

МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРИ АБЕРРАЦИЯХ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

Ягнятинский Д.А.

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

e-mail: lambsky@yandex.ru

Представлен сравнительный анализ двух видов модельно-ориентированных алгоритмов управления для адаптивных оптических систем – быстрого и последовательной коррекции – применительно к задаче измерения коэффициентов при абберациях (модах) волнового фронта на примере фазовых искажений, соответствующих колмогоровской модели турбулентности. В случае идеального корректора быстрый алгоритм требует наименьшего числа итераций и обеспечивает более точное измерение абберационных коэффициентов. Показано, что при использовании реального корректора алгоритм последовательной коррекции иногда может давать несколько большую точность работы. В качестве мод управления использовались моды Люкоса, а для модели корректора было выбрано деформируемое зеркало на дискретных пьезоприводах с оптимизированным планом их расположения.

Измерение коэффициентов при абберациях волнового фронта в реальном времени может быть полезным для получения статистики, которую можно потом использовать в алгоритмах коррекции волнового фронта с предсказанием. Иногда для этого желательно измерять не весь волновой фронт с помощью датчика Шака-Гартмана, чтобы потом делать декомпозицию по компонентам (с возможными ошибками), а использовать метод апертурного зондирования и измерять отдельные абберационные компоненты. Метод апертурного зондирования не требует непосредственного измерения волнового фронта, а обычно работает по датчику интенсивности. Одним из существенных преимуществ такого метода является меньшая чувствительность по энергетике, что может позволить работать с излучением как высокой, так и малой мощности. На данный момент скорость исполнительных устройств АОС не в полной мере достигла того уровня, чтобы широко использовать метод апертурного зондирования для работы в условиях турбулентной атмосферы, но с развитием оптико-электронных систем именно этот подход будет становиться всё более актуальным в вопросах фокусировки лазерного излучения, испытывающего искажения вследствие турбулентности.

Метод апертурного может быть реализован с помощью некоторого алгоритма управления, по которому подаются управляющие сигналы на корректор волнового фронта – чаще всего им является деформируемое зеркало (ДЗ). В данной работе мы рассмотрим модельно-ориентированные алгоритмы, при работе которых происходит измерение целевых абберационных компонент. Эти алгоритмы базируются на квадратичной зависимости квадрата второго центрированного момента (среднеквадратического радиуса) распределения

интенсивности излучения в дальней зоне (или в фокальной плоскости) от коэффициента пробного возмущения выбранной зондирующей aberrации. Для модельно-ориентированных алгоритмов используют полиномы (моды) Люкоса, которые обладают свойством независимого влияния компонент на среднеквадратический радиус фокального пятна (в приближении геометрической оптики).

Первыми и основными модельно-ориентированным алгоритмами являются алгоритмы, изобретенные английским учёным М.Д. Booth в 2000-х годах [1]. Мы будем называть их быстрыми, т.к. на данный момент они требуют наименьшего числа итераций, связанных с физическим воздействием на корректор, для измерения и коррекции aberrационных мод волнового фронта. Быстрые алгоритмы можно реализовать с одной или двумя итерациями для измерения каждого aberrационного коэффициента (для случаев с полностью или не полностью определенными параметрами системы, соответственно). Нами был разработан также модельно-ориентированный алгоритм последовательной коррекции aberrаций волнового фронта [2], который базируется на той же зависимости среднеквадратического радиуса фокального пятна от коэффициента пробного возмущения, что и быстрые, но не требует расчета aberrационного коэффициента по формулам, а лишь отслеживает изменение величины радиуса пятна. Проведенное сравнение результатов выполнения алгоритма последовательной коррекции и быстрых было сделано в приближении геометрической оптики и для отдельно взятого волнового фронта [2]. В данной работе производится более точное сравнение на основе моделирования работы алгоритмов в приближении дифракционного фокального пятна и с использованием большой выборки фазовых экранов, соответствующих колмогоровской модели турбулентности.



Рисунок 1 — План расположения приводов используемого деформируемого зеркала

Алгоритмы моделировались нами для двух случаев – при идеальном корректоре и для выбранного ДЗ. Использовалась модель ДЗ на дискретных пьезоприводах с гексагональным планом их расположения. Для максимально точной отработки ДЗ мод Люкоса с помощью расчетов был оптимизирован по методу из [3] план расположения приводов зеркала (рисунок 1), а также размеры подложки зеркала. В процессе оптимизации из схемы приводов было решено убрать 6 крайних угловых приводов (как в работе [4]). Кроме того, при оптимизации учитывалось условие, чтобы зеркало могло воспроизводить без ограничений по амплитуде моды Люкоса до X порядка включительно, соответственно уровню колмогоровской турбулентности, равным 30 (диапазон изменения коэффициентов соответствовал правилу «трёх сигм»).

Далее было выполнено численное моделирование работы рассматриваемых алгоритмов управления для измерения абберрационных коэффициентов – использовалось 2000 колмогоровских фазовых экранов, с уровнем турбулентности равным 10. Рассматривалось два случая – работа идеального корректора и работа предложенного деформируемого зеркала.

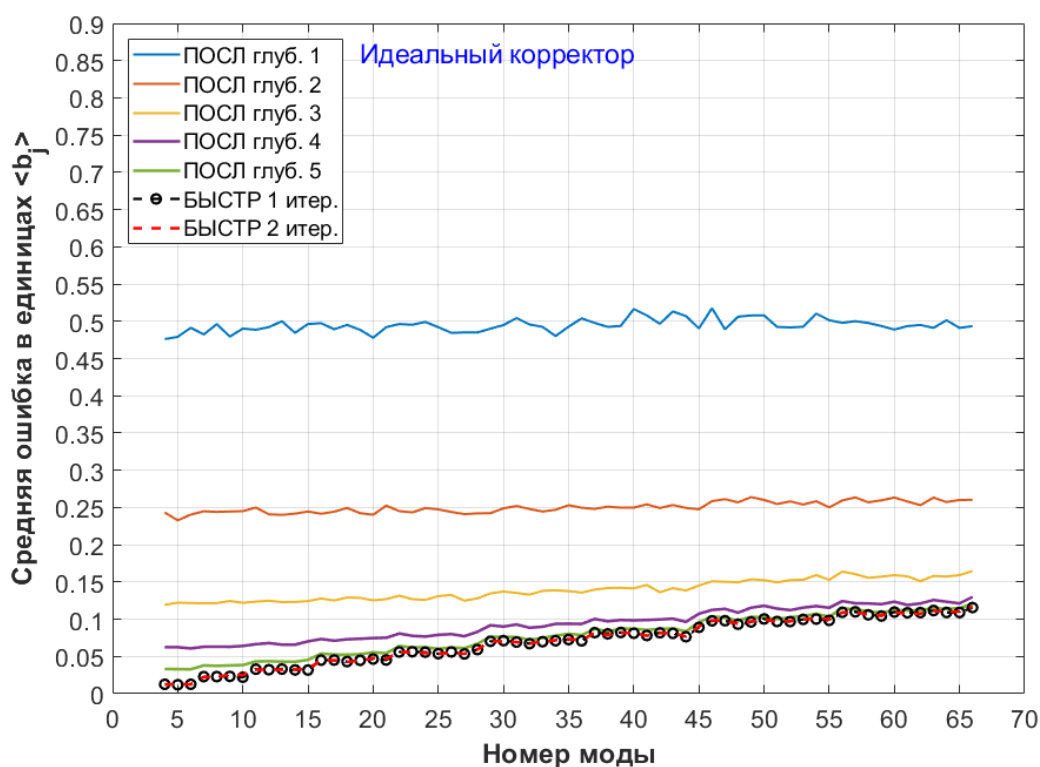


Рисунок 2 — Ошибка определения абберрационного коэффициента для разных алгоритмов

На рисунке 2 показана ошибка определения значения коэффициента Люкоса b_j для рассматриваемых мод при работе идеального корректора, в единицах среднего значения $\langle b_j \rangle$ этого коэффициента для выбранной статистики искажений. Видно, что с увеличением глубины поиска алгоритма последовательной коррекции точность увеличивается и стремится к точности

работы быстрых алгоритмов (с одной или двумя итерациями для измерения коэффициента). Таким образом, по сравнению с менее точными результатами моделирования в приближении геометрической оптики из [2] расчет дифракции Фраунгофера показывает, что быстрые алгоритмы в идеале всегда точнее алгоритма последовательной коррекции.

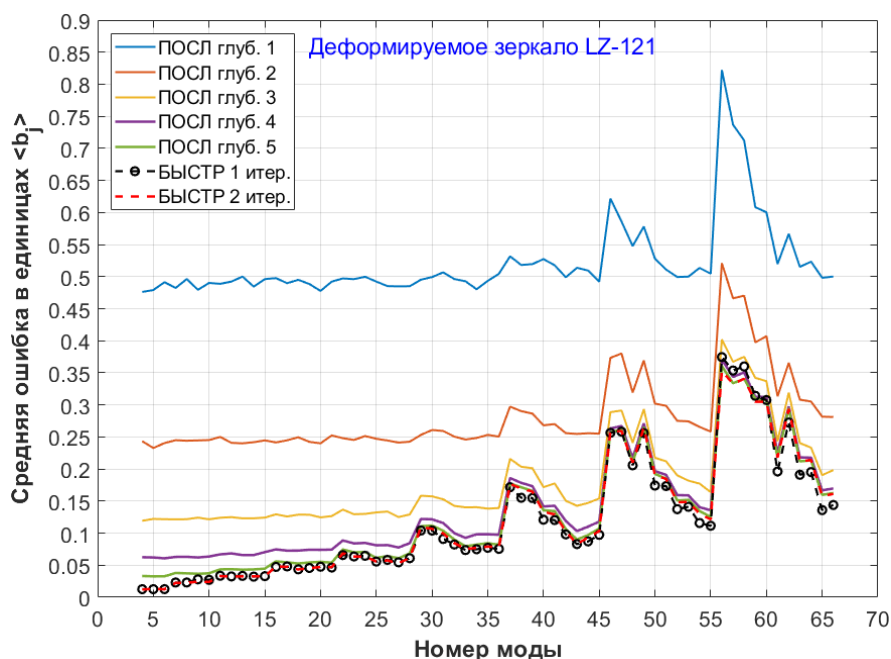


Рисунок 3 — Ошибка определения абберационного коэффициента для разных алгоритмов

На рисунке 3 показана та же величина, что и на рисунке 2, только для случая рассмотренного деформируемого зеркала. За счет ошибки воспроизведения зеркалом пространственных форм более высоких порядков aberrаций при апертурном зондировании ошибка определения коэффициентов Люкоса может заметно возрасти по сравнению со случаем идеального корректора. Кроме того, для наиболее плохо воспроизводимых зеркалом мод (56-60) алгоритм последовательной коррекции с глубиной поиска 5 может слегка превосходить в точности быстрый алгоритм с 1-й итерацией, но при этом быстрый алгоритм с 2-мя итерациями будет точнее.

На основе представленных результатов можно заключить, что для измерения aberrационных коэффициентов быстрые модельно-ориентированные алгоритмы целесообразно использовать в случае работы зеркал высокого разрешения, а алгоритм последовательной коррекции может дать преимущество в системах со значительными шумами.

1. Booth M.J. Wavefront sensorless adaptive optics for large aberrations // Optics Letters. 2007. V. 32. № 1. P. 5–7.
2. Ягнятинский Д.А., Федосеев В.Н. Алгоритм последовательной коррекции aberrаций волнового фронта по критерию минимизации размера фокального пятна // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 1. С. 32–39.

3. Ягнятинский Д.А., Федосеев В.Н. Аналитический расчёт функций влияния сосредоточенно воздействующих приводов круглого деформируемого зеркала со свободным краем // Автометрия. 2021. Т. 57. № 1. С. 68–79.

4. Toporovsky V., Samarkin V., Sheldakova J., et al. Water-cooled stacked-actuator flexible mirror for high-power laser // Optics and Laser Technology. 2021. V. 144. № 107427. P. 1–7.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.