ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 55, № 8/2 ФИЗИКА 2012

УДК 535.416.3:681.3

Л.А. БОЛЬБАСОВА,**, В.П. ЛУКИН**

АДАПТИВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ОПОРНОГО ИСТОЧНИКА[1]

Представлены результаты аналитических исследований ограничений, связанных с измерением и коррекцией общего наклона волнового фронта системой адаптивной оптики (АО) на основе искусственного опорного источника – лазерной опорной звезды (ЛОЗ) в астрономическом телескопе.

Ключевые слова: *адаптивная оптика, лазерная опорная звезда*.

При использовании ЛОЗ лазерный луч отклоняется атмосферой дважды. Первый раз – по трассе на пути снизу вверх, чтобы сформировать ЛОЗ, и второй раз – по трассе сверху вниз в результате рассеяния назад. Ранее было показано [1, 2], что дисперсия дрожания изображения ЛОЗ в фокальной плоскости телескопа при моностатической схеме формирования в диффузном приближении дается следующей формулой:

$$\left\langle \varphi^2_{\text{ЛОЗ}} \right\rangle = \left\langle (\varphi_{\text{л.п}})^2 \right\rangle + \left\langle (\varphi_F^{\text{с.ф}})^2 \right\rangle + 2\left\langle \varphi_{\text{л.п}} \varphi_F^{\text{с.ф}} \right\rangle =$$

$$= (2\pi^2 0{,}033\Gamma(1/6) 2^{1/6} [R^{-1/3} + a^{-1/3} - 2^{7/6}(R^2 + a^2)^{-1/6}] \int_0^x d\xi C_n^2(\xi)(1 - \xi/x)^{5/3},$$

где первое слагаемое дисперсия случайного смещения центра тяжести лазерного пучка, распространяющегося снизу-вверх, в плоскости формирования ЛОЗ; второе слагаемое – дисперсия случайного углового смещения изображения неподвижного «вторичного» источника; F – фокусное расстояние телескопа; x – расстояние между лазерным источником и рассеивающим объемом; a и R – размеры апертуры телескопов; $C_n^2(\xi)$ – вертикальный профиль атмосферной турбулентности.

В результате взаимности флуктуаций при прямом и обратном проходах для случая, когда телескоп формирует ЛОЗ всей своей апертурой, получаем, что такая опорная звезда оказывается «неподвижной». Это означает, что наклоны не могут быть определены с помощью ЛОЗ. Формула (1) является теоретической основой утверждения о невозможности коррекции наклона с ЛОЗ, при этом можно подвергать сомнению корректность подхода к расчету, поскольку он не учитывает наличие флуктуаций положения самого источника.

Известно, что вектор-угол дрожания изображения «точечного» источника [3] записывается в виде

$$\varphi_F^{\text{с.ф}} = -\frac{1}{k\Sigma} \iint_\Sigma d^2\rho \nabla_\rho S^{\text{с.ф}}(\rho) . \quad (1)$$

Для лазерной опорной звезды, формируемой с помощью лазерного пучка, идущего с земли, флуктуации фазы $S^{\text{с.ф}}(\rho)$ записываются как для точечного источника со случайной координатой центра $\rho_{\text{л.п}}$ в геометро-оптическом приближении [3, 4] следующим образом:

$$S^{\text{с.ф}}(\rho, \rho_{\text{л.п}}) = k \int_0^X d\xi \iint d^2 n(\kappa, X - \xi) \exp\{i\kappa\rho(\xi/X) + i\kappa\rho_{\text{л.п}}(1 - \xi/X)\} . \quad (2)$$

Далее также, используя (2), получаем, что $\nabla_\rho S^{\text{с.ф}}(\rho) = i\kappa(\xi/X) S^{\text{с.ф}}(\rho)$. Проведя интегрирование по гауссовой приемной апертуры с площадью $\Sigma = \pi R^2$, получаем

$$\frac{1}{k\Sigma} \iint_\Sigma d^2 \exp\{-\frac{\rho^2}{R^2} + i\kappa\rho(\xi/X)\} = \exp[-\kappa^2 R^2 (\xi/X)^2 / 4] . \quad (3)$$

В результате получаем

$$\varphi^{\text{с.ф}}(\rho_{\text{л.п}}) = -i \int_0^X d\xi (\xi/X) \iint d^2 n(\kappa, X - \xi) \kappa \exp\{-\kappa^2 R^2 (\xi/X)^2 / 4 + i\kappa\rho_{\text{л.п}}(1 - \xi/X)\} . \quad (4)$$

[1] Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 11-02-90401-Укр_ф_а, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», ГК № 16.740.11.0328 и 16.740.11.0392.

Далее, используя формулу (3), рассчитаем дисперсию дрожания изображения точечного источника с флуктуирующим положением этого источника, тогда имеем для среднего по ансамблю:

$$< \varphi^{с.ф} \varphi^{с.ф*} >= \int_0^X d\xi_1 (\xi_1 / X) \int_0^X d\xi_1 (\xi_1 / X) \iint < d^2 n(\boldsymbol{\kappa}_1, X - \xi_1) d^2 n^* (\boldsymbol{\kappa}_2, X - \xi_2)(\boldsymbol{\kappa}_1 \boldsymbol{\kappa}_2)$$
$$\exp\{i\boldsymbol{\kappa}_1 \boldsymbol{\rho}_{л.п}(1 - \xi_1 / X) - i\boldsymbol{\kappa}_2 \boldsymbol{\rho}_{л.п}(1 - \xi_2 / X)\} > \exp\{-\kappa_1^2 R^2 (\xi_1 / X)^2 / 4 - \kappa_2^2 R^2 (\xi_2 / X)^2 / 4\}. \quad (5)$$

Далее воспользуемся следующим расщеплением [5] :

$$\left\langle d^2 n(\boldsymbol{\kappa}_1, X - \xi_1) d^2 n^* (\vec{\kappa}_2, X - \xi_2) \exp\{i\boldsymbol{\kappa}_1 \boldsymbol{\rho}_{л.п}(1 - \xi_1 / X) - i\boldsymbol{\kappa}_2 \boldsymbol{\rho}_{л.п}(1 - \xi_2 / X)\} \right\rangle =$$
$$= \left\langle d^2 n(\boldsymbol{\kappa}_1, X - \xi_1) d^2 n^* (\vec{\kappa}_2, X - \xi_2) \right\rangle \left\langle \exp\{i\boldsymbol{\kappa}_1 \boldsymbol{\rho}_{л.п}(1 - \xi_1 / X) - i\boldsymbol{\kappa}_2 \boldsymbol{\rho}_{л.п}(1 - \xi_2 / X)\} \right\rangle. \quad (6)$$

В результате аналитических расчетов получаем, что если корреляцию вида (6) расщепить, тогда в дисперсии дрожания ЛОЗ зависимость от $\rho_{л.п}$ вообще исчезает. Таким образом, при полном отсутствии корреляции интегральных и локальных флуктуаций дисперсия дрожания изображения тождественно равна дисперсии дрожания изображения «неподвижного» точечного источника, то есть

$$< \varphi^{с.ф} (\rho_{л.п}) \varphi^{с.ф*} (\rho_{л.п}) >=< \varphi^{с.ф} (0) \varphi^{с.ф*} (0) >= (4\pi^2 0,033 \Gamma(1/6) 2^{1/6}) R^{-1/3} \int_0^X d\xi C_n^2 (\xi)(1 - \xi / X)^{5/3}. \quad (7)$$

Если в подобном приближении посчитать дисперсию дрожания изображения ЛОЗ, получаем

$$\left\langle \varphi_{ЛОЗ}^2 \right\rangle = \left\langle [\varphi_{л.п} + \varphi_F^{с.ф} (\rho_{л.п})]^2 \right\rangle = (2\pi^2 0,033 \Gamma(1/6) 2^{1/6}) \{[R^{-1/3} + a^{-1/3}] \times$$
$$\times \int_0^x d\xi C_n^2 (\xi)(1 - \xi / x)^{5/3} - 2^{7/6} \int_0^X d\xi C_n^2 (\xi)(1 - \xi / X)^2 [(R^2 + a^2)(1 - \xi / X)^2 + 2 \left\langle \rho_{л.п}^2 \right\rangle (\xi / X)^2]^{-1/6} \}. \quad (8)$$

Далее при анализе выражения (8) воспользуемся случаем, когда $[R^2 + a^2] >> \left\langle \rho_{л.п}^2 \right\rangle$, а также положим $R = a$. Тогда, согласно [5], первая часть выражения (8) уйдет в нуль, а останется только вторая часть. В результате получаем

$$< \varphi_{ЛОЗ}^2 >== (2^{7/3} \pi^2 0,033 \Gamma(1/6)) 2^{1/6} R^{-1/3} \frac{\left\langle \rho_{л.п}^2 \right\rangle}{3R^2} \int_0^X d\xi C_n^2 (\xi) \frac{(\xi / X)^2}{(1 - \xi / X)^{1/3}}. \quad (9)$$

Таким образом, в результате аналитических расчетов показано, что опорный источник в моностатической схеме формирования ЛОЗ «дрожит» так же, как сфокусированный пучок излучения с удельным весом $\left\langle \rho_{л.п}^2 \right\rangle / R^2$, а значит, существует возможность проводить измерения дисперсии дрожания ЛОЗ и, как следствие, корректировать наклоны волнового фронта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукин В.П. // Оптика атмосферы и океана. – 1995. – Т. 8. – С. 301–341.
2. Bele'kii M.S. // Proc. SPIE. – 1996. – V. 2956. – P. 206–217.
3. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 548 с.
4. Беленький М.С., Лукин В.П., Миронов В.Л., Покасов В.В. Когерентность лазерного излучения в атмосфере. – Новосибирск: Наука, 1985. – 175 с.
5. Кляцкин В.И. Статистическое описание динамических систем с флуктуирующими параметрами. – М.: Наука, 1975. – 239 с.
6. Лукин В.П. Атмосферная адаптивная оптика. – Новосибирск: Наука, 1983. – 250 с.

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия
**Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия
E-mail: sla@iao.ru

Поступила в редакцию 15.06.12.

Больбасова Лидия Адольфовна, к.ф.-м.н.;
Лукин Владимир Петровия, д.ф.-м.н., профессор.