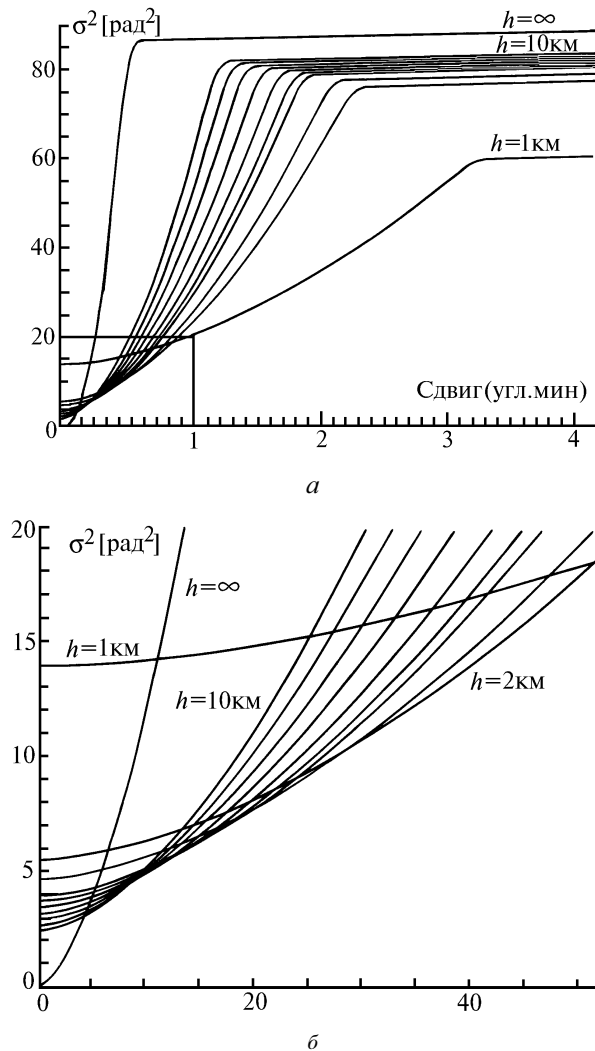


Рис. 3. Стандартное отклонение волнового фронта для изображения источника, корректируемого с использованием излучения бакенов, находящихся на различных высотах h ; a – общий вид b – увеличенное изображение прямоугольника, выделенного в нижнем левом углу a

Таким образом, можно отметить ряд важных деталей. Рэлеевский бакен, размещаемый на высотах порядка 5 км, способен удерживать $\sigma^2 < 10 \text{ рад}^2$ (что соответствует $\sigma \approx \lambda/2$) в секторе до 30 угл. с при минимальном значении, меньшем, чем $\sigma^2 = 4 \text{ рад}^2$ (это соответствует $\sigma \approx 0,3\lambda$). Более того, $\sigma^2 < 36 \text{ рад}^2$ (соответствует $\sigma \approx \lambda$) возможно получить в секторе до 2 угл. мин, используя рэлеевский источник на высоте 1 км.

3. Заключение

Показано, что в поле зрения оптической системы возможно получение реального улучшения параметров, при этом требуется только частичная адаптивная коррекция. Улучшение может быть достигнуто более чем на порядок. Проблема изопланатизма фокуса и ее практические аспекты также будут исследованы и описаны в следующей статье. Особое внимание при этом будет уделено дифференциальному наклону в охватываемом поле зрения.

Результаты этой статьи были получены в рамках работ по национальному телескопу <Галилей>. Авторы благодарны С. Барбьери и Ф. Рампацци за ряд полезных замечаний и внимательное чтение рукописи.

1. Beckers J. M. ESO Symposium on large telescopes and their Instrumentation. 1988. 693 p.
2. Merkle F., Beckers J. M. // SPIE proceedings. 1989. V. 1114.
3. Fried D. L. // JOSA. 1982. V. 72 P. 1.
4. Noll R. J. // JOSA. 1976. V. 66. P. 3.
5. Barbieri C., Baruffolo A., Bhatia R. et al. // ESO Symposium on progress in telescope and instrumentation technology. 1992. P. 137.
6. Barletti R., Ceppatelli G. et al. // JOSA. 1976. V. 66. P. 1380.
7. Vernin J., Tunon C. M. // NOT News. 1990. V. 2. P. 20.

Падуа, Италия

Поступила в редакцию
13 декабря 1993 г.

R. Ragazzoni, E. Marchetti. Rayleigh vs. Sodium Beacons for Large Field of View Partial Correction.

Ground and low altitude layers perturbing the incoming wavefront are characterized by a very high field of view isoplanatism. However, images of a sodium beacon and natural stars are affected also by high altitude layers, characterized by a small isoplanatic angle. Correction of an off-axis object using the latter type of reference will introduce an additional degradation of the wavefront due to the lack of correlation between high altitude layers at different angles, while the use of a small altitude Rayleigh reference is affected only by the loss of information on the higher layers. A trade-off between the two approaches, versus the covered field of view, and the $C_n^2(z)$ behaviour is discussed.