

О ФИЗИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЯХ ПРАВИЛЬНОЙ РАБОТЫ «БЫСТРЫХ» ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И АДАПТИВНЫХ ФАЗОВЫХ СИСТЕМ

Лукин В.П.

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

lukin@iao.ru

В последнее время появились отдельные публикации, в которых распространяются идеи применения для атмосферных приложений быстрых систем измерения фазы и управления. Хотелось бы указать на неоднозначность успеха этих устремлений. В первую очередь это связано с ограничением фотонного потока и точностью измерений датчика волнового фронта (ДВФ) в ряде приложений. Ограниченная точность работы любых измерительных ДВФ делает бессмысленной высокую частоту, поскольку датчик начинает генерировать шум. За короткое время между соседними кадрами полезный сигнал не успевает меняться, а датчик фиксирует нулевое изменение сигнала, поэтому на гибкое зеркало не подается новое напряжение. С ростом частоты работы системы также усиливается влияние амплитудных флуктуаций особенно при усилении уровня турбулентности, когда происходит уменьшении радиуса когерентности поля r_0 , а, следовательно, и допустимой величины субапертуры. Какими бы быстрыми не были корректирующие гибкие зеркала, необходимо время для их работы, поэтому увеличивая быстродействие измерительной системы, неизбежно увеличивается остаточный уровень некомпенсированных искажений.

Работа выполнена в рамках госзадания Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.

В последнее время появилось ряд публикаций, в которых распространяются идеи применения для атмосферных приложений так называемых, «быстрых», а точнее «высокоскоростных» систем измерения фазы и адаптивного управления. Хотелось бы указать на неоднозначность успеха этих устремлений. В первую очередь это связано с ограничением фотонного потока и точности измерений ДВФ в ряде приложений. Имеют место также проявления особенностей измерений фазовых флуктуаций, обусловленных турбулентными искажениями. Поэтому нужен анализ временной эволюция фазовых флуктуаций, обусловленных турбулентностью. Следует отметить, что выбор рабочей частоты ДВФ зависит как от параметров самого датчика и, прежде всего, от точности его работы, так и от состояния турбулентности на атмосферной трассе.

В частности, астрономические объекты, интересующие астрономов при наблюдениях, как правило, имеют ограниченный фотонный поток. Как правило, они не превосходит по яркости 14-20 звездную величину. Поэтому для обеспечения работы ДВФ для систем адаптивной оптики (АО) используют, либо ближайшую яркую звезду, либо применяют лазерные опорные звезды (ЛОЗ). Однако, даже в лучшем случае это позволяет обеспечить фотонный поток на уровне 8-12 звездной величины. Сошлюсь на мнение доктора Р. Wizinovich из обсерватории

Кекка (Гавайи, США). Он в своем докладе [1] подвел некие итоги работы систем АО и заявил, что практически невозможны «быстрые» системы АО в астрономии.

Методом численного моделирования нами еще в 1998 году был проведен анализ [2] эффективности работы системы АО с датчиком Шэка–Гартмана, работающим по сигналу ЛОЗ в режиме пуассоновской статистики. Был использован нормированный диаметр апертуры телескопа $D/r_0 = 10$, размерность линзового раstra датчика 10X10. Было показано, что для обеспечения правильной работы ДВФ необходимо иметь, по крайней мере, от 20 до 100 фотонов на каждой субапертуре в течение времени одного кадра.

Известно, что фазовые искажения в оптических волнах обусловлены действием атмосферной турбулентности, которая представляет собой случайный процесс со стационарными первыми приращениями. Обычный спектр атмосферной турбулентности имеет 3 характерных интервала, а именно, энергетический, инерционный и вязкий (или интервал диссипации энергии) интервалы. В вязком интервале кинетическая энергия турбулентности переходит в тепловую. Для модели [3] турбулентности Колмогорова-Обухова верна следующая формула:

$$\chi_n(\kappa) = 0.033 C_n^2 (\kappa^{-2} + \kappa_m^{-2})^{-11/6} \exp(-\kappa^2 / \kappa_m^2), \quad (1)$$

где $\kappa = 2\pi / L_0$, $\kappa_m = 5.92 / l_0$, L_0 и l_0 - внешний и внутренний масштабы турбулентности.

Вычисленная при использовании модели (1) структурная функция фазы (как пространственная, так и временная) имеет, согласно [3], два характерных участка:

$$D_s(\rho) = \begin{cases} 6.88 r_0^{-5/3} \rho^{5/3}, & L_0 > \rho \gg l_0 \\ \text{const} \cdot r_0^{-5/3} \rho^2 l_0^{-1/3}, & \rho \leq l_0 \end{cases}. \quad (2)$$

Можно составную формулу (2) заменить одной формулой, описывающей оба участка, следующего вида:

$$D_s(\rho) = 6.88 r_0^{-5/3} [(\rho^2 + l_0^2)^{5/6} - l_0^{5/3}]. \quad (3)$$

Здесь ρ - пространственное смещение точек наблюдения, а для перехода от пространственной к временной структурной функции используем замену $\rho = V \cdot T$, где V – модуль поперечного вектора скорости ветра, T – время измерения (экспозиция).

Известно [3], что величина внутреннего масштаба турбулентности l_0 является функцией скорости диссипации турбулентной энергии и вязкости среды. Для атмосферы в приземной слое величина внутреннего масштаба обычно лежит в интервале (0,1 – 1,0) см.

Для примера сделаем оценку, исходя из средних значений некоего оптического эксперимента: пусть скорость ветра V составляет 4 м/с, а частота работы ДВФ составляет 4000 Гц, тогда величина временного смещения за время одного кадра оказывается равным $\rho = V \cdot T$

$=400/4000 = 0.1$ см. Таким образом, величина смещения $V \cdot T$ оказывается порядка 1 мм, т.е. она оказывается меньше, чем внутренний масштаб турбулентности l_0 . А это означает, что на такие высокочастотные измерения будут влиять не только фазовые, но и амплитудные флуктуации [3, 5, 6]. И такие фазовые измерения будут зависеть от внутреннего масштаба турбулентности, а также и, связанные с этими данными, оценки величины параметра (радиуса) Фрида.

В связи с этим при работе ДВФ на высоких частотах при оценке параметра Фрида, вместо формулы

$$D_s(VT) = 6.88(V / r_0)^{5/3} = 6.88(V / fr_0)^{5/3} \quad (4)$$

необходимо [3] использовать формулу, где явно проявляется зависимость от внутреннего масштаба, а именно

$$D_s(VT) = 6.88r_0^{-5/3}[V^2T^2 + l_0^2]^{5/6} - l_0^{5/3}. \quad (5)$$

Это связано с тем, что при достаточно высокой частоте работы ДВФ, величина пространственного смещения за время одного кадра равно V / f и оно оказывается меньше, чем внутренний масштаб турбулентности. Здесь $f = 1/T$ - частота кадров ДВФ. При этом, как показывают расчеты, оценка параметра Фрида на основе использования формулы (4), взамен формулы (5), оказывается завышенной почти вдвое.

Ранее, в работах [4-7] было показано, что СКО флуктуаций, которые за время, равное T , накапливаются в любой точке оптической волны за счет действия турбулентных неоднородностей, обусловленные движением атмосферы (средний ветер), можно рассчитать по следующей формуле:

$$\sigma = \sqrt{3.44(VT / r_0)^{5/3}} \approx 1.85(VT / r_0)^{5/6}. \quad (6)$$

В работах [4, 5] впервые были рассчитаны динамические характеристики систем АО. Если использовать, полученные там результаты и применить критерий Рэлея, то для обеспечения эффективной коррекции допустимая временная задержка между измерениями фазовых искажений и их коррекцией должна быть не более

$$T_R \approx 1.18(r_0 / V)(R / r_0)^{1/6}, \quad (9)$$

если же применить допуск Марешаля, тогда допустимое время задержки при коррекции не должно превышать

$$T_M \approx 0.34(r_0 / V)(R / r_0)^{1/6}. \quad (10)$$

Допустимые времена, даваемые формулами (9) и (10) пересчитываются в частоту работы ДВФ. Приведенные здесь расчеты позволяют оценить необходимую максимальную частоту

работы ДВФ. Она оказывается зависящей от величины параметра Фрида на трассе распространения оптического излучения, размера апертуры, величины поперечной скорости ветра и от точности измерений ДВФ.

Кроме этого для высокоскоростных ДВФ предельно высокая частота будет зависеть от величины внутреннего масштаба турбулентности. Это связано с тем, что на высоких частотах фазовые и амплитудные флуктуации уже невозможно полностью разделить [2, 4-6]. Поэтому слепая погоня за увеличением частоты работы ДВФ приводит к неправильным измерениям флуктуаций фазы из-за зависимости сигнала от амплитудных флуктуаций.

1. Wizinowich P. Progress in laser guide star adaptive optics and lessons learned // Proc. SPIE 2012. 8447. 84470D.
2. Lukin V.P., Fortes B.V. Phase correction of turbulent distortions of laser beams and images under the «strong» intensity fluctuations //Proc. SPIE. 1998. 3219.
3. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука. 1976. 277 с.
4. Lukin V.P. Dynamics of adaptive optical systems //J. Opt. Soc. Am. A. 2010. 27. №11. A216-A222.
5. Lukin V.P. and Sazonova P.V. Dynamic properties of adaptive optical systems // Russian Physics Journal. 2016. 59. No.7. p.1052-1061.
6. Лукин В.П. Требования к динамическим характеристикам систем адаптивной оптики // Квантовая Электроника. 2022. 52. №7. 652-660.
7. Lukin V.P. Features of adaptive phase correction of optical wave distortions under conditions of intensity fluctuations // MDPI. Photonics. 2024. 11(5). 460.
8. Казаков Д.В., Лукин В.П. Исследование влияния амплитудных флуктуаций на фазовые измерения // Сборник трудов конференции «Актуальные проблемы радиофизики»: X Международная научно-практическая конференция, г. Томск. 26-29 сентября 2023 г. Томск: Издательский дом ТГУ. 2023. А 43. 229-233.