

Формирование О-образной структуры в красном крыле частотно-углового спектра при филаментации на протяженной атмосферной трассе

Д. В. Пушкарев^{+*1)}, Л. В. Селезнев⁺, Г. Э. Ризаев⁺, Д. С. Урюпина^{*}, Н. А. Жидовцев^{*}, О. Г. Косарева⁺⁺,
А. Б. Савельев^{++*}

⁺Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

^{*}Физический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 21 марта 2024 г.

После переработки 21 марта 2024 г.

Принята к публикации 22 марта 2024 г.

Экспериментально наблюдалась О-образная структура на длинах волн 930–960 нм в частотно-угловом спектре суперконтинуума, сгенерированного при филаментации фемтосекундного лазерного импульса с центральной длиной волны 740 нм на 75-метровой трассе в воздухе. Появление данной особенности частотно-углового спектра обусловлено наличием полосы поглощения водяных паров в диапазоне 930–960 нм и связанной с этим поглощением области аномальной дисперсии. Данный результат открывает перспективы для удаленного одноимпульсного детектирования примесей, содержащихся в воздухе.

DOI: 10.31857/S1234567824080044, EDN: KMBAQC

1. Введение. Филаментация фемтосекундного лазерного излучения в воздухе сопровождается формированием широкополосного когерентного излучения – суперконтинуума [1, 2]. При филаментации импульсов в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне он простирается от ультрафиолетового до среднего ИК [3, 4]. Столь широкий спектр и возможность его удаленного получения на заданном расстоянии от источника открывают перспективы применения фемтосекундных филаментов в задачах дистанционного зондирования [5]. В связи с этим важную роль приобретает исследование частотно-угловой структуры излучения, создаваемого при филаментации на протяженной атмосферной трассе, и эволюция этой структуры в процессе распространения.

К настоящему моменту экспериментально и в численном моделировании исследованы основные черты этой эволюции. Показано, что на оси пучка после филаментации в красном крыле спектра формируется последовательность максимумов, появление которых вызвано самомодуляцией на мгновенном и задержанном отклике среды [6, 7]. По мере распространения импульса данные максимумы испытывают сдвиг в сторону больших длин волн [8, 9], причем в коллимированной геометрии преобразование красного крыла спектра с увеличением сдвига

максимумов в ИК продолжается вплоть до расстояний порядка двух десятков метров за область плазмы [10]. В синем крыле спектра излучение суперконтинуума представлено как приосевой компонентой, так и компонентами, распространяющимися под углом к оси филамента, образующими коническую эмиссию [7, 11]. Зависимость углового распределения излучения суперконтинуума, формируемого при филаментации, от длины волны, обуславливает необходимость совместного исследования спектральных и угловых его характеристик.

Для этой цели была разработана методика измерения частотно-угловых спектров излучения после филаментации [12]. Частотно-угловой $((\theta, \omega)$ или (θ, λ)) спектр представляет собой двумерное распределение интенсивности, на котором по одной из осей отложена частота ω (либо длина волны λ) излучения, а по другой – угол θ к оси пучка, под которым эта частота (длина волны) распространяется. Данный метод представляет собой мощное средство для анализа процессов, происходящих при филаментации, так как объединяет спектральные и пространственные характеристики излучения в одном измерении. Частотно-угловые спектры содержат косвенную информацию о временной структуре импульса при филаментации [12], а также – о дисперсионных свойствах среды, в которой распространяется импульс [13–15]. Так, при нормальной дисперсии среды

¹⁾e-mail: d-push@yandex.ru

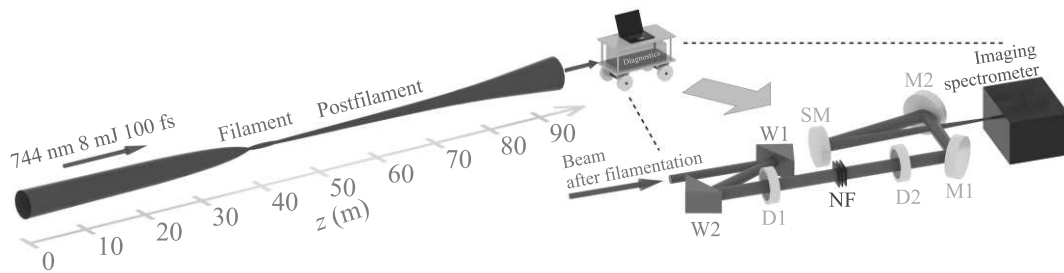


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема эксперимента: W1 и W2 – кварцевые клины; D1, D2 – юстировочные диафрагмы; NF – нейтральные светофильтры; M1, M2 – плоские зеркала с алюминиевым напылением; SM – сферическое зеркало с алюминиевым напылением

частотно-угловой спектр приобретает форму буквы X, а при аномальной дисперсии – буквы O [13, 14]. Переход между этими двумя характерными формами при изменении центральной длины волны лазерного импульса был экспериментально продемонстрирован в конденсированных средах [14, 16]. В экспериментах, проводимых в воздухе, наблюдалась X-образная форма частотно-углового спектра [4, 17–20] (в некоторых случаях – с отсутствующими “ветвями” в красном крыле, что характерно для дисперсии, близкой к нулевой [16]).

В недавней работе [21] в численном счете была показана возможность плавного переход от X-образной формы частотно-углового спектра к его O-образной форме при фиксированной центральной длине волны лазерного импульса за счет изменения состава газовой смеси, в которой происходит филаментация. Расчет выполнен для смеси азота под давлением 40 бар и водяного пара под давлением до 0.36 бар при температуре 85 °C для центральной длины волны лазерного импульса 1.3 мкм. Появление области отрицательной дисперсии, необходимой для формирования O-образной структуры частотно-углового спектра, обусловлено наличием полосы поглощения паров воды в районе 1.3 мкм.

В настоящем исследовании мы впервые экспериментально зарегистрировали формирование O-образной структуры в частотно-угловом спектре импульса после филаментации в атмосферном воздухе на протяженной трассе. При этом, в отличие от условий, предложенных в работе [21], нами не применялась никакая специальная модификация среды для наблюдения этой структуры. Длина волны лазерного источника также не подбиралась для попадания в полосу поглощения: спектральные компоненты в районе этой полосы генерировались в процессе филаментации. Диапазон длин волн 930–960 нм, в котором наблюдалась O-образная структура частотно-углового спектра, соответствует на 2 порядка более слабому поглощению паров воды по сравнению с полосой по-

глощения на 1.3 мкм. Совокупность этих факторов делает полученный результат интересным не только с фундаментальной точки зрения, но и в контексте задач диагностики примесей, содержащихся в атмосфере.

2. Схема эксперимента. Схематичное изображение эксперимента представлено на рис. 1. Излучение лазерной системы на титан-сапфире, генерирующей импульсы с центральной длиной волны 744 нм, энергией 8.5 мДж, длительностью 100 фс с частотой повторения 10 Гц, выводилось на протяженную трассу в коридоре. Диаметр пучка составлял 8 мм по уровню $1/e$. Длина трассы, на которой можно было проводить измерения, достигала 95 м. Филамент формировался на расстоянии ≤ 40 м от выхода из лазерной системы, после чего на дистанции еще около 40 м диаметр центрального пятна, сформированного в филаменте, слабо изменялся по мере распространения, что характерно для режима постфиламентации [22] (см. также статьи [10, 20], в которых подробно рассматривалась эволюция постфиламентационного канала в близких экспериментальных условиях).

Для измерения (θ, λ) -спектров был собран передвижной экспериментальный стенд, позволяющий осуществлять их одноимпульсную регистрацию в спектральном окне шириной 250 нм. Перестраивая спектрометр по длине волны с помощью поворота решетки, мы зарегистрировали частотно-угловые спектры в диапазоне от 650 до 1020 нм (в нескольких импульсах). Чтобы исключить влияние хроматических aberrаций при перестройке в столь широком спектральном диапазоне, для формирования углового спектра в плоскости входной щели спектрометра мы применили сферическое зеркало SM с алюминиевым напылением (вместо обычно используемой для этой цели линзы). Нелинейное распространение импульса прерывалось с помощью кварцевого клина W1. Затем энергия импульса дополнительно уменьшалась с помощью кварцевого клина W2.

С помощью этих клиньев и пары юстировочных диафрагм D1 и D2 обеспечивалось постоянство угла ввода излучения в спектрометр при перемещении экспериментального стенда вдоль трассы. Калиброванные нейтральные светофильтры NF использовались для дополнительного ослабления. Пара зеркал M1 и M2 позволяла минимизировать угол падения излучения на сферическое зеркало SM и, соответственно, вносимый астигматизм. Для регистрации спектров применялся изображающий спектрометр Solar M150i-III с ПЗС TheImagingSource DMK 33GX249. При обработке спектров учитывались квантовый выход ПЗС в зависимости от длины волны, кривая отражения дифракционной решетки спектрометра и кривые пропускания калиброванных нейтральных светофильтров.

3. Результаты эксперимента. На рисунке 2 представлены полученные в эксперименте (θ, λ) -спектры исходного импульса (рис. 2a), импульса сразу после филамента (40 м от лазерной системы, рис. 2b) и на расстоянии 75 м от лазерной системы (рис. 2c).

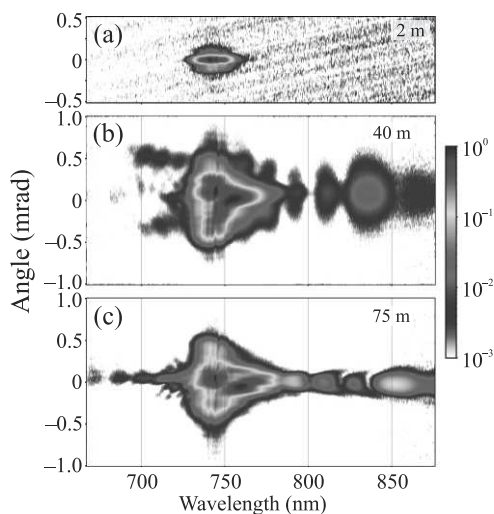


Рис. 2. (Цветной онлайн) (θ, λ) -спектры импульса: (a) – на выходе из лазерной системы; (b) – на расстоянии 40 м от лазерной системы (~ 5 м за филаментом); (c) – на расстоянии 75 м от лазерной системы (~ 40 м за филаментом). Каждый из спектров нормирован на свой максимум

Если исходный лазерный импульс был коллимирован (расходимость около 0.1 мрад) и имел относительно небольшую ширину спектра (порядка 10 нм по полувысоте), то уже на расстоянии 40 м от лазерной системы его спектральные и угловые характеристики радикальным образом меняются. Формируется коническая эмиссия в антистоксовой обла-

сти с расходимостью порядка 0.5 мрад относительно оси. Коническая эмиссия может служить указанием на появление плазмы (см. [11]). В стоксовом крыле спектра возникает последовательность локальных максимумов на оси, протянувшаяся далее 850 нм. (θ, λ) -спектр на этом расстоянии уже обладает всеми характерными чертами, возникающими при филаментации фемтосекундного лазерного импульса в воздухе.

На расстоянии 75 м интенсивность всех локальных максимумов в ИК-области увеличивается, их угловая ширина несколько уменьшается вследствие формирования постфиламента, а наиболее выраженный из них смещается на длину волны, превышающую 850 нм (рис. 2b).

Коническая эмиссия в стоксовой части спектра перестает регистрироваться, так как выходит за пределы апертур оптических элементов, используемых для ввода излучения в спектрометр.

В целом, измеренные (θ, λ) -спектры находятся в хорошем согласии с полученными ранее данными для случая филаментации в воздухе [17, 18, 20] и имеют X-форму, соответствующую нормальной дисперсии воздуха в этом спектральном диапазоне.

Рассмотрим теперь частотно-угловую структуру более длинноволновой части спектра на 780–1010 нм (см. рис. 3). Для ее измерения мы повернули решетку спектрометра таким образом, чтобы интенсивное излучение на центральной длине волны не попадало на ПЗС, что позволило регистрировать менее интенсивные спектральные компоненты.

Локальные максимумы в длинноволновой области (θ, λ) -спектра, зарегистрированные практически сразу после их появления на расстоянии 40 м от лазерной системы, имеют унимодальную форму (рис. 3a). Однако на расстоянии 75 м от лазерной системы форма ИК локальных максимумов меняется. В диапазоне 900–970 нм (θ, λ) -спектр имеет вид направленных друг к другу ветвей с минимумом интенсивности в районе 950 нм, т.е. предстает собой O-форму спектра с провалом интенсивности вблизи 950 нм (рис. 3b). На длинах волн меньше 900 нм такое поведение не наблюдается.

Возникновение области аномальной дисперсии вблизи 950 нм, необходимой для формирования O-образной структуры (θ, λ) -спектра, возможно при наличии вблизи этой области полосы поглощения. Единственным компонентом атмосферного воздуха, обладающим значимым поглощением вблизи 950 нм, является водяной пар. На рисунке 3c показан спектр его поглощения в диапазоне 780–1010 нм, рассчитанный на основе данных из базы HITRAN [23]. Полоса

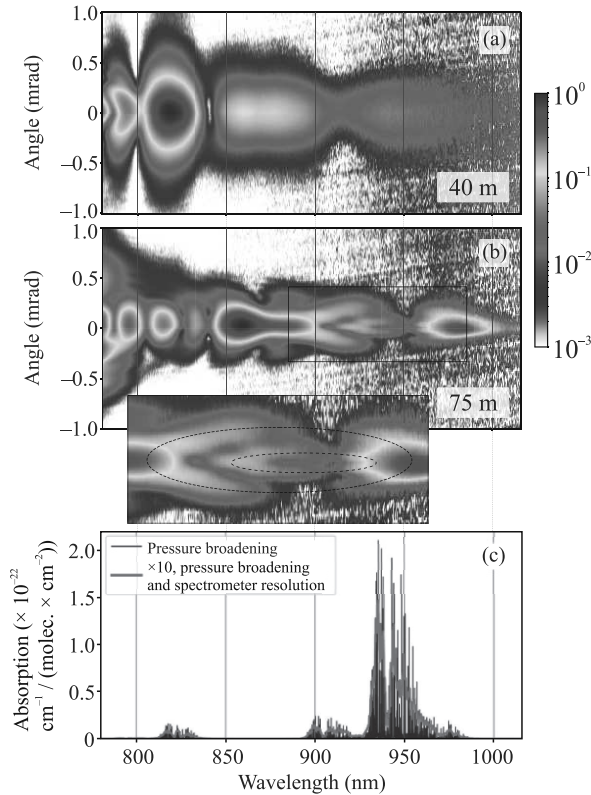


Рис. 3. (Цветной онлайн) (a), (b) – (θ, λ) -спектры стоксова крыла суперконтинуума после филаментации на расстояниях 40 и 75 м, соответственно, нормированные на свои максимумы. На вставке на рис. (b) в увеличенном масштабе показана область (θ, λ) -спектра, в которой наблюдается О-образная структура (выделена пунктиром). (c) – Спектр поглощения паров воды по данным HITRAN с учетом столкновительного уширения линий (черная кривая). Тот же спектр с учетом разрешения спектрометра (красная кривая, значения домножены на 10)

поглощения на 930–960 нм соответствует центру наблюдаемой О-образной структуры на (θ, λ) -спектре.

4. Обсуждение результатов и выводы. Таким образом, нами впервые экспериментально зарегистрирована О-образная структура (θ, λ) -спектра в канале постфиламента фемтосекундного лазерного импульса в воздухе на расстоянии более 50 м от выхода из лазерной системы. В нашем случае появление этой структуры обусловлено областью аномальной дисперсии, связанной с полосой поглощения воды в диапазоне 930–960 нм. Данный результат демонстрирует потенциальную возможность диагностировать примеси, содержащиеся в атмосферном воздухе по влиянию этих примесей на дисперсионные характеристики среды. В отличие от линий поглощения, которые может быть сложно отделить количе-

ственно от модуляций спектра в нелинейной среде, трансформация частотно-углового спектра является качественным изменением, которое легко определить на фоне такой модуляции. Измерения частотно-углового спектра не требуют точной подстройки длины волны лазера и допускают одновременную регистрацию нескольких линий/веществ в одном лазерном импульсе. Отметим, что появление в последнее десятилетие фемтосекундных лазерных систем среднего ИК-диапазона с мощностью, достаточной для формирования филаментов в воздухе [24], открывает широкие возможности для регистрации органических примесей, имеющих полосы поглощения в этом диапазоне.

Финансирование работы. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института (учреждения, организации).

Жидовцев Н. А. является стипендиатом фонда развития теоретической физики и математики “БАЗИС”.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

1. A. Couairon and A. Mysyrowicz, *Phys. Rep.* **441**(2), 47 (2007).
2. V. P. Kandidov, S. A. Shlenov, and O. G. Kosareva, *Quantum Electron.* **39**(3), 205 (2009).
3. J. Kasparian, R. Sauerbrey, D. Mondelain, S. Niedermeier, J. Yu, J.-P. Wolf, Y.-B. André, M. Franco, B. Prade, S. Tzortzakis, A. Mysyrowich, M. Rodriguez, H. Wille, and L. Wöste, *Opt. Lett.* **25**(18), 1397 (2000).
4. F. Théberge, M. Châteauneuf, V. Ross, P. Mathieu, and J. Dubois, *Opt. Lett.* **33**(21), 2515 (2008).
5. P. Qi, W. Qian, L. Guo, J. Xue, N. Zhang, Y. Wang, Z. Zhang, Z. Zhang, L. Lin, C. Sun, L. Zhu, and W. Liu, *Sensors* **22**(18), 7076 (2022).
6. A. Braun, G. Korn, X. Liu, D. Du, J. Squier, and G. Mourou, *Opt. Lett.* **20**(1), 73 (1995).
7. E. T. J. Nibbering, G. Grillon, M. A. Franco, B. S. Prade, and A. Mysyrowicz, *J. Opt. Soc. Am. B* **14**(3), 650 (1997).
8. Y. Chen, F. Théberge, C. Marceau, H. Xu, N. Aközbek, O. Kosareva, and S. L. Chin, *Appl. Phys. B* **91**, 219 (2008).
9. D. Uryupina, N. Panov, M. Kurilova, A. Mazhorova, R. Volkov, S. Gorgutsa, O. Kosareva, and A. Savel'ev, *Appl. Phys. B* **110**, 123 (2012).
10. O. Kosareva, N. Panov, D. Shipilo et al. (Collaboration), *Opt. Lett.* **46**(5), 1125 (2021).
11. O. G. Kosareva, V. P. Kandidov, A. Brodeur, C. Y. Chien, and S. L. Chin, *Opt. Lett.* **22**(17), 1332 (1997).

12. D. Faccio, P. Di Trapani, S. Minardi, A. Bramati, F. Bragheri, C. Liberale, V. Degiorgio, A. Dubietis, and A. Matijosius, *J. Opt. Soc. Am. B* **22**(4), 862 (2005).
13. M. A. Porras and P. Di Trapani, *Phys. Rev. E* **69**(6), 066606 (2004).
14. M. A. Porras, A. Dubietis, E. Kučinskas, F. Bragheri, V. Degiorgio, A. Couairon, D. Faccio, and P. Di Trapani, *Opt. Lett.* **30**(24), 3398 (2005).
15. S. V. Chekalin, E. O. Smetanina, A. I. Spirkov, V. O. Kompanets, and V. P. Kandidov, *Quantum Electron.* **44**(6), 577 (2014).
16. V. P. Kandidov, E. O. Smetanina, A. E. Dormidonov, V. O. Kompanets, and S. V. Chekalin, *JETP* **113**, 422 (2011).
17. D. Faccio, A. Averchi, A. Lotti, P. D. Trapani, A. Couairon, D. Papazoglou, and S. Tzortzakis, *Opt. Express* **16**(3), 1565 (2008).
18. D. E. Shipilo, D. V. Pushkarev, N. A. Panov, D. S. Uryupina, V. A. Andreeva, R. V. Volkov, A. V. Balakin, A. P. Shkurinov, I. Babushkin, U. Morgner, O. G. Kosareva, and A. B. Savel'ev, *Laser Phys. Lett.* **14**(3), 035401 (2017).
19. Y. E. Geints, D. V. Mokrousova, D. V. Pushkarev, G. E. Rizaev, L. V. Seleznev, I. Y. Geints, A. A. Ionin, and A. A. Zemlyanov, *Opt. Laser Technol.* **143**, 107377 (2021).
20. D. Mokrousova, D. Pushkarev, N. Panov, I. Nikolaeva, D. Shipilo, N. Zhidovtsev, G. Rizaev, D. Uryupina, A. Couairon, A. Houard, D. Skryabin, A. Savel'ev, O. Kosareva, L. Seleznev, and A. Ionin, *Photonics* **8**(10), 446 (2021).
21. N. Panov, D. Shipilo, I. Nikolaeva, V. Kompanets, S. Chekalin, and O. Kosareva, *Phys. Rev. A* **103**(2), L021501 (2021).
22. J.-F. Daigle, O. Kosareva, N. Panov, T.-J. Wang, S. Hosseini, S. Yuan, G. Roy, and S. L. Chin, *Opt. Commun.* **284**(14), 3601 (2011).
23. I. E. Gordon, L. S. Rothman, and R. J. Hargreaves et al. (Collaboration), *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* **277**, 107949 (2022).
24. A. V. Mitrofanov, A. A. Voronin, D. A. Sidorov-Biryukov, A. Pugžlys, E. A. Stepanov, G. Andriukaitis, T. Flöry, S. Ališauskas, A. B. Fedotov, A. Baltuška, *Sci. Rep.* **5**(1), 8368 (2015).