

ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ НА НАКЛОННЫХ АТМОСФЕРНЫХ ТРАССАХ

Лукин В.П., Лукин И.П.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Российская Федерация

e-mail: lukin@iao.ru, lukin_ip@iao.ru

В работе описывается построение алгоритма управления адаптивными оптическими системами. Данный алгоритм использует прогнозирование эволюции пространственных и временных распределений фазовых искажений в оптической волне при распространении в условиях атмосферной турбулентности и генерацию управляющих сигналов для коррекции искажений волнового фронта в режиме реального времени на неоднородных трассах. Показано, что на наклонных атмосферных трассах вместо вертикальных профилей турбулентности и скорости ветра можно использовать усредненные значения, а именно момент скорости ветра и параметр Фрида, полученные по данным зондирования.

В настоящее время активно развиваются методы фазового управления в системах адаптивной оптики (АО). Одним из путей повышения эффективности таких систем является развитие алгоритмов, использующих различного рода прогнозирование флуктуаций корректируемых искажений волнового фронта. В настоящей работе анализируются алгоритмы фазовой адаптивной коррекции, которые учитывают эволюцию волнового фронта, обусловленного ветровым движением турбулентности поперёк трассы распространения оптических волн на неоднородных атмосферных трассах.

Известно, что атмосферная турбулентность представляет собой случайный процесс со стационарными первыми приращениями [1]. Поэтому эволюцию, как самой турбулентности, так и обусловленных ею фазовых искажений $S(\mathbf{p}, t)$ в оптической волне, прошедшей слой атмосферной турбулентности, соответственно можно описать как урезанный ряд Тейлора следующего вида [1]:

$$S(\mathbf{p}, t + T) = S(\mathbf{p}, t) + \frac{dS}{dt} T, \quad (1)$$

где $\mathbf{p} = [x, y]$ – двумерный вектор для произвольной точки оптического поля в пределах апертуры системы; t – текущее время; T – достаточно короткий интервал времени.

Применив гипотезу “замороженной турбулентности” [1], временную производную флуктуаций фазы $\frac{dS}{dt}$ можно записать как скалярное произведение двумерного вектора скорости ветра $\mathbf{V}$ и пространственного градиента фазы $\nabla_{\mathbf{p}} S(\mathbf{p}, t)$, т.е.

$$\frac{dS}{dt} = \nabla_{\rho} S \mathbf{V}. \quad (2)$$

Поскольку мы рассматриваем фазовые искажения в некоторой фиксированной плоскости ($Z = \text{const}$), то в (2) градиент фазы может быть представлен как двумерный вектор, и тогда:

$$\nabla_{\rho} S \mathbf{V} = \frac{\partial S}{\partial x} V_x + \frac{\partial S}{\partial y} V_y. \quad (3)$$

Представим фазу, измеренную в текущий момент времени t , в виде разложения по полиномам Цернике [2]:

$$S(\rho, t) = \sum_{j=1}^N a_j(t) F_j\left(\frac{x}{R}, \frac{y}{R}\right). \quad (4)$$

Здесь $a_j(t)$ – случайные коэффициенты модового разложения фазы, они характеризуют собой удельный “вес” отдельной модовой компоненты; $F_j\left(\frac{x}{R}, \frac{y}{R}\right)$ – полиномы Цернике [2, 3]; N – число мод разложения фазы по полиномам. Это число N зависит от точности измерений и должно быть согласовано с возможностями гибкого зеркала [2, 4], используемого в качестве исполнительного элемента системы АО.

Воспользовавшись представлением вида (4), рассчитаем фазу из выражения (1) для момента времени $(t + T)$, получаем:

$$S(\rho, t + T) = \sum_{j=1}^N a_j(t) \left[F_j\left(\frac{x}{R}, \frac{y}{R}\right) + \frac{\partial}{\partial x} F_j\left(\frac{x}{R}, \frac{y}{R}\right) V_x T + \frac{\partial}{\partial y} F_j\left(\frac{x}{R}, \frac{y}{R}\right) V_y T \right]. \quad (5)$$

Выражение (5) представляет собой запись эволюционирующей фазы от момента времени t к моменту времени $(t + T)$.

Это выражение и есть основа “прогнозирующей” фазы для адаптивной коррекции [4]. При этом следует заметить, что строго говоря, прогнозирующая фаза должна быть записана несколько иначе, а именно:

$$S(\rho, t + T) = \sum_{j=2}^N a_j(t) \left[F_j\left(\frac{x}{R}, \frac{y}{R}\right) + \frac{\partial}{\partial x} F_j\left(\frac{x}{R}, \frac{y}{R}\right) V_x T + \frac{\partial}{\partial y} F_j\left(\frac{x}{R}, \frac{y}{R}\right) V_y T \right], \quad (6)$$

т.е. она не содержит первой моды. Поскольку функции разложения фазы, измеренные в текущий момент времени в выражении (4) известны, а производные от полиномов Цернике

$F_j\left(\frac{x}{R}, \frac{y}{R}\right)$ могут быть рассчитаны заранее, поэтому для организации “прогноза” (6)

необходимы только входные данные, которыми являются компоненты двумерного вектора скорости ветра V и величина временной задержки системы T .

Формула (6) представляет собой выражение для “прогнозируемой” фазы при коррекции. Следует сказать, что возможно альтернативное выражения для корректирующей фазы, которое напрямую использует гипотезу “замороженности турбулентности”. Оно выглядит следующим образом:

$$S(\rho, t + T) = \sum_{j=2}^N a_j(t) F_j \left(\frac{x - V_x T}{R}, \frac{y - V_y T}{R} \right). \quad (7)$$

Фактически выражения (7) представляет собой смещение “на ветер” фазового распределения, необходимо только уточнить, что в зависимости от направления вектора скорости ветра знаки перед членами, содержащими компоненты скорости ветра, могут меняться на противоположные. Безусловно, алгоритм (7) будет более точно выражать эволюцию фазового фронта, поскольку представляет собой суммирование бесконечного ряда разложения фазы, но в условиях колмогоровской турбулентности атмосферы [1] все производные выше первой существенно меньше, чем первая.

Следует отметить, что исходя из способа получения данных о величине скорости ветра, можно выделить несколько способов выполнения “прогноза”, а именно:

1. Возможен “прогноз” на основе информации о средней скорости ветра [4]: в этом случае информация о компонентах поперечной средней скорости ветра измеряются непосредственно на атмосферной трассе, например, с помощью метеосистемы, устанавливаемой вблизи входной апертуры датчика волнового фронта (ДВФ) системы АО.

2. Прогнозируемая коррекция также может быть реализована на основе информации о средней скорости ветра с использованием атмосферной модели [4, 5]. При этом также должны быть выполнены измерения скорости ветра в некоторой точке на трассе, а далее применяется модельное представление об эволюции компонент скорости ветра $V_x(\xi)$, $V_y(\xi)$ и структурного параметра показателя преломления воздуха C_n^2 вдоль трассы распространения оптической волны. Наиболее эффективно это можно применять для однородных по силе турбулентности атмосферных трасс.

3. Возможно также применение полностью аппаратного способа [1, 4] определения компонент скорости ветра, непосредственно по текущим данным измерений самим ДВФ. Для этого, используя градиентные данные измерений фазовых флуктуаций, вычисляются взаимные корреляционные функции (пространственные и временные), рассчитываемые как по направлению строк, так и по направлению столбцов матрицы измерений ДВФ. Рассчитываются

и взаимная пространственная (например, между парой разнесённых субапертур по двум ортогональным направлениям) и временная, используя временную реализации для одной из той же пары субапертур, корреляции случайных наклонов волнового фронта, измеряемого ДВФ.

Следует отметить, что прогнозирование фазовых искажений вида (6) и (7) наиболее эффективно выполнять на однородных трассах. В тоже время для её применения на наклонных атмосферных трассах нами было предположено использование взамен величины скорости ветра его статистические моменты. Поэтому предлагаем в прогнозирующие формулы (6) или (7) вставлять компоненты скорости по данным вычислений функционалов компонент скорости ветра, например, как это рекомендовано в работах [6, 7]. Для этого используя модельное представление об эволюции компонент скорости ветра $V_x(\xi)$, $V_y(\xi)$ и структурного параметра показателя преломления воздуха C_n^2 вдоль трассы распространения оптической волны рассчитывается величина (вектор):

$$V_{5/3} = \left[\int_0^\infty d\xi V^{5/3}(\xi) C_n^2(\xi) / \int_0^\infty d\xi C_n^2(\xi) \right]^{3/5}. \quad (8)$$

Для проведения конкретных численных расчётов были использованы модель Бафтона для скорости ветра и модель Хафнагеля для структурного показателя преломления атмосферы [7]. Для простоты расчётов была использована одномерная модель ветра. Расчёты проводились до высоты 30 км над поверхностью Земли, рассматривается только вертикальное распространение оптической волны. Расчёты были выполнены в зависимости от начального значения структурного показателя преломления. Конечным результатом численных расчётов стало получение значения дисперсии рассогласования между реальными и прогнозируемыми значениями, вычисляемой по следующей формуле:

$$\sigma^2 = \left[\int_0^{30 \cdot 10^3} d\xi |V(\xi) - V_{5/3}|^{5/3} C_n^2(\xi) / \int_0^{30 \cdot 10^3} d\xi C_n^2(\xi) \right]. \quad (9)$$

Формула (9) даёт величину дисперсии прогноза значения фазовых флуктуаций, которая для одномерного случая выглядит следующим образом:

$$S(\cdot, t+T) = S(\cdot - V_{5/3}T, T). \quad (10)$$

В формуле (10) величина момента скорости ветра $V_{5/3}$ на вертикальной трассе, используемая для алгоритма прогноза, соответствует данным расчётов, представленных на рис. 1, а. На рис. 1, а приведены результаты численного расчёта момента скорости ветра (для одномерного вектора скорости ветра) по формуле (9) для моделей ветра и структурного

параметра показателя преломления воздуха в зависимости от величины начального значения уровня турбулентности.

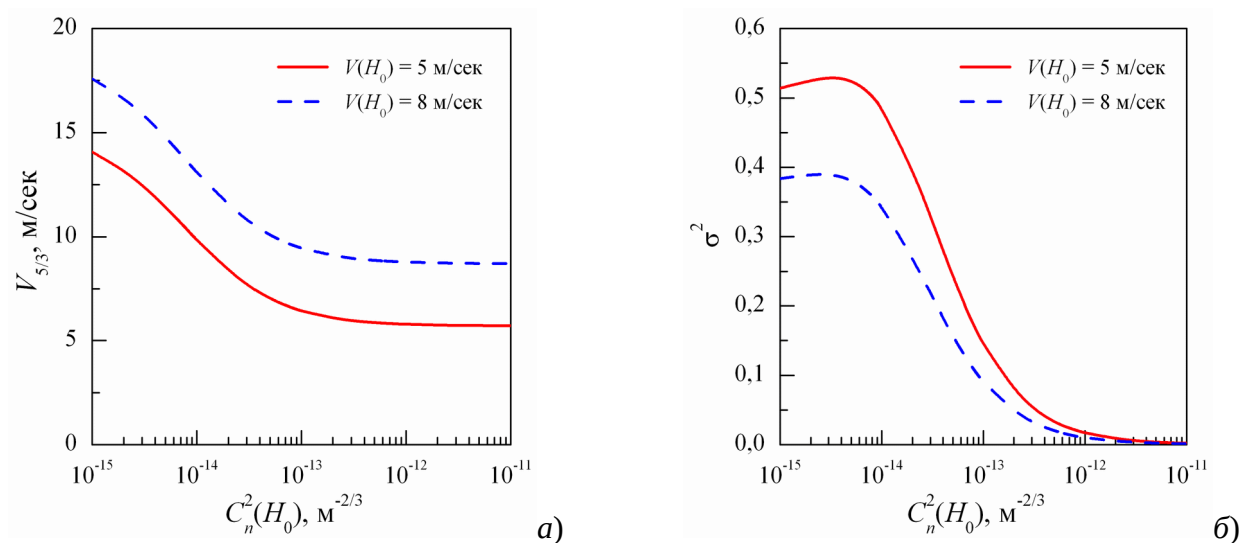


Рисунок 1 — Момент скорости ветра (а) и доля остаточных фазовых искажений при прогнозировании с использованием момента скорости ветра (б) как функции начального значения уровня турбулентности

На рис. 1, б представлены результаты расчётов по формуле (9), нормированных на значение структурной функции фазы без коррекции, для вертикальной атмосферной трассы в зависимости от начального значения уровня турбулентности. Численные расчёты сопровождались аналитическим анализом с использованием упрощенных моделей C_n^2 и скорости ветра. Результаты аналитических и численных расчётов соответствуют друг другу.

Развитие концепции выполнено в рамках госзадания Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, численные расчёты – по проекту РНФ №23-42-00043.

1. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
2. Noll R.J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence // J. Opt. Soc. Am. 1976. V. 66. N 3. P. 207–211.
3. Харди Дж. Активная оптика: Новая техника управления световым пучком // ТИИЭР. 1978. Т. 66. № 6. С. 31–85.
4. Лукин В.П. Прогноз фазовых флуктуаций оптических волн в турбулентной атмосфере на основе текущих данных // Изв. ВУЗов. Физика. 2024. Т. 67. № 2. С. 114–123.
5. Lukin V.P., Sazonova P.V. Dynamic properties of adaptive optical systems // Russian Physics Journal. 2016. V. 59. N 7. P. 1052–1061.
6. Лукин В.П., Лукин И.П. Обзор современных технологий измерения, прогнозирования и коррекции турбулентных искажений в оптических волнах // Компьютерная оптика. 2024. Т. 48. № 1. С. 68–80.

7. *Andrews L.C., Phillips R.L.* Laser beam propagation through random media. 2nd ed. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2005. 783 p.