

Влияние апертурных потерь на точность попадания на удаленный объект излучения, отраженного от ОВФ-зеркала

И.М.Бельдюгин, В.Ф.Ефимков, И.Г.Зубарев, С.И.Михайлов

Экспериментально показано, что при использовании методов ОВФ для самонаведения лазерного излучения на удаленные объекты доля излучения, попадающего точно на объект, составляет $80\% \pm 10\%$ от всей энергии, отраженной от ОВФ-зеркала, и в большинстве случаев слабо зависит от величины турбулентности атмосферы и длины трассы, несмотря на значительную величину апертурных потерь.

Ключевые слова: турбулентная атмосфера, приемная апертура, ОВФ-зеркало.

Хорошо известно, что при наличии эффекта обращения волнового фронта (ОВФ) волна, отраженная от ОВФ-зеркала, последовательно проходит через промежуточные состояния и возвращается к исходному. Открытие этого эффекта в 1972 г. стимулировало большое количество теоретических и экспериментальных работ, посвященных возможности самонаведения излучения на мишень при помощи ОВФ. Один из вариантов подобного самонаведения представлен на рис.1.

Лазер подсветки освещает мишень, отраженный от нее свет улавливается телескопом, усиливается, отражается от ОВФ-зеркала, вторично усиливается и направляется точно на мишень. Это было продемонстрировано во многих лабораторных экспериментах, где оптические элементы схем априорно располагались так, что практически все излучение мишени или ее имитатора попадало в апертуру ОВФ-зеркала. Совершенно очевидно, что наличие ограниченной апертуры ОВФ-зеркала даже в отсутствие атмосферных искажений в натурных экспериментах должно приводить к уменьшению доли энергии, попадающей точно на мишень. Это происходит из-за уменьшения так называемого параметра обращения – нормированного интеграла перекрытия

$$\chi = \frac{\left| \int E_d E_b dS \right|^2}{\int |E_d|^2 dS \int |E_b|^2 dS},$$

где E_d и E_b – амплитуды волн прямого и обратного излучения, а dS – элемент площади в поперечном сечении пучков. Используя это выражение, легко показать, что при наличии апертурных потерь и стопроцентном качестве ОВФ в зеркале величина χ равна относительной доле энергии сигнального пучка, перехватываемой апертурой ОВФ-зеркала. Если изначальный пучок имеет дифрак-

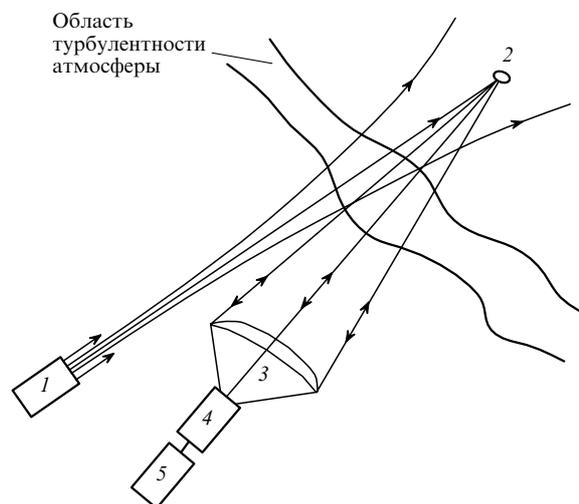


Рис.1. Схема использования самонаведения в условиях реальной атмосферы:

1 – лазер подсветки; 2 – удаленная мишень; 3 – телескоп; 4 – лазерный усилитель; 5 – ОВФ-зеркало.

ционное качество, то величина χ непосредственно определяет долю отраженной энергии, попадающей в дифракционный угол.

В зависимости от соотношений френелевской длины Z_F , длины трассы L , расходимости исходного излучения и угла видения через фазоискажающую среду (в данном случае – турбулентную атмосферу) реализуются различные варианты неполной компенсации фазовых искажений, а значит, уменьшения доли энергии, попадающей на мишень. Важно отметить, что в модельных экспериментах использовались двумерные фазовые пластинки. Не перебирая все возможные варианты [1], остановимся на самом благоприятном для поставленной задачи: при $Z_F \geq L$ справедливо приближение геометрической оптики и имеет место компенсация искажений, вносимых фазовой пластинкой, однако расходимость компенсированного излучения будет определяться дифракцией на приемной апертуре ОВФ-зеркала. Теперь остается найти условия, при которых можно заменить турбулентную

И.М.Бельдюгин, В.Ф.Ефимков, И.Г.Зубарев, С.И.Михайлов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: efimkov@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 21 июня 2005 г.

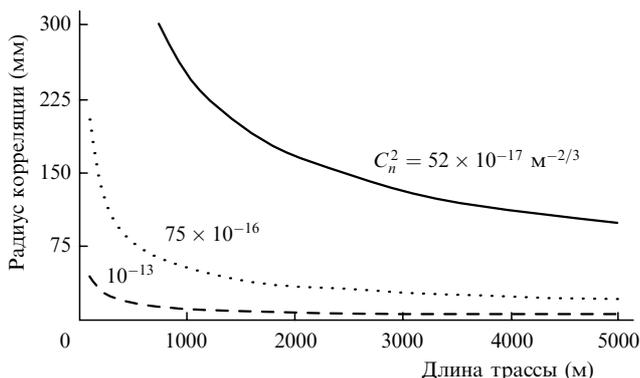


Рис.2. Зависимости радиуса корреляции от длины трассы и структурной постоянной C_n^2 при $\lambda \approx 1$ мкм в случае слабой турбулентности (сплошная кривая), средней турбулентности (пунктир) и сильной турбулентности (штриховая кривая).

атмосферу эквивалентной фазовой пластинкой с выполнением условия $Z_F \geq L$. Используя данные из известной монографии [2], можно найти зависимости радиуса корреляции светового пучка от длины трассы и величины структурной постоянной C_n^2 для длины волны неодимового лазера с $\lambda = 1.06$ мкм (рис.2).

Расчеты проводились по известной формуле: $\rho_0 = (0.54 C_n^2 \kappa L)^{-3/5}$ для приземной трассы [2].

Хорошо видно, что, вычисляя френелевскую длину $Z_F = \kappa \rho_0^2 / 2$ в случае слабой и средней турбулентности, получаем величину, заведомо превышающую 5000 м. Это означает, что практически всегда атмосферу можно считать «прижатой» ко входной апертуре ОВФ-зеркала фазовой пластинкой, а искажения, вносимые ею, будут компенсироваться практически полностью. Доля энергии света, попадающего точно на мишень, при этом будет слабо зависеть от величины апертурных потерь, если выполняется условие разрешения апертурой ОВФ-зеркала размеров мишени, т.е. когда $\lambda L / D < d$, где D – апертура ОВФ-зеркала, а d – характерный размер мишени. При нарушении данного неравенства, очевидно, следует резкое падение попадающей на мишень энергии.

Экспериментальное исследование проводилось на натурном стенде с длиной трассы ~ 600 м. Схема эксперимента приведена на рис.3. Излучение одномодового $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ -лазера с пассивной модуляцией добротности после двух каскадов усиления проходило через имитатор мишени, который представлял собой диафрагму диаметром ~ 1 см. Затем оно направлялось на плоское поворотное зеркало, расположенное на расстоянии ~ 300 м от мишени, и далее, после отражения от плоского зеркала, попадало в апертуру ОВФ-зеркала, которое состояло из линзы диаметром 50 см; в фокусе линзы находилась

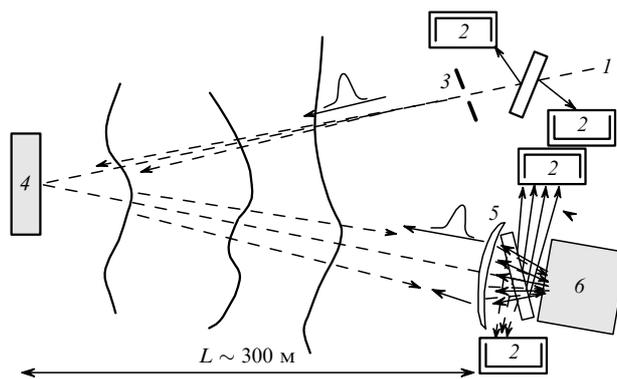


Рис.3. Схема эксперимента: 1 – одномодовый лазерный пучок, 2 – калориметры; 3 – имитатор мишени; 4 – плоское зеркало 50×50 см; 5 – линза диаметром 50 см; 6 – ВРМБ-кювета.

ВРМБ-кювета, заполненная четыреххлористым титаном. Первоначально производилась балансировка калориметров, определялся коэффициент пропускания трассы и т.д. При работе с полной апертурой практически $90\% \pm 5\%$ энергии, идущей от ВРМБ-зеркала, проходило через диафрагму-имитатор. В зависимости от погодных условий размер пучка накачки на апертуре ОВФ-зеркала изменялся от 10 до 35 см.

Для внесения апертурных потерь использовались кольцевые диафрагмы, которые помещались непосредственно перед фокусирующей линзой. При этом калориметры, установленные в прямом направлении, измеряли величину апертурных потерь, а в обратном – качество попадания на мишень. Нам не удалось исследовать весь диапазон (от 100 %-ного перехвата пучка до случая, когда перехват отсутствует) ввиду квазипорогового характера ВРМБ-зеркала и недостаточно точных калориметров. Тем не менее при уменьшении энергии накачки за счет внесения апертурных потерь в 2–3 раза процент энергии, прошедшей через имитатор мишени, изменялся достаточно слабо и составлял $80\% \pm 10\%$, что подтверждает высказанные качественные соображения.

Таким образом, в настоящей работе показано, что в достаточно широких пределах турбулентную атмосферу можно считать фазовым экраном, «прижатым» к приемной апертуре ОВФ-зеркала. Это позволяет вводить в мишень от 90 % до 80 % энергии светового поля, сформированного ОВФ-зеркалом.

1. Аникеев И.Ю., Гордеев А.А., Зубарев И.Г., Михайлов С.И. *Письма в ЖЭТФ*, **46** (9), 351 (1987).
2. Устинов Н.Д., Матвеев И.Н., Протопопов В.В. *Методы обработки оптических полей в лазерной локации* (М., Наука, 1983).