

В.П. Лукин

## ГИБРИДНАЯ СХЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ОПОРНОЙ ЗВЕЗДЫ

Представлены результаты, связанные с разработкой алгоритма коррекции общего наклона волнового фронта в изображении, формируемом от реальной звезды, на основе данных измерений углового положения лазерной опорной звезды. Используется гибридная схема формирования лазерной опорной звезды, поскольку для измерения положения такой звезды используются три телескопа: один телескоп, работающий в режиме моностатической, а два других – в режиме бистатической звезды.

Данная статья является логическим продолжением ряда публикаций [1–5]. Кроме того, существует вполне определенная связь основной идеи данной работы и публикаций Роберто Рагациони [6] и, особенно, Михаила Беленького [7]. Однако, несмотря на сходство, особенно с результатами [7], имеются существенные отличия, о которых будет сказано в конце статьи. Для проведения корректного сравнения наших результатов с работой [7] будем использовать, по возможности, одни и те же обозначения.

Для реализации предлагаемого алгоритма коррекции на основе гибридной схемы формирования лазерной опорной звезды необходимо использовать три телескопа: основной и два вспомогательных, расположенных таким образом, что общая конфигурация телескопов образует равнобедренный прямоугольный треугольник. Реализуется следующая схема формирования лазерной опорной звезды: широкий гауссовский пучок лазерного излучения фокусируется посредством основного телескопа на расстоянии  $X$ . Формирование звезды осуществляется только центральной частью основного телескопа (предполагается, что исходный размер лазерного пучка  $a_0 < a_T$  – размера апертуры основного телескопа).

В фокальной плоскости основного телескопа измеряется (по двум направлениям – вдоль осей ОУ и ОZ) угловое дрожание центра тяжести изображения лазерной опорной звезды. Одновременно с этим в фокальных плоскостях двух вспомогательных телескопов измеряются угловые смещения изображения вдоль одной из осей (в направлении, поперечном соответствующему разному осей основного и вспомогательных телескопов).

При фокусировке лазерного излучения образуемая лазерная опорная звезда представляет собой длинный цилиндр (его диаметр  $a_m$  и длина  $a_b$ ), т.е.  $a_b \gg a_m$ . Предполагаем, что разности основного и вспомогательного телескопов таковы, что для вспомогательных телескопов формирование лазерной опорной звезды происходит по бистатической схеме [2, 6, 7]. При этом видимый размер лазерного бакена  $\hat{a}_b$  (размер  $\hat{a}_b$  связан с  $a_b$ , с высотой формирования звезды  $X$ , а также с выносом осей вспомогательных телескопов относительно основного) из точки стояния вспомогательных телескопов оказывается много больше размера бакена, видимого с оси основного телескопа ( $\hat{a}_b \gg a_m$ ).

Таким образом, получаем, что для основного телескопа формируемая звезда может рассматриваться как моностатическая. Тогда мгновенное угловое положение ее изображения (по осям ОУ и ОZ)

$$\begin{aligned}\varphi_{m,y} &= \varphi_{lb,y} + \varphi_{ps,y}, \\ \varphi_{m,z} &= \varphi_{lb,z} + \varphi_{ps,z},\end{aligned}\tag{1}$$

где  $(\varphi_{lb,y}; \varphi_{lb,z})$  – мгновенное угловое положение (по осям) центра тяжести фокусируемого на расстоянии  $X$  в турбулентной среде лазерного пучка;  $(\varphi_{ps,y}; \varphi_{ps,z})$  – мгновенное угловое положение изображения фокусируемого лазерного бакена, рассматриваемого как точечный источник.

Вспомогательные телескопы измеряют только по одной составляющей дрожания изображения лазерной опорной звезды, т.е. в результате имеем следующую пару измеряемых углов:

$$\begin{aligned}\varphi_{b,y} &= \varphi_{lb,y} + \varphi_{ss,y}, \\ \varphi_{b,z} &= \varphi_{lb,z} + \varphi_{ss,z},\end{aligned}\quad (2)$$

где  $(\varphi_{ss,y}; \varphi_{ss,z})$  – составляющие мгновенного углового положения изображения, формируемого протяженным некогерентным источником, наиболее корректно рассчитанные в [7]. Далее считаем соответствующие разности:

$$\begin{aligned}\varphi_{m,y} - \varphi_{b,y} &= \varphi_{ps,y} - \varphi_{ss,y}, \\ \varphi_{m,z} - \varphi_{b,z} &= \varphi_{ps,z} - \varphi_{ss,z}.\end{aligned}\quad (3)$$

Поскольку вспомогательные телескопы работают в режиме бистатической опорной звезды, соответствующие дисперсии разностей (3) выражаются

$$\langle (\varphi_{ps,y} - \varphi_{ss,y})^2 \rangle = \langle (\varphi_{ps,y})^2 \rangle + \langle (\varphi_{ss,y})^2 \rangle = \langle (\varphi_{ps,y})^2 \rangle \{1 + (\hat{a}_b/a_{at})^{-1/3}\},\quad (4)$$

где  $a_{at}$  – размер вспомогательного телескопа.

Теперь сформулируем задачу «оптимальной» коррекции (уменьшения) углового дрожания естественной звезды  $\vec{\varphi}_{ns}(\varphi_{ns,y}, \varphi_{ns,z})$  на основе данных измерений (1)–(3) и необходимых расчетов. Фактически же необходимо минимизировать дисперсию остаточных угловых смещений естественной звезды в результате коррекции на основе данных измерений, а именно:

$$\begin{aligned}\beta_y^2 &= \langle [\varphi_{ns,y} - A(\varphi_{m,y} - \varphi_{b,y})]^2 \rangle, \\ \beta_z^2 &= \langle [\varphi_{ns,z} - A(\varphi_{m,z} - \varphi_{b,z})]^2 \rangle.\end{aligned}\quad (5)$$

Воспользовавшись результатами, полученными в [2–5], имеем (для изотропного спектра турбулентности)

$$\beta_y^2 = \beta_z^2 = \langle (\varphi_{ns,y})^2 \rangle \left\{ 1 - \frac{2^{1/3} f(X, C_n^2)}{[1 + (\hat{a}_b/a_{at})^{-1/3}]} \right\},\quad (6)$$

где

$$f(X, C_n^2) = \frac{\left( \int_0^X d\xi C_n^2(\xi) (1 - \xi/X) [1 + b^2(1 - \xi/X)^2]^{-1/6} \right)^2}{\int_0^X d\xi C_n^2(\xi) (1 - \xi/X)^{5/3} \int_0^\infty d\xi C_n^2(\xi)},\quad (7)$$

где  $\langle (\varphi_{ns,y})^2 \rangle$  – дисперсия изменения углового положения изображения реальной звезды (вдоль одной из осей);  $b = a_0/a_{at}$ . Оптимальное значение корректирующего коэффициента  $A$ , минимизирующего функционалы (5), рассчитывается на основе средних моделей вертикальных профилей изменения интенсивности турбулентности атмосферы  $C_n^2(\xi)$ :

$$A_{opt} = \frac{2^{1/6} \int_0^X d\xi C_n^2(\xi) (1 - \xi/X) [1 + b^2(1 - \xi/X)^2]^{-1/6}}{(1 + (a_b/a_{at})^{-1/3}) \int_0^X d\xi C_n^2(\xi) (1 - \xi/X)^{5/3}}.\quad (8)$$

Проведем численные оценки эффективности такой коррекции для реальных параметров эксперимента. Пусть основной телескоп имеет диаметр в области 3–10 м. Вспомогательные

телескопы выберем из класса однометровых телескопов. Пусть размер лазерного пучка, формирующего звезду,  $a_0 = 1$  м. Волновой параметр для фокусируемого лазерного пучка  $\Omega$  ( $\Omega = ka_0^2/X$ ) лежит в интервале 10–100 для высот  $X$  от 10 до 100 км. Следовательно, в фокальной перетяжке размер лазерного бакена  $a_m = 1 \div 10$  см. Таким образом, сечение лазерной звезды основной телескоп «видит» под углом  $\theta \leq 0,1''$ , что практически можно рассматривать как точечный источник. В то же время длина лазерной звезды  $a_b$ , а следовательно, при надлежащем выносе осей вспомогательных телескопов и «видимый» размер звезды  $\hat{a}_b$  может составлять несколько угловых минут, т.е. лазерная звезда в плоскостях изображения вспомогательных телескопов может рассматриваться как протяженный некогерентный источник. Реальное соотношение  $\hat{a}_b/a_{ат} \approx 10^3$ ,  $b = 1$ . При численных расчетах воспользуемся «средней» моделью  $C_n^2(\xi)$ , предложенной в [8].

Суммируя эти данные и выполнив расчеты, получим для (6)–(8)

$$\Delta = \frac{\beta_y^2}{\langle (\varphi_{ns,y})^2 \rangle} = \frac{\beta_z^2}{\langle (\varphi_{ns,z})^2 \rangle} = \left( 1 - \frac{2^{1/3} f(X, C_n^2)}{(1+0,1)} \right); \quad (9)$$

$$A_{opt} = \frac{2^{1/6} \int_0^X d\xi C_n^2(\xi) (1 - \xi/X) [1 + (1 - \xi/X)^2]^{-1/6}}{1,1 \int_0^X d\xi C_n^2(\xi) (1 - \xi/X)^{5/3}}. \quad (10)$$

Результаты численных расчетов представим в виде таблицы, в которой приведены также данные для случая «неоптимальной» коррекции (т.е. для  $A = 1$ ). При этом

$$\Delta = \frac{\beta_y^2}{\langle (\varphi_{ns,y})^2 \rangle} = 1 + [1 + (\hat{a}_b/a_{ат})^{-1/3}]^0 \frac{\int_0^X d\xi C_n^2(\xi) (1 - \xi/X)^{5/3}}{\int_0^\infty d\xi C_n^2(\xi)} - 2^{7/6} \frac{\int_0^X d\xi C_n^2(\xi) (1 - \xi/X) [1 + b^2(1 - \xi/X)^2]^{-1/6}}{\int_0^\infty d\xi C_n^2(\xi)}. \quad (11)$$

Таким образом из таблицы видно, что уже для высоты формирования лазерной опорной звезды выше 10 км данный алгоритм обеспечивает высокую эффективность коррекции дрожания изображения естественной звезды на основе измерения (двух компонент) дрожания моностатической звезды в основном телескопе и отдельных компонент в двух ортогонально разнесенных телескопах.

$X$ , км	$A_{opt}$	$\Delta$ из (9)	$\Delta$ из (11)
1	1,22	0,509	0,5139
10	1,096	0,1799	0,1802
100	1,019	0,0866	0,0927

Надо заметить, что практически нет нужды проводить для данной схемы «оптимизацию» коррекции (т.е. специально рассчитывать параметр  $A$ ), неоптимальная коррекция (при  $A = 1$ ) дает также высокую эффективность коррекции углового положения естественной звезды, находящейся в пределах угла изопланатизма, с лазерной опорной звездой.

По-видимому, следует провести сравнение наших результатов с данными работы [7]. Прежде всего заметим, что итоговый результат состоит и в том, что получаемый сигнал управления в отличие от результата М. Беленького [7] полностью не зависит от характеристик лазерного пучка. В работе М. Беленького [7] полезным сигналом для коррекции является угол  $\varphi_{fa}$  – наклон волнового фронта на полной апертуре. В то же время полный наклон пучка  $\varphi_{lb}$  (в плоскости бакена)

$$\varphi_{lb} = \varphi_{fa} + \varphi_{lt}, \quad (12)$$

где  $\varphi_{lt}$  – локальный наклон пучка.

В такой трактовке  $\varphi_{fa}$  определяется **интегрированием по трассе снизу-вверх** (хотя из [7] не ясно, какой волны: плоской? лазерного пучка? сферической волны?). Но на обратном проходе (в постановке М. Беленького) происходит компенсация этого слагаемого в (12), поэтому в основном телескопе измеряем

$$\varphi_m = \varphi_{lb} - \varphi_{fa} = \varphi_{ll}.$$

Известно, что в моностатической схеме дисперсия углового дрожания

$$\langle \varphi_m^2 \rangle = \text{const} (a_0^{-1/3} + a_T^{-1/3} - 2^{7/6} (a_0^2 + a_T^2)^{-1/6}) \int_0^X d\xi C_n^2(\xi) \left(1 - \frac{\xi}{X}\right)^{5/3},$$

поэтому полная коррекция наблюдается только для случая  $a_0 = a_T$ , при этом дрожание пучка размером  $a_0$  компенсируется дрожанием точечного источника на апертуре  $a_T$  (при условии, что  $a_0 = a_T$ ). Таким образом, полезный сигнал для коррекции – это угол  $\varphi_{fa}$  (по мнению М. Беленького, это некая часть дрожания пучка, идущего вверх, обусловленного всей апертурой телескопа, рассчитываемого на трассе **снизу-вверх**). Однако это неправильно. Скорее всего, выделение в сумме (12) члена  $\varphi_{fa}$  есть надуманный ход объяснения.

В моих рассуждениях полезный сигнал (для коррекции) – это разность  $\varphi_{ps} - \varphi_{ss}$ , представляющая собой дрожание изображения точечного источника за вычетом усредненного дрожания вторичных некогерентных источников, являющегося разностью двух измерений  $\varphi_m - \varphi_b$ , причем полезный сигнал коррекции представляет собой результат интегрирования (практически для точечного источника) при распространении **снизу-вверх**, тогда как сигнал, полученный М. Беленьким  $\varphi_{fa}$ , – это часть (см. формулу (12)) дрожания пучка  $\varphi_{lb}$ , связанная с интегрированием турбулентности на трассе **снизу-вверх**.

Я бы сказал, что предложенный М. Беленьким способ правилен по сути операций, но некорректно объяснен, что в результате усложняет процесс понимания того, как на самом деле работает данный алгоритм.

И наконец, самое существенное заключается в том, что в угле  $\varphi_{lb}$  из (12) нет того слагаемого, которое было бы полезно для обеспечения эффективной коррекции угла наклона естественной звезды  $\varphi_m$ . На мой взгляд, очень странное пояснение дает М. Беленький для каждого из членов суммы (12). По его трактовке, общий наклон лазерного пучка  $\varphi_{lb}$  (в плоскости  $X$ ) не зависит от размеров первичного зеркала, а каждая из компонент суммы (12) зависит от этого размера. Смее утверждать, что это неправильно: в общем наклоне пучка  $\varphi_{lb}$  не может быть каких-либо составляющих, зависящих не от характеристик пучка (размер пучка и фокусировка) и среды распространения, а от характеристик посторонних предметов, каким здесь является основной телескоп.

1. Lukin V., Fortes B. // ESO Conference and Workshop Proceeding. 1993. N 54. P. 101–194.
2. Лукин В. П. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 11. С. 1433–1442.
3. Лукин В. П., Фортес Б. В. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. N 1. С. 56–68.
4. Lukin V., Nosov E. V. // Pure and Applied Optics. 1997 (в печати).
5. Lukin V. // Proc. «Adaptive Optics», OSA. 1996. P. MB35–1–MB35–5.
6. Ragazzoni R. // Astrophys. J. 1996. V. 465. P. L73–L75.
7. Belenki M. // Proc. SPIE. 1996. V. 2956. P. 206–217.
8. Gracheva M. A., Gurvuch A. S. // Fiz. Atmos. i Okeana. 1980. N 10. P. 1107–1111.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
19 мая 1997 г.

#### V. P. Lukin. Hybrid Scheme of Formation of Laser Reference Star.

The given paper is a logical extension of a series of the author's works performed in recent years. This work is devoted to elaboration of an algorithm for correction of general slope of wavefront in the image formed from a natural star based on the measurements of angular position of the laser reference star. A hybrid scheme of the laser reference star formation is used because three telescopes take part in measuring its position. One of them operates in the regime of monostatic star, the two others – in the regime of bistatic star.