

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОСТАВКИ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ЧЕРЕЗ ТУРБУЛЕНТНУЮ АТМОСФЕРУ НА ШЕРОХОВАТУЮ МИШЕНЬ С ПОМОЩЬЮ ГИБКОГО АДАПТИВНОГО ЗЕРКАЛА

*В. А. Богачев, Ф. А. Стариков*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Дальность действия лазерного локаатора, предназначенного для определения координат космических объектов (например, космического мусора), в условиях земной атмосферы ограничивается особенностями распространения лазерного излучения на трассе локации. Наличие оптических неоднородностей на трассе распространения вызывает значительную пространственную диффузию энергии лазерного излучения в направлении от оси излучения: лазерный пучок по мере удаления от источника излучения расплывается в пространстве. Это приводит к ослаблению лазерного излучения на оси пучка, что, в свою очередь, обуславливает уменьшение дальности действия, а также разрешающей способности лазерного локаатора. Одним из эффективных путей уменьшения возмущающего действия турбулентности атмосферы на качество функционирования систем лазерной локации является применение адаптивных методов компенсации искажений оптического сигнала. Сущность адаптивных методов заключается в автоматической коррекции амплитуды и фазы исходящего лазерного излучения на основании информации об оптических неоднородностях трассы распространения с целью получения максимальной интенсивности излучения в плоскости исследуемого объекта (получения наилучшего изображения объекта). Информация о неоднородностях может быть получена из анализа опорного излучения, т. е. отраженного от объекта излучения лазера подсветки или Солнца.

Общепринято, что, формируя в исходящем пучке волновой фронт, сопряженный опорному, можно максимально сфокусировать исходящий пучок на объекте, компенсировав оптические неоднородности трассы. В этом состоит подход фазового сопряжения. В действительности фазовые искажения пришедшего на Землю опорного пучка обусловлены не только фазовыми неоднородностями, приобретенными на турбулентной трассе распространения, но и исходными фазовыми неоднородностями на неровной («шероховатой») поверхности объекта. Делая точное фазовое сопряжение в исходящем пучке, мы компенсируем совокупные оптические неоднородности. Но очевидно, что для исходящего пучка требуется компенсировать только оптические неоднородности трассы, а воспроизводить фазовые неоднородности в плоскости объекта вовсе

не требуется – на мишени нужна только концентрация энергии. Таким образом, подход точного фазового сопряжения для концентрации энергии лазерного излучения неэффективен. В численном эксперименте выделить и компенсировать искажения фазы опорного пучка, обусловленные только турбулентностью атмосферы, не представляет особого труда. Задача заключается в том, чтобы найти способ технической реализации этого процесса и, более того, реализовать его в реальном масштабе времени. Возможному способу решения этой задачи в случае вертикальной трассы посвящена настоящая работа.

## 1. Основные положения

В настоящей работе задача лазерной локации удаленного объекта через вертикальную воздушную трассу исследуется с помощью численного моделирования. Расчеты распространения проводились в рамках модели интегрирования параболического уравнения для амплитуды поля с учетом турбулентности в виде набора соответствующих фазовых экранов [1]. В расчетах использовалась модель высотной зависимости структурной характеристики показателя преломления  $C_n^2(z)$ , предложенная в [2, 3]. Значение структурной постоянной в приземном слое равнялось  $C_{n0}^2 = 10^{-14} \text{ см}^{-2/3}$  (наиболее вероятно для дневной турбулентности). Зависимость  $C_n^2(z)$  использовалась до высоты 30 км, а оставшуюся часть трассы излучение проходило в вакууме.

В настоящей работе рассматривается следующая модель. На расстоянии  $L = 260 \text{ км}$  от поверхности Земли ( $z = 0$ ) находится объект. Он подсвечивается вспомогательным лазерным излучением, и в результате его рассеяния образуется опорное излучение, которое принимается на Земле. Опорное излучение с длиной волны  $\lambda$  около  $1 \text{ мкм}$  распространяется от объекта на Землю по вертикальной турбулентной трассе. Искажения волнового фронта опорного пучка содержат информацию о неоднородностях на поверхности объекта и оптических неоднородностях турбулентной трассы. Волновой фронт опорного излучения, прошедшего через турбулентную атмосферу, обрабатывается, и полученная информация используется для внесения пре-

дискажений в волновой фронт исходящего излучения. Исходящее лазерное излучение с длиной волны  $\lambda$  распространяется вертикально вверх, проходя через те же оптические неоднородности атмосферы, что и опорный пучок.

Для моделирования неоднородностей поверхности объекта («шероховатости») в качестве опорного излучения выбирается световое поле, промодулированное по амплитуде и фазе. Распределение опорного излучения задается случайной реализацией поля с корреляционной функцией дважды гауссова вида

$$\langle A(\mathbf{r}_1), A^*(\mathbf{r}_2) \rangle = \exp\left(-\frac{2\mathbf{r}^2}{a^2} - \frac{\mathbf{r}'^2}{l_c^2}\right), \quad (1)$$

где  $\mathbf{r} = \{x, y\}$ ,  $\mathbf{r} = (\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2)/2$ ,  $\mathbf{r}' = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$ ;  $l_c$  – радиус корреляции излучения,  $a$  – радиус пучка. Отношение угловой расходимости излучения к дифракционному пределу характеризуется числом  $\xi = \sqrt{2}a/l_c$ , которое представляет собой среднее число неоднородностей на поперечном сечении пучка. В расчетах использовались следующие параметры пучка:  $a = 125$  см,  $\xi = 20$ . Таким образом,  $l_c \approx 9$  см, что соответствует характерному масштабу неоднородностей на поверхности объекта. Характерное распределение интенсивности и фазы опорного излучения на объекте представлено на рис. 1. При дальнейшем изложении условимся называть спеклами амплитудно-фазовые искажения, причиной которых является отражение от «шероховатой» поверхности объекта. Дополнительные амплитудно-фазовые искажения, причиной которых является распространение по турбулентной атмосферной трассе, будем называть турбулентными искажениями.

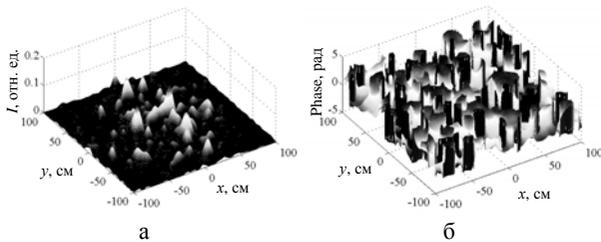


Рис. 1. Распределение интенсивности (а) и фазы (б) опорного пучка на объекте

## 2. Исследование амплитудно-фазовых характеристик опорного излучения

В данном разделе исследуются амплитудно-фазовые характеристики опорного излучения, прошедшего через турбулентную атмосферу. На рис. 2, а представлено распределение интенсивности опорного излучения от «шероховатого» объекта на входе в верхний слой атмосферы (на высоте 30 км). Приобретенные искажения интенсивности носят характер спекл-структуры и количественно они связаны с выбранной моделью «шероховатости» отражающей поверхности

объекта. На рис. 2, б и в даны распределения интенсивности опорного излучения от «шероховатой» поверхности объекта на приемной апертуре на Земле – в отсутствие и при наличии турбулентных искажений, соответственно. Из сравнения рис. 2, б и в легко видеть, что развитая спекл-структура в процессе прохождения через атмосферу заметных искажений не претерпевает. Другими словами, искажения, вносимые слоем турбулентной атмосферы, можно приближенно рассматривать как относительно мелкомасштабные искажения на фоне крупномасштабной структуры, связанной с «шероховатостью» отражающей поверхности объекта.

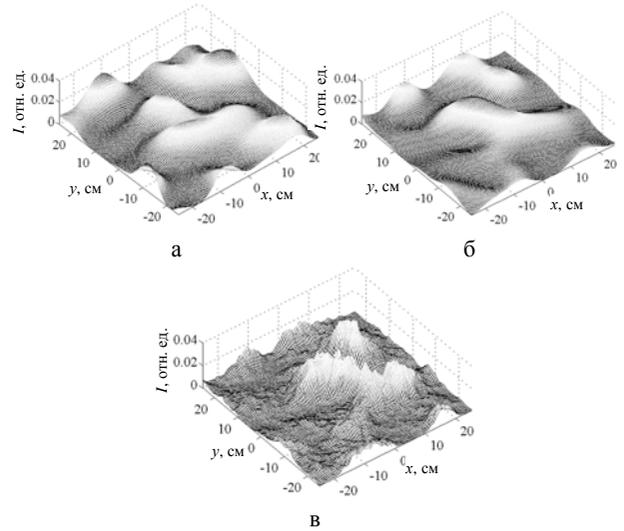


Рис. 2. Распределение интенсивности опорного излучения на входе в атмосферный слой (а), на приемной апертуре без учета (б) и с учетом (в) турбулентности атмосферы

В работе [4] наличие развитой спекл-структуры однозначно связывалось с появлением винтовых дислокаций волнового фронта (оптических вихрей), поэтому можно предположить, что при распространении опорного излучения от объекта на верхний слой атмосферы в нем образуются оптические вихри. Известно, что винтовая дислокация поля может возникнуть в той точке пространства, где одновременно действительная и мнимая части поля обращаются в нуль. На рис. 3 приведены линии нулевого значения действительной и мнимой частей поля на входе в слой атмосферы и на приемной апертуре с учетом и без учета турбулентных искажений.

Из рис. 3 видно, что после распространения опорного пучка через атмосферу количество оптических вихрей в нем не меняется (по крайней мере, не возрастает). Главным образом изменяется местоположение вихрей (т. е. они сдвигаются), но не их количество. Однако более объективную картину может дать вычисление топологического заряда поля в пределах приемной апертуры в обоих рассматриваемых случаях. Отличительной особенностью оптического вихря является то, что обход вокруг него по произвольной замкнутой траектории дает приращение фазы, равное  $\pm 2\pi N$ , где  $N$  – топологический заряд оптического

вихря. Эта особенность может быть выражена следующей формулой:

$$\oint_{\Gamma} \nabla \Phi \cdot d\vec{\Gamma} = \oint_{\Gamma} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} dx + \frac{\partial \Phi}{\partial y} dy \right) = 2\pi N, \quad (2)$$

где  $\Phi$  – фаза поля в рассматриваемой точке пространства. На рис. 4,а приведена зависимость величины суммарного топологического заряда от радиуса апертуры с учетом и без учета турбулентных возмущений атмосферы. Видно, что в некоторых точках топологический заряд принимает нецелочисленные значения. Это обусловлено ошибкой, связанной с шагом интегрирования, поскольку теоретически топологический заряд может принимать только целочисленные значения. На приемной апертуре 50 см полный топологический заряд равен  $-2$  в обоих случаях.

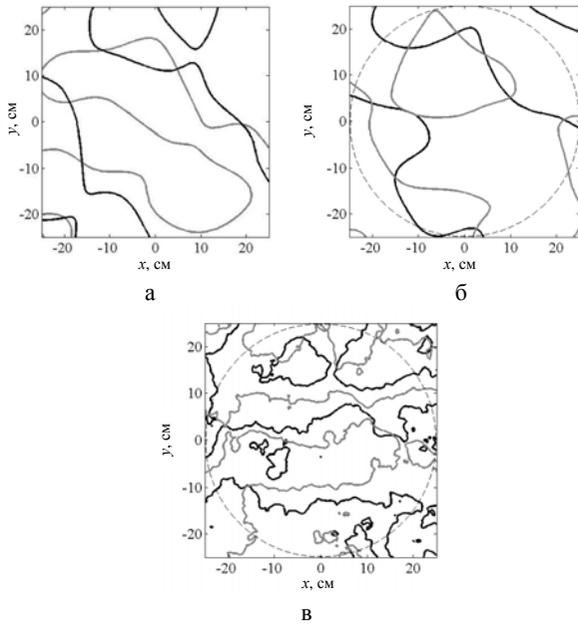


Рис. 3. Линии нулевого уровня действительной и мнимой частей поля на входе в атмосферный слой (а) и на приемной апертуре без учета (б) и с учетом (в) турбулентности.

Пунктирный кружок соответствует размерам приемной апертуры

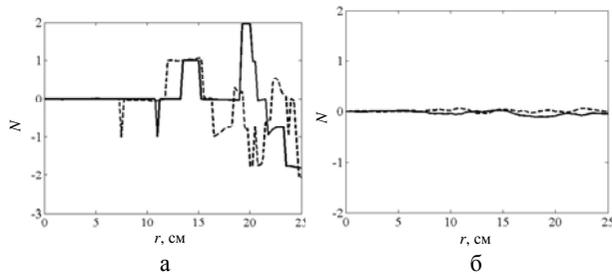


Рис. 4. Зависимость суммарного топологического заряда от радиуса апертуры для опорного пучка, отраженного от «шероховатой» поверхности объекта и прошедшего через вакуум (сплошная линия) и турбулентную атмосферу (пунктирная линия) (а), и для опорного пучка с плоским волновым фронтом для двух случайных реализаций атмосферы (б)

Видно, что на вертикальной трассе атмосфера в рассматриваемом случае не порождает винтовых дислокаций. Тем не менее, стоит отметить, что при определенных условиях (атмосферные трассы достаточно большой протяженности) дислокации могут возникать. Но в этом случае они будут возникать парами с суммарным зарядом, равным нулю.

Таким образом, мы можем сформулировать следующие выводы:

1. Фазовые искажения, приобретаемые опорным пучком при отражении от «шероховатой» поверхности объекта и распространении в вакууме до верхнего слоя атмосферы, трансформируются в развитую спекл-структуру с винтовыми дислокациями фазовой поверхности (оптическими вихрями).

2. При дальнейшем распространении опорного пучка с верхнего слоя атмосферы до приемной апертуры на Земле по трассе, близкой к вертикальной, турбулентность приводит к появлению относительно мелкомасштабных неоднородностей и сдвигу имеющихся вихрей на фазовой поверхности, но не к образованию новых вихрей.

3. Обрезание опорного пучка на приемной апертуре приводит к тому, что полный топологический заряд регистрируемого излучения за счет потери части информации может принимать случайное значение (в т. ч. быть ненулевым).

4. Наличие не равного нулю топологического заряда опорного излучения делает малоэффективным процесс обращения волнового фронта с целью наилучшей фокусировки исходящего излучения на объекте.

### 3. Возможности адаптивного зеркала для компенсации турбулентности атмосферы

В предыдущем разделе было установлено, что при распространении опорного спекл-пучка до приемной апертуры образуются оптические вихри. Причем в рассматриваемом случае вихри обусловлены только отражением опорного излучения от «шероховатой» поверхности объекта, а не влиянием турбулентности атмосферы. Учитывая, что для эффективной передачи исходящего излучения на объект следует компенсировать только искажения, вносимые в опорный пучок атмосферой, приходим к выводу, что оптические вихри не несут полезной информации. Таким образом, при обработке информации о волновом фронте опорного излучения необходимо одновременно устранить винтовые дислокации и выделить искажения опорного пучка, обусловленные турбулентностью атмосферы. На практике можно попытаться реализовать это средствами линейной адаптивной оптики, обсуждению которых посвящен данный раздел.

Предлагаемый метод компенсации искажений опорного пучка, обусловленных турбулентностью атмосферы, с помощью адаптивной оптики заключается в следующем. Опорный пучок, прошедший через турбулентную атмосферу, направляется через приемную апертуру на деформируемое адаптивное зер-

кало. Отразившись от адаптивного зеркала, опорное излучение фокусируется линзой на фотоприемник. Форма отражающей поверхности адаптивного зеркала изменяется таким образом, чтобы интенсивность излучения в центре фокального пятна на фотоприемнике была максимальной. В данной работе для управления адаптивным зеркалом используется стохастический параллельный градиентный (СПГ) алгоритм [5]. Максимизация интенсивности означает то, что адаптивное зеркало приобретает форму, максимально близкую к профилю волнового фронта, но только со сглаженными разрывами на нем благодаря тому, что зеркало является не сегментированным, а гибким. После максимизации интенсивности излучения на фотоприемнике на адаптивное зеркало отправляется исходящее излучение с супергауссовым распределением интенсивности и плоским фазовым фронтом, которое, отразившись, направляется через приемную апертуру на объект. В данном случае задача адаптивного зеркала состоит в том, чтобы максимально скомпенсировать искажения опорного излучения, вызванные турбулентностью атмосферы, в присутствии оптических вихрей. Фазовый фронт исходящего излучения будет представлять собой гладкую поверхность, так как зеркало не может, как указано выше, воспроизводить разрывы волнового фронта. Таким образом, в исходящем пучке не формируются оптические вихри на стадии отражения от адаптивного зеркала. В дальнейшем они, в общем случае, могут сформироваться, но полный топологический заряд останется равным нулю.

Рассмотрим результаты расчетов по компенсации неоднородностей атмосферы с помощью вышеизложенного метода. На рис. 5 представлены распределения интенсивности и фазы опорного излучения, попадающего на адаптивное зеркало. Отчетливо видна вихревая структура фазы опорного излучения.

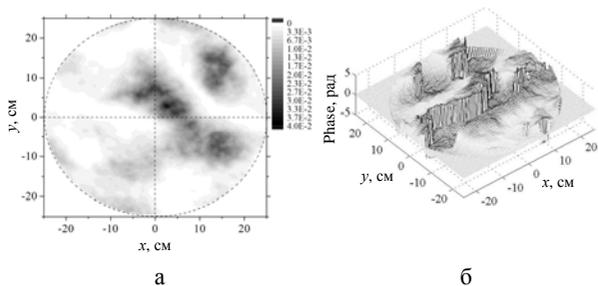


Рис. 5. Распределение интенсивности (а) и фазы (б) опорного излучения, попадающего на адаптивное зеркало

Стоит заметить, что при численном моделировании рассматривалось гибкое биморфное адаптивное зеркало с  $5 \times 5 = 25$  управляющими элементами в квадратной упаковке с экспериментально измеренными функциями отклика. Результаты работы адаптивного зеркала продемонстрированы на рис. 6. После коррекции волнового фронта опорного излучения максимальная яркость на фотоприемнике увели-

чилась более чем в 3 раза, при этом главное, что максимум распределения яркости находится на оптической оси. Число Штреля в этом случае равнялось 0,61. Пятно опорного излучения в дальней зоне стало существенно более компактным.

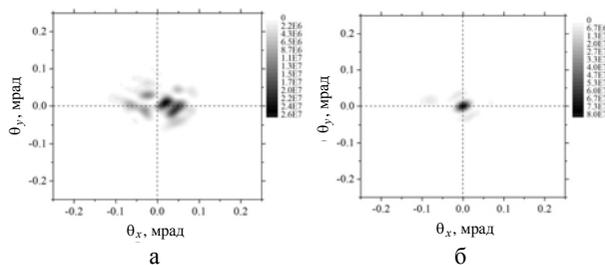


Рис. 6. Угловое распределение опорного излучения в дальней зоне до и после коррекции адаптивным зеркалом

На рис. 7 показаны распределение интенсивности и фаза исходящего излучения после отражения от адаптивного зеркала. Видно, что поверхность фазы гладкая, без каких-либо разрывов и особенностей, и фактически представляет собой сглаженное распределение, показанное на рис. 5,б. Исходящее излучение с данной фазовой поверхностью и супергауссовым распределением интенсивности направляется на объект, проходя через те же неоднородности атмосферы, что и опорное излучение.

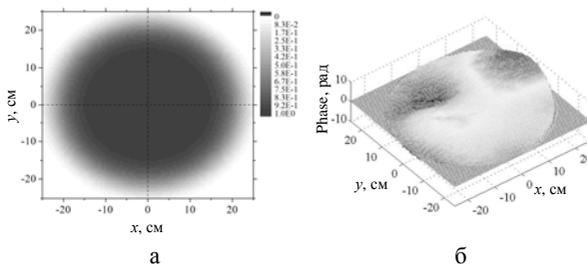


Рис. 7. Распределение интенсивности (а) и фазы (б) исходящего излучения до прохождения через турбулентную атмосферу

На рис. 8 представлено распределение интенсивности и фазы исходящего пучка на объекте, после прохождения турбулентной атмосферы. В данном случае основная часть исходящего излучения сконцентрирована около оптической оси системы. Кроме того, фазовая поверхность излучения в приосевой области практически не отличается от плоской поверхности. На рис. 9 показано распределение интенсивности, полученное при тех же параметрах расчета в случае точного фазового сопряжения и при отсутствии компенсации aberrаций атмосферы (т. е. когда фаза исходящего излучения была плоской). В рассматриваемом случае применение гибкого адаптивного зеркала более выгодно для максимизации интенсивности лазерного излучения на объекте, чем использование точного фазового сопряжения.

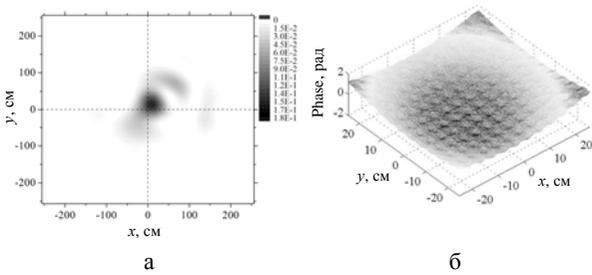


Рис. 8. Распределение интенсивности (а) и фазы (б) исходящего излучения на объекте

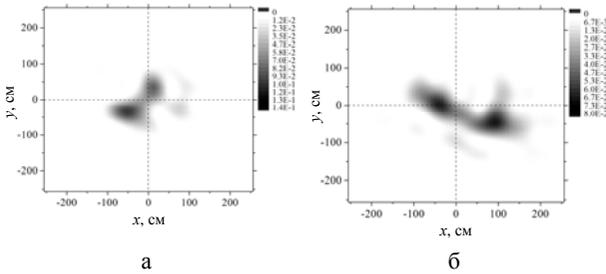


Рис. 9. Распределение интенсивности исходящего излучения на объекте в случае фазового сопряжения (а) и отсутствия компенсации аберраций атмосферы (б)

В подтверждение найденной закономерности на рис. 10 представлены результаты расчетов для еще двух различных реализаций опорного спекл-пучка. Видно, что в случае применения гибкого адаптивного зеркала на мишени реализуется более эффективная фокусировка исходящего пучка, чем в случае точного фазового сопряжения. Качество работы адаптивной системы характеризовалось числом Штреля  $St$ . При идеальной работе адаптивного зеркала, когда волновой фронт отраженного от зеркала излучения полностью сопряжен с волновым фронтом падающего на него излучения, число Штреля достигает максимального значения –  $St = 1$ . Для реализаций, представленных на рис. 10, а, в, значение максимальной интенсивности исходящего излучения на объекте возрастает на 30 %, при увеличении числа Штреля от 0,6

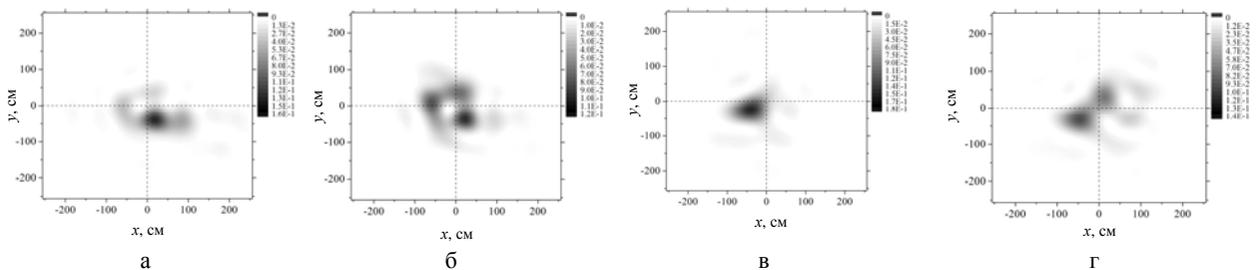


Рис. 10. Распределение интенсивности исходящего излучения на объекте в случае применения адаптивного зеркала (а, в) и фазового сопряжения (б, г): а –  $St = 0,61$ ; в –  $St = 0,68$

до 0,7. Стоит отметить, что даже при средних значениях числа Штреля (0,6–0,7) распределение интенсивности исходящего пучка на объекте находится вблизи оптической оси и в пределах апертуры опорного пучка с радиусом 100 см. Это говорит о том, что исходящий пучок «попадает» на объект.

## Заключение

Настоящая работа посвящена вопросам фокусировки лазерного пучка на неровную («шероховатую») поверхность объекта, расположенного на большой высоте над поверхностью Земли, что важно для проблемы локации, например, космического мусора. В исходящий лазерный пучок в этом случае должны вноситься фазовые искажения, чтобы скомпенсировать оптические неоднородности трассы. Информация о данных неоднородностях обычно содержится в опорном излучении, отраженном от поверхности объекта и принимаемом на Земле. В данной работе проведено численное моделирование распространения опорного и исходящего излучения на длине волны около 1 мкм через турбулентную атмосферу. Полученные результаты можно сформулировать следующим образом.

1. Выяснено, что после отражения от «шероховатой» поверхности объекта и прохождения в свободном пространстве опорный пучок на верхнем слое атмосферы содержит спекл-структуру и сильные фазовые искажения – винтовые дислокации волнового фронта (оптические вихри), в окрестности которых фазовая поверхность имеет сингулярную, винтовую форму.

2. Установлено, что при дальнейшем распространении опорного пучка с верхнего слоя атмосферы до приемной апертуры на Земле по трассе, близкой к вертикальной, турбулентность приводит к дополнительным регулярным фазовым искажениям и к сдвигу имеющих вихрей на фазовой поверхности, но не порождает новых вихрей. Учитывая, что для наилучшей фокусировки исходящего излучения на объект следует компенсировать только искажения, вносимые в опорный пучок атмосферой, сделан вывод, что оптические вихри в опорном пучке на Земле не несут полезной информации.

3. Найдено, что суммарный топологический заряд обрезанного приемной апертурой опорного пучка случаен и может быть не равен нулю за счет потери части информации. Если топологический заряд отличен от нуля, то использование точного фазового сопряжения не обеспечивает наилучшую фокусировку на объект, поскольку в исходящем пучке на верхнем слое атмосферы также будут обязательно присутствовать вихри в силу закона сохранения заряда.

4. Для оптимизации работы системы предложена гипотеза, что форма поверхности адаптивного зеркала не должна повторять форму волнового фронта опорного пучка (с вихрями), обеспечивая фазовое сопряжение, а необходимо сглаживание разрывов и исключение вихрей.

5. Волновой фронт исходящего излучения предложено формировать с помощью гибкого биморфного адаптивного зеркала, проводя процедуру максимизации яркости опорного пучка с помощью стохастического параллельного градиентного (СПГ) алгоритма. Основанием для такого подхода служит тот факт, что винтовые дислокации фазовой поверхности не могут быть воспроизведены гибким зеркалом, что приводит к сглаживанию разрывов. В расчетах показано, что реализуемая после коррекции форма адаптивного зеркала действительно представляет собой сглаженную фазовую поверхность, изначально сингулярную.

6. После максимизации интенсивности опорного излучения на фотоприемнике с помощью СПГ алгоритма на адаптивное зеркало попадает исходящее излучение с плоским фазовым фронтом, которое, отразившись, направляется на объект. В расчетах показано, что в данном случае на объекте реализуется более эффективная фокусировка исходящего пучка, чем в случае точного фазового сопряжения.

На практике число Штреля  $St$ , характеризующее качество работы гибкого биморфного адаптивного зеркала, должно быть меньше единицы, так как точное фазовое сопряжение не является оптимальным для фокусировки исходящего пучка на мишени. С другой стороны, это число должно быть достаточно велико для того, чтобы при прохождении исходящего лазерного пучка удалось скомпенсировать искажения, вносимые в него турбулентной атмосферой. Анализируя результаты расчетов, можно сделать вывод, что оптимальные значения числа Штреля находятся в диапазоне от 0,6 до 1 ( $0,6 \leq St < 1$ ).

## Литература

1. Кандидов В. П. // Успехи физических наук. 1996. Т. 166, № 12. С. 1309.
2. Гурвич А. С., Кон А. И., Миронов В. Л., Хмелевцов С. С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976.
3. Миронов В. Л. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1981.
4. Зельдович Б. Я., Пилипецкий Н. Ф., Шкунов В. В. Обращение волнового фронта. М.: Наука, 1985.
5. Гаранин С. Г., Маначинский А. Н., Стариков Ф. А., Хохлов С. В. Адаптивные оптические системы в РФЯЦ-ВНИИЭФ с различными принципами управления // XVII Международ. симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 28.06–01.07.2011.
6. Starikov F. A., Kochemasov G. G., Kulikov S. M. et al. // Optics Letters. 2007. Vol. 32. P. 2291.