

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.521

Измерения скорости и направления ветра аэрозольным УФ-лидаром

П.А. Филимонов, С.Е. Иванов, В.А. Городничев, М.Л. Белов, Ю.В. Федотов*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
105005 г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5*

Поступила в редакцию 31.03.2021 г.

Показана возможность измерения скорости и направления ветра аэрозольным УФ-лидаром с использованием разработанного метода семплирования. Представлены макет экспериментальной установки и данные исследований лазерного двухлучевого метода измерения скорости атмосферного ветра на безопасной для зрения длине волны зондирования 0,355 мкм. Приведены примеры данных измерений, показано влияние различных оптических ситуаций на качество измерений. Средняя погрешность определения скорости и направления ветра для данных, накопленных в весенне-осенний период, составила 1 м/с и 13°.

Ключевые слова: лидар, аэрозольные неоднородности, ультрафиолетовый диапазон, измерение скорости ветра, цифровая обработка сигналов; lidar, aerosol inhomogeneities, ultraviolet spectral region, wind velocity measurement, digital signal processing.

Введение

Необходимость оперативного (не более 5–10 с) мониторинга скорости ветра требует развития существующих и разработки новых методов измерения. Для решения практических задач перспективны активные и пассивные оптические методы мониторинга скорости ветра [1–7]. Активные методы более предпочтительны, так как они не зависят от времени суток, не требуют наличия высококонтрастных объектов на местности и позволяют получать информацию о профиле скорости ветра вдоль трассы зондирования.

Лазерные методы измерения скорости ветра можно условно разделить на доплеровские и времяпролетные, включающие корреляционные методы, метод подобия и другие, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки [3–9].

Недостатком доплеровских лазерных методов является их способность измерять только продольную составляющую скорости ветра. Полный вектор скорости ветра можно восстановить из данных измерений продольной скорости при угловом сканировании или в многолучевой схеме зондирования, но с большими погрешностями.

Времяпролетные методы обладают меньшей дальностью зондирования, но потенциально позволяют измерять профиль полного вектора скорости ветра, требуют использования менее сложной аппаратуры, а трасса зондирования может проходить

вблизи земной поверхности и объектов на местности. Теоретическим и экспериментальным исследованиям лазерных корреляционных систем и смежным вопросам посвящено большое количество публикаций [5–15].

В настоящее время задача дистанционного оперативного измерения профиля скорости и направления ветра в условиях сложного рельефа местности, вызывающего существенное изменение вектора скорости ветра вдоль трассы зондирования, не решена: существующая аппаратура не позволяет проводить надежные измерения с удовлетворительной точностью. Для решения упомянутой задачи потенциально более перспективны времяпролетные методы. Экспериментальные исследования в этом направлении проводятся преимущественно для спектрального диапазона 0,38–1,4 мкм, опасного для зрения человека.

Настоящая работа посвящена экспериментальным исследованиям скорости переноса аэрозольных неоднородностей приземного слоя атмосферы в спектральном УФ-диапазоне на безопасной для зрения длине волны зондирования $\lambda = 0,355$ мкм [16]. Работ на указанную тему, касающихся УФ-диапазона, очень мало. Авторам известна только работа [15], в которой для длины волны зондирования $\lambda = 0,337$ мкм приведена одна реализация лидарных измерений поперечной скорости ветра.

Описание макета лидара

Для проведения экспериментальных исследований на $\lambda = 0,355$ мкм в НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана был создан макет лидара (рис. 1). Источник излучения – YAG:Nd³⁺-лазер EKSPLA NL204

* Павел Анатольевич Филимонов (paulinio91@yandex.ru); Сергей Евгеньевич Иванов (ivanov_sergey2@mail.ru); Виктор Александрович Городничев (gorod@bmstu.ru); Михаил Леонидович Белов (belov@bmstu.ru); Юрий Викторович Федотов (fed@bmstu.ru).

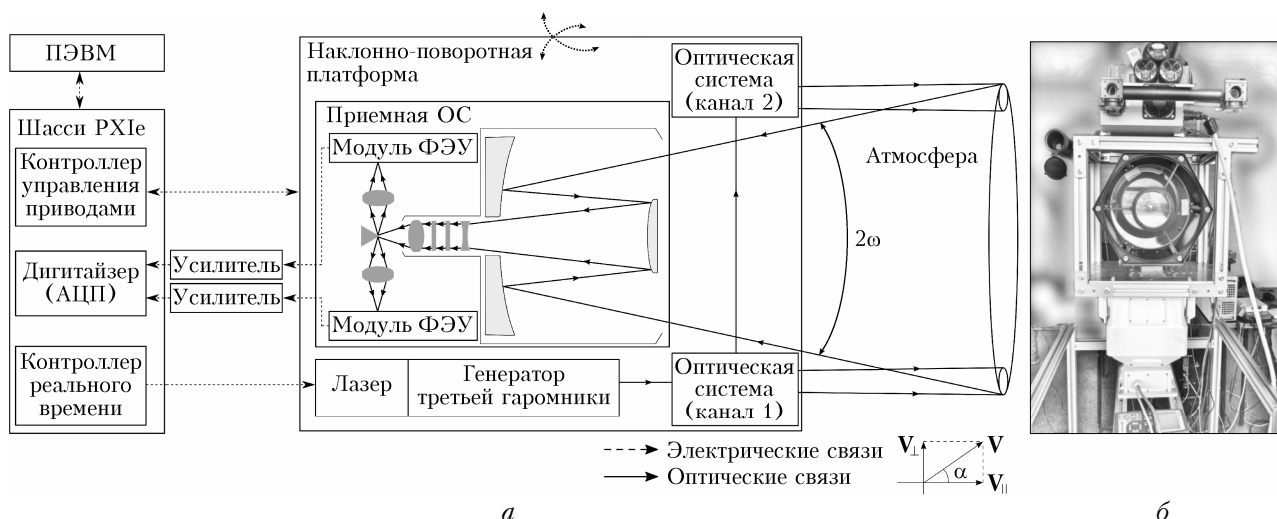


Рис. 1. Макет лидара: *а* – структурно-функциональная схема; *б* – фотография приемопередающей части

с полупроводниковой накачкой и модуляцией добротности, рабочей длиной волны $\lambda = 0,355$ мкм и углом расходимости лазерного пучка 3 мрад. Лазерные пучки – слаборасходящиеся. Энергия импульса лазера – 1,3 мДж, длительность импульса – 7 нс, частота повторения импульсов – 10–500 Гц. Приемным объективом является зеркальный объектив по схеме Кассегрена диаметром 100 мм. Поле зрения приемной оптической системы – 12 мрад. Для подавления фонового излучения используются интерференционные фильтры SemrockLL01-355-25 и BPF 350\50. Два приемных канала получаются разделением угла поля зрения приемного объектива на две части посредством отражающей прямоугольной призмы. В каждом канале используется приемник оптического излучения ФЭУ Hamamatsu H10721-210.

Для согласования уровня сигнала между ФЭУ и АЦП к выходу модуля ФЭУ подключался широкополосный усилитель Hamamatsu C11184. Для преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму использовался высокоскоростной 12-битный АЦП NI PXIe-5171R с частотой дискретизации 250 МГц. Управление, тематическая обработка сигналов, отображение и сохранение результатов измерений в макете лазерного измерителя осуществлялись на ПЭВМ в среде NI LabVIEW, последующая обработка и анализ данных проводились с использованием Python 3.

Измерения на созданном макете проводились на базе филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана в Дмитровском районе Московской обл. в весенне-осенний период при различных метеоусловиях на высоте 10 м от уровня земли, подстилающая поверхность – травяной покров, водоемы и крупные сооружения в непосредственной близости отсутствовали. Для контроля скорости и направления ветра использовался анеморумбометр «Ветромер-1», расположенный на высоте 10 м в непосредственной близости от трассы измерения на расстоянии 110 м от лидара. Проекции скорости ветра получались путем разложения измеренного модуля и направления ветра на направление зондирования (рис. 1).

Обработка регистрируемого сигнала

Регистрируемая i -я реализация сигнала $P_i(z)$ преобразуется к относительным флуктуациям коэффициента обратного аэрозольного рассеяния

$$\Delta_i^\beta(z) = \frac{\tilde{\beta}_i^{\text{aer}}(z)}{\bar{\beta}^{\text{aer}}(z)} = \frac{P_i(z) - \bar{P}(z)}{\bar{P}(z)}, \quad (1)$$

где z – расстояние от лидара до зондируемого объема атмосферы; $\tilde{\beta}_i^{\text{aer}}(z)$ – флуктуации коэффициента обратного аэрозольного рассеяния; $\bar{\beta}^{\text{aer}}(z)$ – средний по трассе коэффициент обратного аэрозольного рассеяния; $\bar{P}(z)$ – усредненное по измеренным реализациям значение регистрируемого уровня сигнала в зависимости от дальности.

Последовательность регистрируемых эхосигналов позволяет вычислить последовательность флуктуаций коэффициента аэрозольного рассеяния $\Delta_i^\beta(z)$. После обработки серии реализаций сигналов результат можно представить в виде двумерного поля аэрозольных неоднородностей Δ^β в координатах «дальность – время измерения».

Для создания поля неоднородностей Δ^β проводилась предварительная обработка регистрируемого сигнала. С целью нахождения среднего профиля сигнала $\bar{P}(z)$ предварительно накопленная серия реализаций выравнивалась по уровню мощности среднего по времени сигнала для компенсации флуктуаций профиля сигнала, вызванных флуктуациями мощности лазерного импульса и фоновой засветки. После этого использовалась формула (1) для вычисления поля неоднородностей Δ^β . Характеристики аэрозольных неоднородностей (размеров и контрастов) для $\lambda = 0,355$ мкм исследовались в [17].

Измерение скорости ветра

Определение скорости и направления ветра по данным измерений проводилось после предварительной обработки (децимация, выравнивание

мощности сигнала, выделение флуктуационной и постоянной составляющих за время измерения, цифровая фильтрация) и сегментации двумерного поля неоднородностей Δ^b в координатах «дальность – время измерения» [18]. Для дальнейшей обработки выбиралась неоднородность с наибольшим контрастом. Скорость и направление ветра определялись алгоритмом на основе сэмплирования аэрозольных неоднородностей [19], реализованном на представлении траектории смещения неоднородностей на двумерном поле в координатах «дальность – время измерения». Предполагалось, что скорость ветра (V) за время измерения (t) одинаковая и постоянная для всех точек этого поля в окрестности выбранной неоднородности. Вычислялся квадратичный функционал, представляющий собой разность полей во втором канале и поля в первом канале, смещенного ветром. Параметры ветра находились в результате минимизации функционала при варьировании модуля V и направления (φ) ветра. Примеры двумерных полей Δ^b для различных атмосферных условий показаны на рис. 2–4.

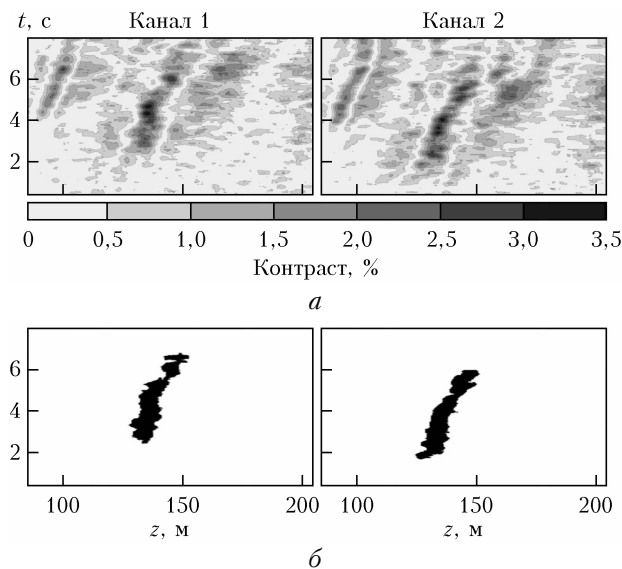


Рис. 2. Результат измерения в ясную погоду: *a* – поле неоднородностей после предварительной обработки; *б* – после предварительной обработки и сегментации; показания анеморумбометра: $V = 4,16$ м/с, $\varphi = 218^\circ$

Неоднородности, которые можно использовать для измерения скорости ветра, регистрировались и на больших дальностях (несколько сотен метров). Однако на расстояниях свыше 300 м и в условиях высокой прозрачности атмосферы низкое отношение сигнал/шум для созданного макета лидара приводило к выбросам измерений. Кроме того, во многих оптических ситуациях, когда контраст неоднородностей не превышал единиц процентов, вероятность наблюдения таких неоднородностей за 10 с сильно уменьшалась с увеличением расстояния от лидара.

Погрешности определения скорости и направления ветра с использованием алгоритма на основе сэмплирования (рис. 2–4) и средняя погрешность

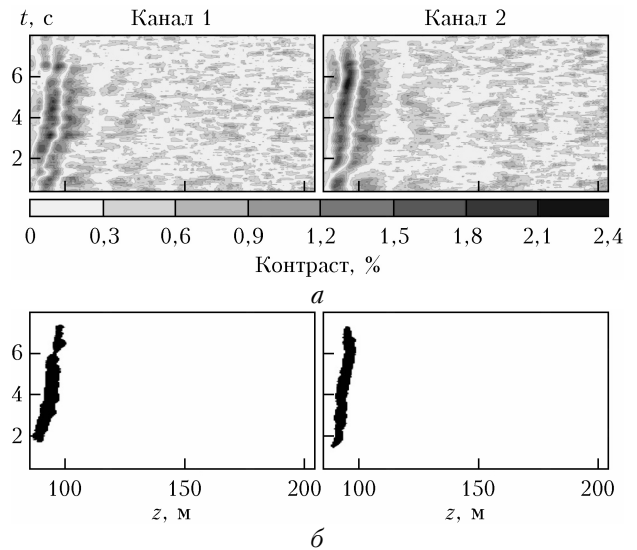


Рис. 3. То же, что на рис. 2, при слабой дымке; $V = 3,93$ м/с, $\varphi = 73^\circ$

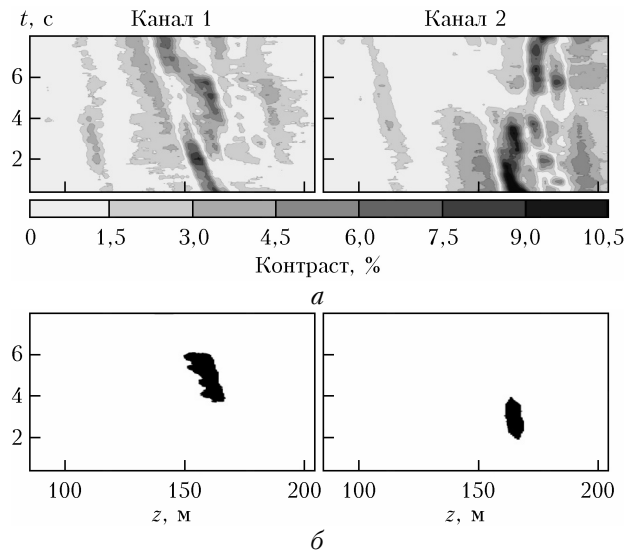


Рис. 4. То же, что на рис. 2, при слабой дымке; $V = 3,11$ м/с, $\varphi = 83^\circ$

относительно данных измерений анеморумбометра, накопленных в весенне-осенний период при различных погодных условиях, представлены в таблице в сравнении с корреляционным алгоритмом и корреляционным алгоритмом с сегментацией неоднородностей. Всего было проведено 672 сеанса измерений; в 416 из них были зарегистрированы неоднородности и обработаны данные измерений. Корреляционный метод измерения скорости ветра реализован через последовательные вычисления продольной и поперечной компонент скорости ветра относительно оптической оси лазерного пучка. Продольная компонента вычислялась как отношение сдвига пространственной корреляционной функции к времени измерения, а поперечная определялась как отношение расстояния между центрами лазерных пучков на исследуемой дистанции к сдвигу временной корреляционной функции.

**Средняя погрешность определения скорости и направления ветра ΔV , м/с
($\Delta\phi$, град.)**

Пример	Алгоритм		
	корреляционный	корреляционный с сегментацией	семплирования
Рис. 2	0,81 (12,4)	0,58 (10)	0,31 (4,9)
Рис. 3	2,71 (37,5)	2,15 (28,6)	1,43 (19,3)
Рис. 4	2,22 (13,4)	1,87 (11,2)	1,69 (10,9)
Среднее значение по всем данным измерений	2,23 (30,8)	1,46 (22,7)	1,05 (13,3)

Результаты, приведенные в таблице, показывают возможности лидарного измерения скорости ветра в УФ-диапазоне на $\lambda = 0,355$ мкм при разных оптических состояниях атмосферы и перспективность (с точки зрения уменьшения погрешности измерений) использования алгоритма семплирования для обработки двумерных полей аэрозольных неоднородностей в координатах «дальность–время измерения» в задаче определения скорости и направления атмосферного ветра.

Заключение

Представлены макет экспериментальной установки и данные исследований лазерного двухлучевого метода измерения скорости атмосферного ветра в спектральном УФ-диапазоне на безопасной для зрения длине волны зондирования $\lambda = 0,355$ мкм. Определение скорости и направления ветра по данным измерений проводилось после сегментации двумерного поля «дальность – время измерения» аэрозольных неоднородностей и применения алгоритма на основе семплирования. Показаны возможности лидарного измерения скорости ветра на $\lambda = 0,355$ мкм при разных оптических состояниях атмосферы и перспективность применения алгоритмов сегментации и семплирования для обработки данных измерений. При использовании алгоритмов сегментации и семплирования средние погрешности определения скорости и направления ветра для данных, накопленных в весенне-осенний период, составили 1 м/с и 13°.

1. *Афанасьев А.Л., Банах В.А., Маракасов Д.А., Аксенов В.А., Шишкин Е.В., Пазий Ю.В.* Формирование поправок к прицеливанию с помощью пассивного оптического измерителя скорости поперечного ветра // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 5. С. 355–363.
2. *Еремина А.С., Дудоров В.В.* Способ фильтрации и определения скорости смещения турбулентных искажений в видеоряде оптических изображений при ветровом сносе атмосферных неоднородностей // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 8/2. С. 192–194.
3. *Банах В.А., Смалыхо И.Н., Фалиц А.В., Гордеев Е.В., Сухарев А.А.* Измерения скорости и направления ветра с помощью двухлучевого метода доплеровским лидаром Stream Line в приземном слое атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 8. С. 644–650; *Banakh V.A., Smalikhov I.N., Falits A.V., Gordeev E.V., Sukharev A.A.* Stream Line Doppler lidar measurements of wind speed and direction with the duo-beam method

in the surface air layer // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 6. P. 581–587.

4. *Lane S.E., Barlow J.F., Wood C.R.* An assessment of a three-beam Doppler lidar wind profiling method for use in urban areas // J. Wind Eng. Ind. Aerod. 2013. V. 119, N 8. P. 53–59.
5. *Матвиенко Г.Г., Заде Г.О., Фердинандов Э.С., Колле И.Н., Аврамова Р.П.* Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра. Новосибирск: Наука, 1985. 223 с.
6. *Афанасьев А.Л., Дудоров В.В., Михайлов Ю.Т., Насонова А.С., Ростов А.П., Шестаков С.О.* Определение поперечной составляющей скорости ветра на основе анализа видеоряда изображений удаленных объектов. Часть 3. Экспериментальная апробация // Оптика атмосфер. и океана. 2020. Т. 33, № 7. С. 553–558; *Afanasyev A.L., Dudorov V.V., Mikhailov Yu.T., Nasonova A.S., Rostov A.P., Shestakov S.O.* Retrieval of crosswind velocity based on the analysis of remote object images: Part 3. Experimental test // Atmos. Ocean. Opt. 2020, V. 33, N 6. P. 690–695.
7. *Афанасьев А.Л., Банах В.А., Маракасов Д.А.* Мониторинг ветровой обстановки и индикация спутных следов в районе взлетно-посадочной полосы аэропорта пассивным оптическим методом // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 5. С. 365–370; *Afanasyev A.L., Banakh V.A., Marakasov D.A.* Passive optical monitoring of wind conditions and indication of aircraft wakes near airport runways // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 5. P. 506–510.
8. *Матвиенко Г.Г.* Лидарные измерения скорости ветра с использованием стохастической структуры аэрозольных полей // Оптика атмосфер. и океана. 1988. Т. 1, № 6. С. 3–15.
9. *Матвиенко Г.Г., Самохвалов И.В., Рыбалко В.С., Борцов Ю.Н., Шелефонтьев Д.И., Вореводин Ю.М.* Оперативное определение компонентов скорости ветра с помощью лидара // Оптика атмосфер. и океана. 1988. Т. 1, № 2. С. 68–72.
10. *Астафуров В.Г., Игнатова Э.Ю., Матвиенко Г.Г.* Эффективность лидарных измерений скорости ветра корреляционным лидаром // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 1, № 2. С. 497–503.
11. *Балин Ю.С., Матвиенко Г.Г., Гришин А.И., Ковалевский В.К., Мелешикин В.Е.* Сравнение лазерного и радиозондового методов зондирования скорости и направления ветра // Оптика атмосфер. 1991. Т. 4, № 10. С. 1070–1076.
12. *Гришин А.И., Матвиенко Г.Г.* Лидарные исследования атмосферного аэрозоля в области ветровых сдвигов // Оптика атмосфер. 1995. Т. 8, № 7. С. 1056–1062.
13. *Mayor S.D., Derian P., Mauzey C.F., Spuler S.M., Ponsardin P., Pruitt J., Ramsey D., Higdson N.S.* Comparison of an analog direct detection and a micropulse aerosol lidar at 1.5- μ m wavelength for wind field obser-

- vations with first results over the ocean // *J. Appl. Remote Sens.* 2016. V. 10, N 5. P. 016031-1–16.
14. *Narasimha S.P., Mylapore A.R.* Three-beam aerosol backscatter correlation lidar for wind profiling // *Opt. Eng.* 2017. V. 56, N 3. P. 1–25.
 15. *Armstrong R.L., Mason J.B., Barber T.* Detection of atmospheric aerosol flow using a transit-time lidar velocimeter // *Appl. Opt.* 1976. V. 15, N 11. P. 2891–2895.
 16. *ГОСТ ИЕС 60825-1-2013.* Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 1. Классификация оборудования, требования и руководство для пользователей. М.: Изд-во стандартов, 2014. 243 с.
 17. *Filimonov P.A., Ivanov S.E., Belov M.L., Fedotov Yu.V., Gorodnichev V.A.* Monitoring of aerosol inhomogeneities parameters in atmosphere at 355 nm // *Proc. SPIE.* 2018. V. 10833. P. 108333L-1–6.
 18. *Филимонов П.А., Белов М.Л., Федотов Ю.В., Иванов С.Е., Городничев В.А.* Алгоритм сегментации аэрозольных неоднородностей // *Компьютерная оптика.* 2018. Т. 42, № 6. С. 1062–1067.
 19. *Филимонов П.А., Белов М.Л., Иванов С.Е., Городничев В.А., Федотов Ю.В.* Алгоритм на основе сэмплирования аэрозольных неоднородностей в задаче измерения скорости ветра // *Компьютерная оптика.* 2020. Т. 44, № 5. С. 791–796.

P.A. Filimonov, S.E. Ivanov, V.A. Gorodnichev, M.L. Belov, Yu.V. Fedotov. **Measurements of wind speed and direction with an aerosol UV lidar.**

We show a possibility of measuring wind speed with a lidar and a sampling method developed. An experimental setup operating at an eye-safe 0.355 μm wavelength is described; corresponding measurement data are presented. The dependence of the measurement quality on optical properties of the atmosphere is analyzed. The mean absolute errors are 1.05 m/s for the wind speed and 13.3° for the wind direction calculated with accumulated measurements for spring–autumn.