

09

Измерение поля атмосферного ветра с помощью полностью волоконного лидара с длиной волны генерации $1.5\ \mu\text{m}$

© *Xin Li*^{1–3}, *Xinyang Xu*⁴, *Zhe Zhang*³, *Junjie Liu*^{1,2}, *Xiaolei Bai*^{1,2}

¹ Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin, China

² Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin, China

³ Tianjin Jin Hang Research Institute of Technical Physics, Tianjin, China

⁴ National Key Laboratory of Electromagnetic Space Security, Tianjin, China
E-mail: lixintjuht@163.com

Поступило в Редакцию 27 февраля 2023 г.

В окончательной редакции 8 мая 2023 г.

Принято к публикации 23 мая 2023 г.

Представлена полностью волоконная лидарная система, предназначенная для измерения поля атмосферного ветра. Лидарный источник излучения включает в себя одночастотный усилитель мощности задающего генератора с полностью волоконной структурой, с длиной волны $1532\ \text{nm}$ и частотой повторения импульсов $10\ \text{kHz}$. Выходная мощность лидара составляет $427\ \mu\text{J}$, максимальная пиковая мощность $610\ \text{W}$ при длительности импульса $700\ \text{ns}$. В системе используется метод доплеровского когерентного измерения скорости ветра, при этом лидар осуществляет модуляцию промежуточной несущей частоты ($80\ \text{MHz}$). Максимальная продольная высота как дальность распространения сигнала лидарной системы при измерении поля атмосферного ветра составляет $4.5\ \text{km}$, точность измерений — порядка 10^{-2} . Лидарная система может применяться для регистрации высокоточных данных о поле ветра на большой высоте или большом расстоянии. Эта система может также играть важную роль в будущих научно-технических исследованиях окружающей среды.

Ключевые слова: волоконный лазер, лидар, когерентные доплеровские измерения, поле ветра, вертикальные измерения.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.16.55959.19536

Для волоконных лазеров характерны компактная структура, небольшой (портативный) вес, очень высокое качество пучка, стабильность и отсутствие необходимости технического обслуживания [1,2]. В условиях удаленной регистрации данных о состоянии атмосферы волоконный лазер может использоваться как лидарный источник излучения, обеспечивающий устойчивость выходного излучения лазера. Одним из основных диапазонов, в которых ведутся атмосферные измерения, является С-диапазон, а волоконные лазеры генерируют излучение, которое атмосфера хорошо пропускает в С-диапазоне [3]. Лидарная система измерения поля атмосферного ветра включает в себя полностью волоконный источник излучения, обладающий великолепными характеристиками и обеспечивающий широкомасштабные измерения данных о состоянии атмосферы. Будучи используемой для измерения и исследования скоростей атмосферного ветра, технология когерентной доплеровской регистрации скоростей ветра обеспечивает точность и разрешение достаточно высокие, чтобы добиться эффективной и надежной оценки состояния атмосферной среды [4,5]. Этот вид когерентной регистрации данных требует узкой линии лазерного излучения и большой продолжительности импульса ($> 100\ \text{ns}$), что необходимо для увеличения длины когерентности и достижения энергии детек-

тирования [6]. Для обеспечения качества атмосферных измерений с помощью лидара большое значение имеет качество лидарного источника.

Несколько лет назад группой исследователей во главе с Jia был разработан лидар для измерения скоростей ветра с длиной волны генерации $1550\ \text{nm}$, который включал в себя усилитель мощности задающего генератора (MOPA) с частотой повторения импульсов $10\ \text{kHz}$. Энергия импульсов лидара составляла $120\ \mu\text{J}$ при продолжительности импульса $400\ \text{ns}$; максимальная продольная дальность регистрации была равна $3.6\ \text{km}$, а точность определения скорости ветра составляла $0.5\ \text{m/s}$ [7]. В 2017 г. Zhou с соавторами разработали полностью волоконный эрбий-иттербиевый усилитель (EYDFA) для лидара для измерения ветра с длиной волны генерации $1550\ \text{nm}$. Энергия импульса лидара составляла $150\ \mu\text{J}$ при продолжительности импульса $200\ \text{ns}$ и горизонтальной дальности регистрации скорости ветра $< 10\ \text{km}$ [8]. В 2018 г. группой под руководством Abdelazim и Santoro была разработана система измерения скорости ветра на основе лидара с когерентной доплеровской техникой измерения; длина волны генерации системы составила $1.5\ \mu\text{m}$, частота повторения импульсов $20\ \text{kHz}$. Энергия импульса лидара была равна $14\ \mu\text{J}$ при продолжительности импульса $200\ \text{ns}$ и горизонтальной дальности ре-

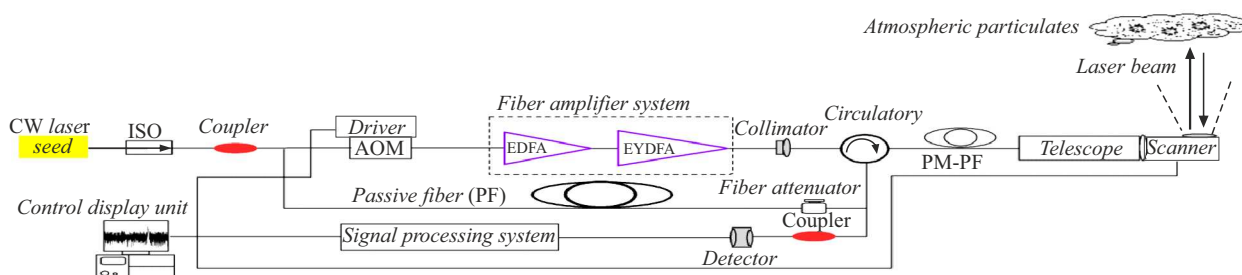


Рис. 1. Лидарная система измерения поля атмосферного ветра.

гистрации скорости ветра 3 km [9]. В 2019 г. командой Augere, Valla и др. был предложен трехмерный волоконный лидар для измерения профиля скорости ветра с длиной волны генерации 1.5 μm и частотой повторения импульсов 14 kHz. В качестве источника излучения в лидаре использовалась структура EYDFA с энергией импульса 410 μJ и продолжительностью импульса 700 ns. Для этого лидара горизонтальная дальность регистрации скорости ветра с необходимым разрешением составляла 3 km [10]. Далее, в 2021 г. группой Meng, Pedersen и др. был разработан инновационный лидар прямого детектирования (DDL) с непрерывным излучением на длине волны 775 nm, а также лидар когерентного детектирования (CDL) с непрерывным излучением и длиной волны генерации 1.5 μm . Мощность лидара была равна 300 mW, а вертикальная дальность регистрации скорости ветра равнялась 40 m [11]. Наконец, в 2022 г. исследователями Yue, Yu и др. была предложена лидарная система, состоящая из лидара дифференциального поглощения (DIAL) и когерентного доплеровского лидара для измерения скорости ветра (CDWL). В этом лидаре использовался источник излучения типа EYDFA. Энергия импульса лидара была 80 μJ при частоте повторения 5 kHz. Эта лидарная система способна определять концентрацию CO_2 в атмосфере в пределах 6 km поперечного поля атмосферного ветра [12]. Итак, самый лучший источник лидара может быть усовершенствован таким образом, чтобы повысить качество обеспечиваемых им измерений данных о поле атмосферного ветра.

В настоящей работе лидарная система измерения ветра с длиной волны генерации 1.5 μm состояла из трех основных частей: из элементов эмиссии, приема и обработки излучения (рис. 1). Излучающий элемент представлял собой волоконный лидарный источник. Лидарный источник одночастотного излучения с распределенной обратной связью (DFB), работающий в непрерывном режиме (локальный осциллятор), обеспечивал усиление сигнального пучка посредством акустооптического импульсного модулятора (AOM). В системе волоконного усилителя использовалась комбинация предусилителя — волоконной структуры с эрбиевым легированием (EDFA) — и основного усилителя EYDFA. Сигнальные пучки передавались с помощью оптической антенны, коллиматора и поляризационно-стабилизированного пассивного

волокна (PM-PF). В элементе-приемнике (оптической антенне) применялась кеплеровская телескопическая система расширения пучка, при этом развертка сигналов при передаче в атмосферу выполнялась с помощью вращающейся оптической призмы. Эхо-сигналы доплеровских атмосферных измерений поступали на пропускающее окно лидара (оптическую антенну), а затем — на волоконный циркулятор. Пучок эхо-сигнала и пучок от локального осциллятора (10%) несли комбинированную частоту (частоту когерентных биений) и поступали на сбалансированный фотодетектор (InGaAs/PIN, DC-350 MHz). Этот детектор выдавал в систему обработки данных когерентные сигналы разностной частоты. И наконец, в системе обработки сигналов необходимая информация о скоростях ветра извлекалась методом быстрого фурье-преобразования (FFT).

В качестве задающего источника в лидарной системе использовался одночастотный лазер с распределенной обратной связью с длиной волны 1532 nm с непрерывной накачкой (CW). Выходная мощность задающего источника лидара составляет 50 mW при ширине линии < 2 kHz; 90% задающей мощности подвергались усилению. Задающие сигналы подвергались модуляции с помощью AOM при частоте повторения импульсов 10 kHz и продолжительности 700 ns. Пучок импульсного задающего сигнала усиливался посредством оптической накачки с длиной волны 976 nm. Пиковая мощность лидарного источника после предусиления составляла 74 W, а энергия импульса — 52 μJ . Пиковая мощность лидарного источника составляла 610 W, а энергия импульса после основного усиления — 427 μJ . Кроме того, для поддержания стабильности продолжительной работы одночастотного лидара использовался отвод тепла при помощи водяного охлаждения. Выходной спектр лидарного источника оставался стабильным, в нем не наблюдалось шумов, связанных с нелинейными эффектами стимулированного бриллюэновского рассеяния (SBS) и усиления спонтанного излучения (ASE). Средняя длина волны лидарного источника была равна 1532.35 nm, отношение сигнал/шум — 50 dB, а качество сигнального пучка $M^2 \leq 1.21$ (рис. 2, a и b). По причине слабой интенсивности эхо-сигналов при атмосферных измерениях дальность детектирования была относительно невелика, а ошибка измерения скорости атмосферного ветра —

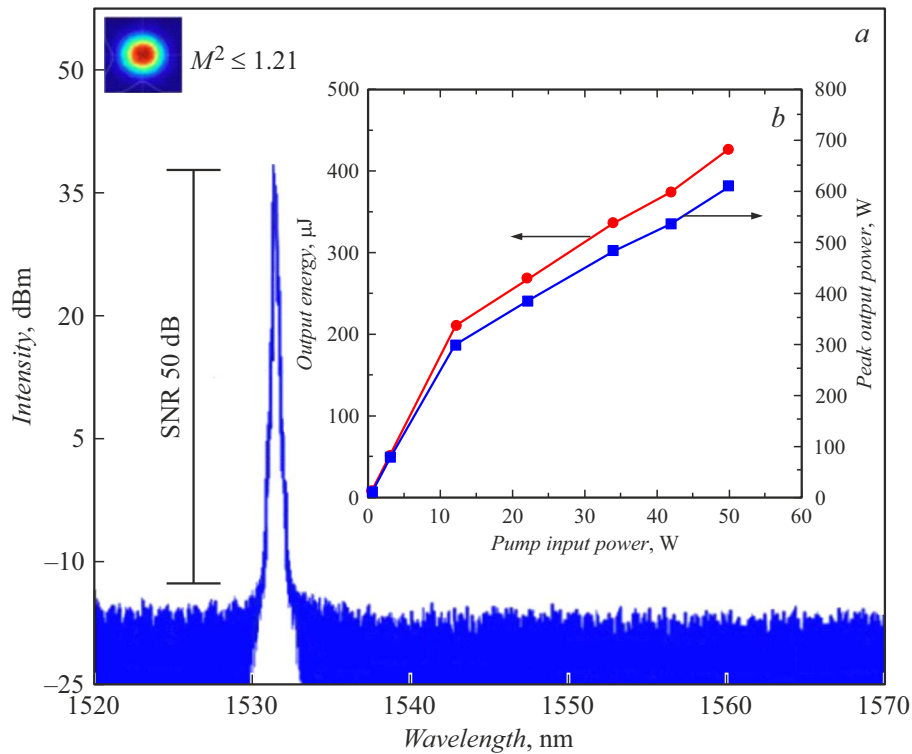


Рис. 2. *a* — выходной спектр лидарного источника; *b* — выходная энергия и мощность лидарного источника.

относительно высокой. Кроме того, возможности обнаружения эхо-сигналов на разной атмосферной высоте были различными. Таким образом, появилась необходимость в накоплении результатов измерений с целью повышения интенсивности сигнала и дальности его обнаружения. Накопление эхо-сигналов проводилось методом суперпозиции некогерентной интеграции сигнала на доплеровской частоте с целью дальнейшего улучшения отношения сигнал/шум в лидарных измерениях. Все это использовалось для восстановления данных о поле атмосферного ветра (рис. 3).

Поскольку состояние атмосферной среды постоянно меняется достаточно сложным образом, интенсивность эхо-сигналов была относительно невелика. Как мощность, так и энергия эхо-сигналов плавно снижаются при увеличении дальности регистрации. Основные параметры лидарной системы представлены в таблице. Среди оптических систем, характеризующихся высокой эффективностью пропускания и стабильностью параметров, наилучшей способностью принимать эхо-сигналы обладают лидары. Дальность регистрации параметров атмосферы лидаром была равна 5 km (48 диапазонов дальности), длина единичного диапазона дальности составляла 105 м. Для дальнейшего улучшения характеристик лидарной системы путем накопления сигнала было повышено отношение сигнал/шум, что постепенно привело к улучшению качества регистрации. Максимальная скорость нарастания величины сигнал/шум при накоплении сигнала наблюдалась при 1000 повторных

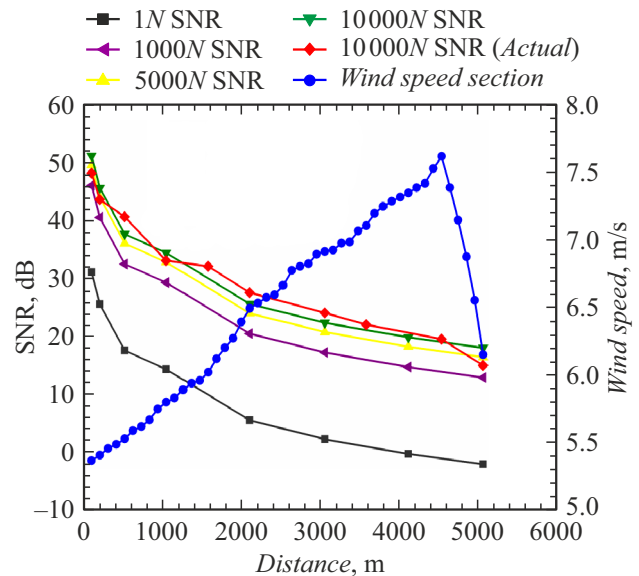


Рис. 3. Отношение сигнал/шум и скорость ветра.

измерений (1000N), в то время как минимальная скорость нарастания этого отношения была достигнута при 5000–10 000 повторных измерениях. Это явление можно объяснить следующим образом: с одной стороны, дальность детектирования оказывала влияние на величину сигнал/шум и мощность эхо-сигналов, с другой — увеличение отсчитываемых данных эхо-измерений и

Основные параметры лидарной системы

Параметр	Символ	Значение
Дальность измерений	L	0–5 km
Средняя длина волны	λ	1532 nm
Энергия импульса	E	427 μ J
Частота повторения	f_p	10 kHz
Промежуточная частота	IF	80 MHz
КПД антенны	η_a	0.422
Суммарный КПД системы	η_{total}	0.61
Коэффициент пропускания атмосферы	T	0.7 dB/km
Коэффициент рассеяния	β	$5 \cdot 10^{-6} - 10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$
Коэффициент усечения пучка	ρ_T	0.832
Ширина полосы пропускания детектора	B	250 MHz

накопленных эхо-сигналов, а также ограниченные вычислительные возможности аппаратуры системы приводили к тому, что скорость изменения отношения сигнал/шум снижалась. Таким образом, увеличение количества эхо-сигнала путем накопления привело к повышению качества регистрации плотности вероятности и восстановления данных о поле ветра. Отношение сигнал/шум аккумулярованных (10 000 повторных измерений) эхо-сигналов составило 18–51 dB, что означает увеличение на 20 dB величины отношения сигнал/шум по сравнению с одиночным измерением (1N). Что же касается оценки работы лидарной системы, то одним из надежных методов является оценка ошибки измерения. Ошибка измерений обратно пропорциональна точности системы. Частота отсчетов лидарного сигнала была равна 500 MHz при длине обрабатываемого массива данных, равной 1024 точкам. Последнее из полученных значений ошибки измерений было меньше ошибки разрешения, поэтому реальные измеренные сигналы близко отражали истинную информацию о скорости атмосферного ветра. Величина накопления эхо-сигнала варьировалась от 1369 до 10 000 повторных измерений при точности измерений до 10^{-2} . Разрешение измерений скорости ветра на лидаре составляло 0.37 m/s. С помощью лидара измерение параметров атмосферного состояния можно проводить круглосуточно в непрерывном режиме. В наших экспериментах измерялись продольные скорости ветра и характеристики атмосферной среды в центральных районах города Тяньцзинь (Китай) 4 мая 2022 г. в дневное время.

По нашим наблюдениям, отношение сигнал/шум для лидара уменьшалось при увеличении дальности детектирования. Характер изменений реальных данных измерений и результатов теоретических расчетов был практически одинаковым. Когда дальность детектирования превысила 4.5 km, фактическое значение отношения сигнал/шум стало отличаться от теоретического значения (при отклонении реального отношения в большую

сторону). Основные причины этого состоят в следующем: с одной стороны, все меньшая часть лидарных эхо-сигналов с большого расстояния попадала в апертуру антенны лидара по мере увеличения дальности; с другой стороны, по мере увеличения продольной высоты количество твердых частиц в атмосфере становится недостаточным, и интенсивность эхо-сигналов снижается. Наконец, эхо-сигналы большой дальности (продольной высоты) были слабыми, а шумовые сигналы (шумовой атмосферный рассеянный свет, шумовой ток детектора и пр.) — относительно высокими, поэтому происходило искажение эхо-сигналов. Дальность детектирования превышала 4.5 km, наблюдалось доминирование шумовых сигналов, а также внезапные вариации скорости ветра. Реальный диапазон изменения средней скорости ветра, измеренный с помощью лидарной системы в пределах продольной высоты 4.5 km, оказался равным 5.37–7.61 m/s. Фактические результаты соответствовали прогнозам синоптиков относительно скорости ветра на весь данный день.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K. Liu, M. Sang, P. Zhu, X.L. Wang, T.-X. Yang, *J. Optoelectron. Laser*, **25** (2), 222 (2014).
- [2] S. Yuan, T.-S. Wang, X.-F. Miao, X. Zhou, Y.-Z. Wei, Q.-L. Li, L.-L. Sun, *J. Optoelectron. Laser*, **24** (5), 874 (2013).
- [3] Y. Dai, in *Lidar technology* (Electronic industry press, Beijing, 2010), p. 426–433.
- [4] R. Frehlich, S.M. Hannon, S.W. Henderson, *Appl. Opt.*, **36** (15), 3491 (1997). DOI: 10.1364/AO.36.003491
- [5] R.T. Menzies, R.M. Hardesty, *Proc. IEEE*, **77** (3), 449 (1989). DOI: 10.1109/5.24130

- [6] L. Lombard, A. Azarian, K. Cadoret, P. Bourdon, D. Goular, G. Canat, V. Jolivet, Y. Jaouën, O Vasseur, *Opt. Lett.*, **36** (4), 523 (2011). DOI: 10.1364/OL.36.000523
- [7] X. Jia, *Prototype development of 1.55 μm coherent wind measuring laser of prototype development*, doctoral dissertation (Chinese Academy of Sciences, 2015).
- [8] Y. Zhou, *Coherent doppler wind lidar key technology of research*, master thesis (Aerospace Science and Technology Research Institute, 2017).
- [9] S. Abdelazim, D. Santoro, M. Arend, F. Moshary, S. Ahmed, *Sensors*, **18** (12), 4170 (2018). DOI: 10.3390/s18124170
- [10] B. Augere, M. Valla, A. Durécu, A. Dolfi-Bouteyre, D. Goular, F. Gustave, C. Planchat, D. Fleury, T. Huet, C. Besson, *Atmosphere*, **10** (9), 549 (2019). DOI: 10.3390/atmos10090549
- [11] L. Meng, C. Pedersen, P.J. Rodrigo, *Remote Sens.*, **13** (18), 3716 (2021). DOI: 10.3390/rs13183716
- [12] B. Yue, S. Yu, M. Li, T. Wei, J. Yuan, Z. Zhang, J. Dong, Y. Jiang, Y. Yang, Z. Gao, H. Xia, *Remote Sens.*, **14** (20), 5150 (2022). DOI: 10.3390/rs14205150