

В.А. Банах, В.В. Карасев, Ю.А. Коняев, В.М. Сазанович, Р.Ш. Цвык

ДЕФОКУСИРОВКА ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА В УСЛОВИЯХ ТЕПЛООВОГО САМОВОЗДЕЙСТВИЯ

Приводятся результаты экспериментальных исследований влияния тепловой нелинейности на дефокусировку лазерного пучка. Анализируется влияние атмосферной трассы и участка между источником и оптической системой на дефокусировку.

При распространении оптического излучения достаточно большой мощности энергия, поглощенная атмосферными газами и аэрозольными частицами, вызывает изменение свойств среды и, как следствие, приводит к изменению параметров самого воздействующего излучения, а также зондирующих пучков, распространяющихся в канале мощного излучения. Механизмы такого взаимодействия весьма разнообразны и определяются многими факторами. К основным из них можно отнести следующие: полную энергию, плотность мощности и длительность излучения; режимы генерации (импульсный, непрерывный, частотно-импульсный); геометрическую форму пучка (размеры, степень фокусировки, распределение интенсивности по сечению и др.); условия распространения (коэффициенты молекулярного и аэрозольного поглощения, скорость и направление ветра, однородность трассы, турбулентные условия) и ряд других факторов. Вопросам распространения излучения в условиях самовоздействия уделяется достаточно много внимания как в экспериментальных, так и теоретических исследованиях [1–3].

Самым низкопороговым механизмом взаимодействия излучения и атмосферы, с точки зрения энергетики, является тепловое самовоздействие, определяющееся переходом поглощенной энергии в тепло и изменением показателя преломления среды. Точных решений, учитывающих всю совокупность взаимодействия излучения и реальной атмосферы, не найдено. Поэтому экспериментальные исследования, особенно в условиях реальной атмосферы, приобретают важное значение и представляют интерес для разработчиков систем адаптивной оптики.

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований дефокусировки лазерного излучения, распространяющегося в атмосфере в условиях, когда основным механизмом взаимодействия была тепловая нелинейность. Известно, что одним из основных факторов, определяющих влияние тепловой нелинейности на параметры лазерного пучка, являются условия выноса тепла из теплового канала, создаваемого излучением [1–3]. Поэтому при анализе результатов исследований, в соответствии со спецификой условий распространения, трасса была разбита на два участка: участок между источником излучения и оптической системой – участок покоя, и другой участок – атмосферная трасса.

Участок покоя характеризуется малой длиной, относительно высокой плотностью энергии, постоянной геометрией пучка (малой расходимостью, стабильностью размера) и – в большинстве случаев – отсутствием или очень малыми скоростями выноса тепла из канала естественным движением воздуха. Второй участок имеет большую протяженность над относительно ровной поверхностью земли, меньшую плотность энергии, изменяемую геометрию (фокусировку) пучка, достаточно большую скорость выноса тепла из канала за счет перпендикулярной составляющей скорости ветра. Анализ учета влияния этих участков на дефокусировку излучения и представлен в данной статье. При проведении исследований измерялись следующие параметры: метеорологические условия (температура, скорость и направление ветра, относительная влажность воздуха, давление), мощность излучения на выходе источника, распределение энергии на конце атмосферной трассы.

Для расчета коэффициентов поглощения излучения α_n по измеренным значениям температуры – t , °С, влажности – U , % и давления – P , для средней концентрации углекислого газа (0,033 %) использовались известные соотношения [4, 5]

$$\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 1,76 \cdot 10^{-3} e (1 + 1,78 \cdot 10^{-3} P) + 0,42 \cdot 10^{-6} e \exp [2273/(273 + t)];$$

$$e = 13,25 U/(273 + t) \exp [17,58/(241,9 + t)];$$

$$\alpha_{\text{CO}_2} = 386 (273 + t)^{-1,5} \exp \{2232 [1/296 - 1/(273 + t)]\};$$

$$\alpha_{\text{n}} = \alpha_{\text{H}_2\text{O}} + \alpha_{\text{CO}_2}, \quad (1)$$

где e – абсолютная влажность воздуха; $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ и α_{CO_2} – коэффициенты поглощения излучения водяным паром и углекислым газом.

Влияние температуры на тепловую дефокусировку будем описывать обобщенным параметром нелинейности N_c^0 , учитывающим условия распространения и параметры пучка [1]:

$$N_c = (dn/dt) (\alpha_{\text{n}} P_0 L^2 / \rho C_p V_{\perp} a^3) f(a) = N_c f(a), \quad (2)$$

где dn/dt – температурный градиент показателя преломления воздуха; ρ , C_p – плотность и теплоемкость воздуха; V_{\perp} – перпендикулярная составляющая скорости ветра; a – радиус пучка; P_0 – мощность излучения; $f(a)$ – функция, учитывающая геометрическую форму пучка излучения; L – длина трассы.

На начальном участке трассы (участке покоя) вынос тепла из канала в установившемся режиме определяется скоростью конвекции V_k , возникающей за счет нагрева воздуха поглощенным излучением и определяемой из соотношения [1]

$$V_k = (2\alpha_{\text{n}} g P_0 / \rho C_p T)^{1/3}, \quad (3)$$

где g – ускорение силы тяжести; T – температура среды.

Тогда параметр нелинейности на участке покоя равен

$$N_c^{\text{n}} = A1 (\alpha_{\text{n}} P_0)^{2/3}, \quad (4)$$

на атмосферном участке трассы параметр N_c определяется из соотношения [1]

$$N_c^{\text{k}} = N_c^0 F [2 F/(F - 1)] \{1 - [\ln(F)/(F - 1)]\} = A2 (\alpha_{\text{n}} P_0/V), \quad (5)$$

где $F = a1/af$, $a1$, af – радиусы пучка в начале и в конце трассы при $t = 0$; $A1$, $A2$ – постоянные коэффициенты для данной геометрии пучка.

Систематизация результатов исследований проводилась по двум параметрам пучка: изменению относительной плотности энергии в максимуме и относительному изменению радиуса пучка в конце измерительной трассы.

Так как в настоящее время не существует методов определения параметра нелинейности для трасс, состоящих из участков с различными условиями распространения, для анализа результатов мы использовали значение параметра нелинейности для всей трассы равное сумме значений этих параметров по отдельным участкам – $N_c = N_c^{\text{n}} + N_c^{\text{k}}$.

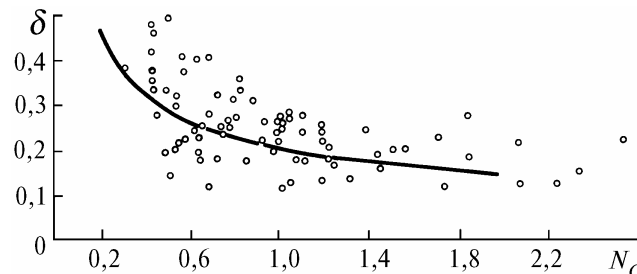


Рис. 1. Зависимость относительной плотности энергии в максимуме δ от обобщенного параметра нелинейности N_c

На рис. 1 представлена зависимость относительной плотности энергии от параметра нелинейности N_c . При расчете величины $\delta = E_m/(k E_0)$ где (E_m – плотность энергии в максимуме,

E_0 – общая энергия на выходе источника) введен коэффициент k , учитывающий ослабление излучения атмосферой и потери на оптических элементах. Сплошной кривой на рисунке приведена зависимость $\delta = 0,22 N_c^{-0,36}$, рассчитанная методом наименьших квадратов. Коэффициент корреляции $R = 0,35$.

Анализ результатов исследований показывает, что несмотря на большой разброс экспериментальных данных наблюдается явно выраженная тенденция уменьшения плотности энергии более чем в 2 раза при изменении параметра нелинейности N_c от 0,4 до 2,0. Большой разброс данных, выходящий за пределы ошибок эксперимента при значениях $N_c < 1$, когда вклады атмосферного участка и участка покоя сравнимы, указывает на то, что простое арифметическое сложение параметров N_c^a и N_c^k не совсем корректно для описания всей трассы и каждый из участков необходимо учитывать со своим весом.

При анализе результатов исследований дефокусировки пучка излучения все данные были разбиты на две группы по условиям распространения на атмосферном участке трассы. Этим условием является величина перпендикулярной составляющей скорости ветра. К первой группе отнесены данные при перпендикулярной составляющей скорости ветра $U_{\perp} > 1$ м/с (рис. 2), ко второй группе – $U_{\perp} \approx 0$ (рис. 3). По вертикальной оси отложены значения радиуса пучка, нормированные на средний по измерениям радиус пучка в конце измерительной трассы в момент включения источника. По горизонтальной оси на рис. 2 отложено время t , нормированное на время выноса тепла из канала $\tau = 2 a / U_{\perp}$, на рис. 3 – время t . Сплошные кривые проведены по средним значениям размеров пучка.

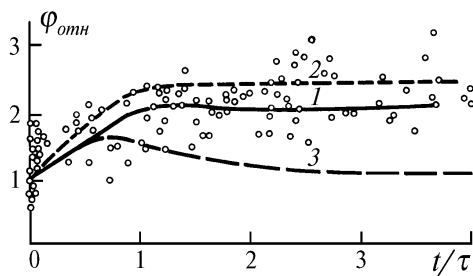


Рис. 2. Изменение относительного размера пучка $\varphi_{\text{отн}} = a(t)/a(0)$ от времени t , нормированного на $\tau = 2a/V$, при $V_{\perp} > 1$ м/с. Кривая 1 проведена по средним значениям $\varphi_{\text{отн}}$, кривые 2, 3 – расчетные для относительных флуктуаций скорости ветра: $\sigma_V/V=0$ – кривая 2, $\sigma_V/V=0,2$ – кривая 3

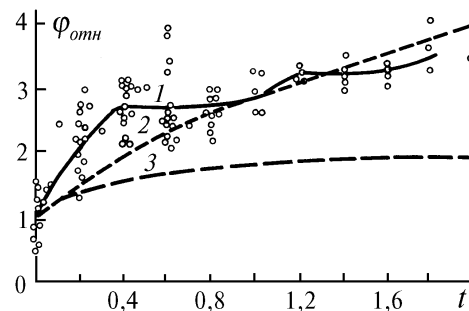


Рис. 3. Изменение относительного размера пучка $\varphi_{\text{отн}} = a(t)/a(0)$ от времени t при $V \approx 0$. Кривая 1 проведена по средним значениям $\varphi_{\text{отн}}$, кривые 2, 3 – расчетные для относительных флуктуаций скорости ветра: $\sigma_V/V=0$ – кривая 2, $\sigma_V/V=0,2$ – кривая 3

Анализ и оценки, выполненные по результатам, приведенным на рис. 2 ($U_{\perp} > 1$), позволяют сделать следующие выводы:

- изменения среднего значения и среднеквадратического отклонения радиуса пучка a при $t = 0$ определяются влиянием турбулентности и точностью настройки оптической системы;
- время установления процесса дефокусировки определяется перпендикулярной составляющей скорости ветра и близко к $\tau = 2 a / U_{\perp}$;

– изменение радиуса пучка на нестационарном участке ($t/\tau < 1$) аппроксимируется линейной функцией вида $\varphi_{\text{отн}} = 1 + 1,2 t/\tau$ с коэффициентом корреляции $R = 0,65$;

– размер пучка в установившемся режиме ($t/\tau > 1$) в основном определяется влиянием участка покоя. Корреляция размера пучка с величиной параметра нелинейности на атмосферном участке и суммарным значением N_c значительно меньше, чем с N_c^a .

Анализ и оценки, выполненные по результатам, приведенным на рис. 3 ($V_{\perp} \approx 0$), позволяют сделать следующие выводы:

- дефокусировка пучка в 1,5 – 2 раза больше, чем при наличии перпендикулярной составляющей скорости ветра;

– при временах $t < 0,6$ дефокусировка пучка не аппроксимируется линейной функцией.

Известно [5], что на дефокусировку пучка тепловой нелинейностью существенное влияние оказывают флуктуации скорости и направления ветра по трассе распространения. Приведенные на рис. 2, 3 штриховые линии рассчитаны в безаберрационном приближении при следующих условиях: относительные флуктуации скорости ветра $\sigma_V/V=0$ (кривая 2); $\sigma_V/V=0,2$ (кривая 3) (σ_V – среднее квадратическое отклонение скорости ветра, V – средняя скорость ветра); флуктуации показателя преломления не учитывались ($C_n^2 = 0$), так как их вклад в дефокусировку мал по сравнению с вкладом нелинейности. Параметр нелинейности $N_c = 2,2$.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных качественно подтверждает выводы теории о влиянии характерных временных масштабов флуктуаций скорости ветра на время установления стационарного режима тепловой дефокусировки. При малых или продольных по трассе скоростях ветра (рис. 3) это совпадение менее удовлетворительно. По-видимому, это связано с тем, что в расчетах не учитывалось влияние участка покоя, на котором время установления сравнимо или меньше, чем на атмосферном участке трассы.

Таким образом, на основании представленных результатов сделаем следующие выводы:

– параметр N_c можно применять для оценки дефокусировки пучка и максимальной интенсивности в реальной атмосфере;

– участок трассы между источником излучения и оптической системой, формирующей пучок излучения, вносит существенный вклад в дефокусировку пучка при относительно малом тепловом самовоздействии на атмосферной трассе, что необходимо учитывать в адаптивных системах, в которых управление пучком осуществляется на выходе оптической системы;

– качественное подтверждение влияния флуктуаций скорости ветра на необходимость постановки целенаправленных экспериментов по уточнению этого положения.

1. Смит Д. К. // ТИИЭР. 1977. Т. 65. №12. С. 59–103.

2. Зуев В. Е., Землянов А. А., Копытин Ю. Д. Нелинейная оптика атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 256 с.

3. Воробьев В. В. Тепловое самовоздействие лазерного излучения в атмосфере. М.: Наука, 1987. 200 с.

4. Арефьев В. Н., Дианов-Клоков В. И. // Квантовая электроника. 1976. Т. 3. №4. С. 923–924.

5. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере. М.: Сов. радио, 1977. 358 с.

Институт оптики атмосферы
СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию
27 сентября 1993 г.

V. A. Banakh, V. V. Karasev, Yu. A. Konyaev, V. M. Sazanovich, R. Sh. Tsvyk.
Defocusing of a Laser Beam under Conditions of Thermal Blooming.

In this paper we discuss some results of experimental studies of the influence of a thermal nonlinearity on the laser beam defocusing. The influence of an atmospheric path and of the atmospheric volume between the laser source and the optical system on the defocusing is also analyzed.