КОНФЕРЕНЦИЯ В

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

ДИСПЕРСИОННОЕ РАСПЛЫВАНИЕ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА В СМЕСИ СУХОЙ ВОЗДУХ – ПАРЫ ВОДЫ

[1,2]Бабушкин П.А., [1]Бурнашов А.В., [1]Иглакова А.Н., [1]Матвиенко Г.Г., [1]Ошлаков В.К.
[1]*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия*
[2]*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*
bpa@iao.ru, bvaleksey@iao.ru, ian@iao.ru, matvienko@iao.ru, ovk@iao.ru

Аннотация: В докладе представлены результаты измерения длительности фемтосекундного лазерного импульса распространяющегося в смеси сухого воздуха и паров воды (атмосфере) на сто метровой атмосферной трассе. Также в докладе обсуждается модель учета влажности и показателя преломления многокомпонентной среды для оценки дисперсионного расплывания ультракороткого импульса в атмосфере.

Распространение фемтосекундного импульса в диспергирующей среде, такой как атмосфера, сопровождается изменением его длительности из-за дисперсии групповой скорости. Для фемтосекундного лазерного излучения такое изменение становится заметным уже на первых десятках метров [1, 2, 3].

В задаче зондирования фемтосекундным лазерным излучением это приводит к неопределенности положения нелинейного фокуса – точки начала генерации излучения суперконтинуума (СК) на трассе зондирования, продолжительности свечения СК [4] и, как следствие, эффективного объема зондирования.

Дисперсия групповой скорости описывается вторым членом в разложении волнового числа

$$k(\omega) = k(\omega_0) + k_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}k_2(\omega - \omega_0)^2, \quad (1)$$

где k – волновое число;

k_1 – величина обратная групповой скорости;

k_2 – коэффициент дисперсии групповой скорости $k_2 = \frac{\lambda_0^3}{2\pi c^2}\left(\frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2}\right)_{\lambda_0}$ [5, 6].

В условиях нормальной дисперсии, когда $k_2 > 0$ импульс стремиться растянуться, а для $k_2 < 0$ – сжаться. Это объясняется тем, что различные спектральные компоненты импульса при распространении через среду приобретают разные фазовые набеги.

Для спектрально-ограниченного импульса с огибающей вида $A(t) = A_0 exp\left(-\frac{t^2}{2\tau_0^2}\right) exp\left(-\frac{i\gamma t^2}{2}\right)$, когда отсутствует начальная фазовая модуляция ($\gamma = 0$), в среде с $k_2 > 0$, расстояние на котором длительность импульса увеличится в $\sqrt{2}$ раз, определяется по формуле

$$L_{\text{др}} = \frac{\tau_0^2}{2|k_2|} \quad (2)$$

где τ_0 - начальная длительность импульса;

k_2 – коэффициент дисперсии групповой скорости [5, 6].

В формулу $k_2 = \frac{\lambda_0^3}{2\pi c^2}\left(\frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2}\right)_{\lambda_0}$ входит вторая производная по показателю преломления. Рассматривая атмосферу, как двухкомпонентную среду, представим зависимость показателя преломления моделью составного сигнала в виде

$$n_{\text{смеси}} = m n_{\text{пары воды}} + (1-m) n_{\text{воздух}} = m\left(n_{\text{пары воды}} - n_{\text{воздух}}\right) + n_{\text{воздух}}, \quad (3)$$

где m – весовой коэффициент, характеризующий наличие примеси;

$n_{\text{пары воды}}$ – показатель преломления примеси;

$n_{\text{воздух}}$ – показатель преломления чистого воздуха.

Соответствующие показатели преломления аппроксимированы формулой Коши вида

$$n(\lambda) = A\left(1 + \frac{B}{\lambda^2}\right) + 1, \quad (4)$$

где A и B – коэффициенты соответствующие показателю преломления вещества [7].

Оценки дисперсионной длины для длительности импульса $\tau_0 = 50$ фс и центральной длины волны λ = 800 нм дают значения для: сухого воздуха – 56 м, паров воды – 43 м, а для атмосферы с относительной влажностью 44 % - 50м.

На рисунке 1 представлена схема проведения эксперимента измерения длительности фемтосекундного импульса в смеси воздуха и паров воды. Эксперимент проведен для спектрально-ограниченного импульса с начальной длительностью $\tau_0 = 49{,}3 \pm 0{,}5$ фс и центральной длиной волны λ = 798,5 ± 0,2 нм с шириной импульса по полувысоте FWHM = 18,9 ± 0,4 нм. Частота следования импульсов f = 86 МГц, средняя мощность P = 300 мВт.

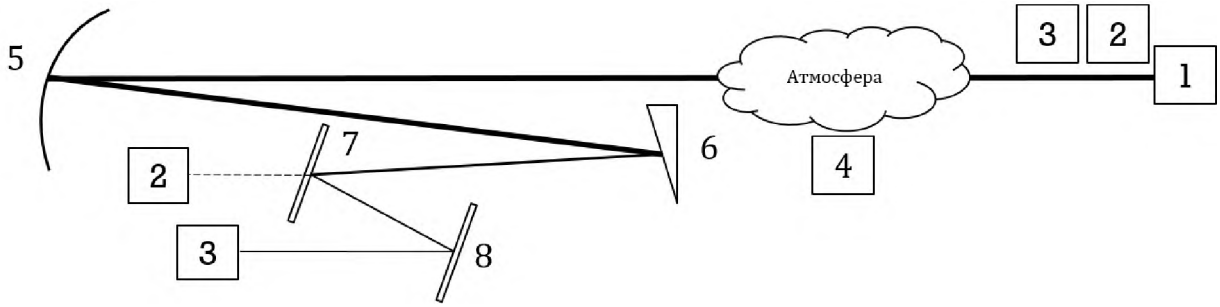

Рисунок 1 – Схема измерения длительности в эксперименте с атмосферой: 1 – лазер Ti:Sapphire Tif-50; 2 – автокоррелятор AA-10D; 3 – спектрометр Ocean Optics HR 4000; 4 – психрометрический гигрометр ВИТ-1; 5 – диэлектрическое фокусирующее зеркало с f=1.5 м; 6 – клин; 7, 8 – стекло

Дополнительное оборудование - измеритель мощности Ophir Nova II, цифровой осциллограф Tektronix MDO 3034, ноутбук.

Небольшая энергия импульса исключает проявление пространственных нелинейных эффектов - самофокусировки, филаментации - и позволяет проконтролировать изменение только временной характеристики. Для λ = 798,5 ± 0,2 нм с FWHM = 18,9 ± 0,4 нм линий поглощения парами воды нет [8, 9]. Результаты измерений длительности по трассе представлены на рисунке 2.

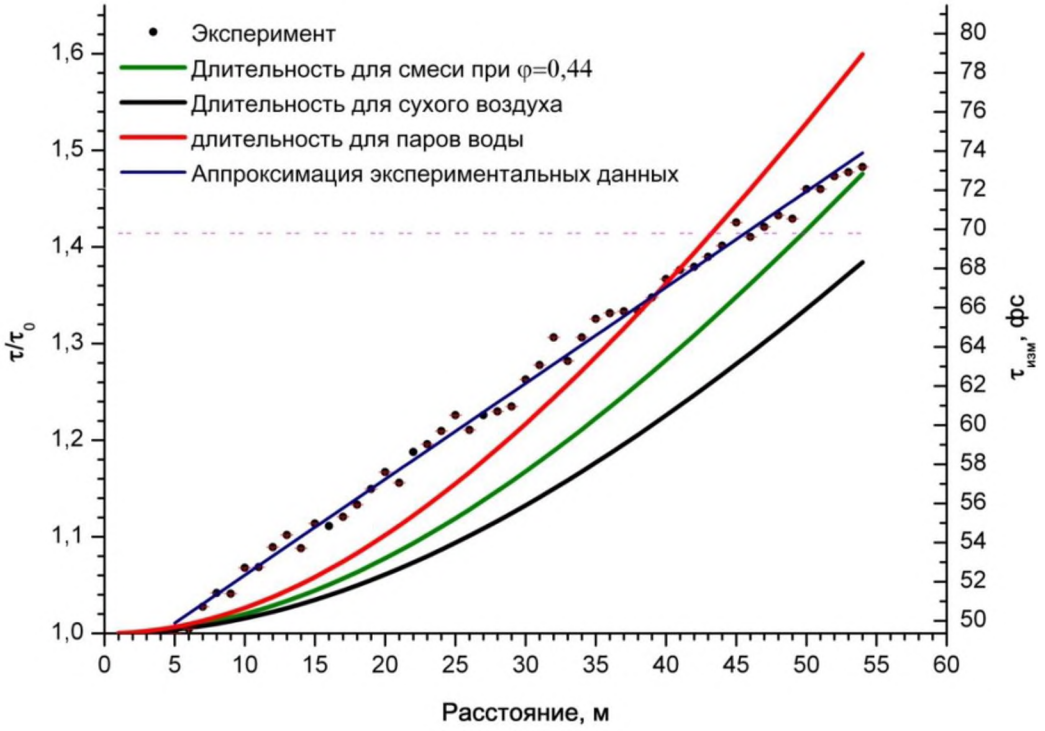

Рисунок 2 – Результаты эксперимента на атмосферной трассе

В ходе проведения эксперимента значения относительной влажности изменялись от 40 до 48 %. Для оценки длительности в смеси было взято среднее значение относительной влажности 44,2 ± 1,9 % с коэффициентом вариации $C_v = 4{,}3$ %.

Из результатов эксперимента можно видеть, что длительность импульса достигает значения $\tau_0\sqrt{2}$ на расстоянии 46 м, в то время как теоретическая кривая для смеси с $\varphi = 44$ % пересекает это значение на расстоянии 50 м. Экспериментальные данные аппроксимированны прямой вида $\tau(x) = 47{,}43313 + 0{,}49018x$ с среднеквадратичным отклонением 0,493732.

Измеренные значения длительности импульса не ложатся на теоретические кривые, рассчитанные для гауссова пучка. С одной стороны, такое поведение пучка может быть объяснено модуляцией огибающей импульса в процессе распространения через диспергирующую среду.

С другой стороны, такое поведение длительности можно объяснить, если принять, что огибающая импульса описывается не гауссовой формой распределения. В работе [10] авторами смоделировано изменение длительности пикосекундного импульса для разных форм огибающей (гаусс и секанс) в атмосфере без учета влажности. Полученные авторами [10] данные сильно похожи на результаты, полученные авторами данной статьи.

В дальнейшем планируется поставить эксперимент с учетом переменной огибающей импульса с начальной фазовой модуляцией в смеси компонент с различными показателями преломления.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 19-32-90188.

1. *Babushkin P.A., Burnashov A.V., Oshlakov V.K., Et al.* Experimental study of the characteristics of the propagation of femtosecond radiation. Results of the dispersion spreading. Proc. SPIE 10614, International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers XIII, 1061429 (16 April 2018); doi: 10.1117/12.2305321

2. *Babushkin P. A., Burnashov A. V., Iglakova A. N. Et al.* Research of impact of the dispersion effect of the atmosphere on the duration of the femtosecond laser pulse // Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1120824 (18 December 2019); https://doi.org/10.1117/12.2540747

3. *Babushkin P. A., Burnashov A. V., Iglakova A. N. Et al.* Measurement of the duration of a femtosecond laser pulse during propagation in the atmosphere // Proc. SPIE 11322, XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications, 1132204 (11 December 2019); https://doi.org/10.1117/12.2548435

4. *Nishioka H., Odajima W., Ueda K., Et al.* Ultrabroadband flat continuum generation in multichannel propagation of terrawatt Ti:sapphire laser pulses // OPTICS LETTERS. 1995. Vol. 20, No. 24. P. 2505-2507.

5. *Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П.* Теория волн. М.: «Наука» Гл. ред. физ. - мат. лит., 1979. - 384 с.

6. *Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С.* Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: «Наука». Гл. ред. физ. - мат. лит., 1988. - 312 с.

7. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. Изд. 2-е. Перевод с английского //М.: «Наука» Гл. ред. физ. - мат. лит., 1973. - 723 с.

8. *URL: http://spectra.iao.ru*

9. *Мануйлович Е.С., Астапенко В.А., Головинский П.А.* Распространение ультракоротких лазерных импульсов в сухом и влажном воздухе // Оптика атмосферы и океана. Распространение оптических волн. 2015. Т. 28. № 2. С. 105 - 112.

10. *Yap, D. F., Wong, Y. C., Koh, S. P. Et al.* Effects of second order dispersion in free space optical communication // J. Appl. Sci. 2010. V. 10 N. 7. P. 595-598.