

В.М. Гордиенко, Н.Н. Курочкин, А.В. Приезжев, Ю.Я. Путивский

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРОВЫХ ПОТОКОВ С ПОМОЩЬЮ ДОПЛЕРОВСКОГО ЛИДАРА НА БАЗЕ ОДНОЧАСТОТНОГО ТЕА СО₂-ЛАЗЕРА

В работе дано описание доплеровского лидара на базе одночастотного ТЕА СО₂-лазера. Приведены характерные результаты параллельных измерений вектора скорости ветра с помощью ДЛ и аппаратуры высотной метеорологической мачты. Созданный макет ДЛ позволяет уверенно определять скорость ветра при стандартных атмосферных условиях на расстоянии свыше 2-х, а при наличии адаптивного усилителя — до 10 км с точностью 2–3 м/с.

Измерение скорости ветровых потоков с помощью доплеровских лидаров на базе СО₂-лазеров представляет собою перспективную область научных и прикладных исследований. К настоящему времени наиболее разработанными являются доплеровские лидары на основе непрерывных СО₂-лазеров, которые позволяют проводить измерения параметров ветровых потоков на расстояниях несколько сот метров [1].

Непрерывный ДЛ может быть построен по схеме интерферометра Маха—Цандера, у которого одно из зеркал заменено приемоподающим телескопом [2]. Параметры ДЛ: длина волны излучения 10,6 мкм, сдвиг частоты опорного излучения 26 МГц, диаметр приемоподающего телескопа 15 см. Сигнал с фотодиода, спектр которого содержит информацию о скорости ветра на трассе [3], через предварительный усилитель поступает на спектроанализатор с последующей обработкой спектра этого доплеровского сигнала с помощью вычислительного комплекса. При этом локальность и дистанционность измерений обеспечиваются соответствующей фокусировкой зондирующего излучения [1].

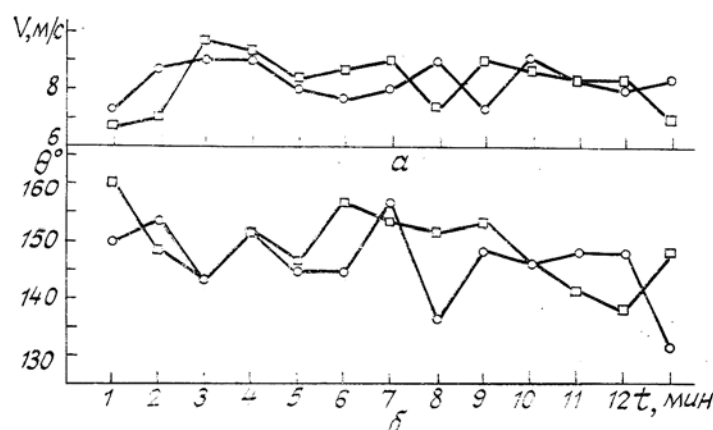


Рис. 1. Одновременное измерение вектора скорости ветра с помощью ДЛ (○) и ВММ (□). Фокусное расстояние телескопа ДЛ 200 м, угол места зондирования 68°, азимуты 0, 100, 300°, высота анемометров ВММ 75 м: *a* — модули скорости (*V*), *b* — азимуты (θ). Справа показаны соответствующие средние за все время измерения

На рис. 1 приведены характерные результаты параллельных измерений вектора скорости ветра с помощью ДЛ и аппаратуры высотной метеорологической мачты (ВММ) [4]. В этих измерениях вектора скорости ветра применялась следующая методика: при неизменных фокусном расстоянии телескопа и угле места зондирования проводились измерения при трех разных азимутах и по полученным трем проекциям определялся вектор скорости ветра. Дальность работы непрерывного ДЛ ограничивается расстоянием около 1 км.

Дальнейшее увеличение дальности зондирования возможно при переходе к импульсному ТЕА СО₂-лазеру как источнику зондирующего излучения. Нами был создан одночастотный ТЕА СО₂-лазер с инжекцией внешнего сигнала и узким спектром генерируемого излучения [5]. Параметры используемого в эксперименте ТЕА СО₂-лазера следующие: энергия генерации 300 мДж, длительность импульса 2 мкс, ширина спектра генерации 0,4...0,6 МГц.

Для зондирования атмосферы использовалась соосная бистатическая схема. Излучение ТЕА-лазера диаметром 10 мм через поворотное зеркало большого диаметра 150 мм направлялось в атмосферу. Рассеянное назад атмосферным аэрозолем излучение собиралось телескопом диаметром 100 мм на

фотоприемнике HgCdTe. На этот же фотоприемник заводилось излучение опорного непрерывного стабилизированного по частоте лазера (рис. 2).

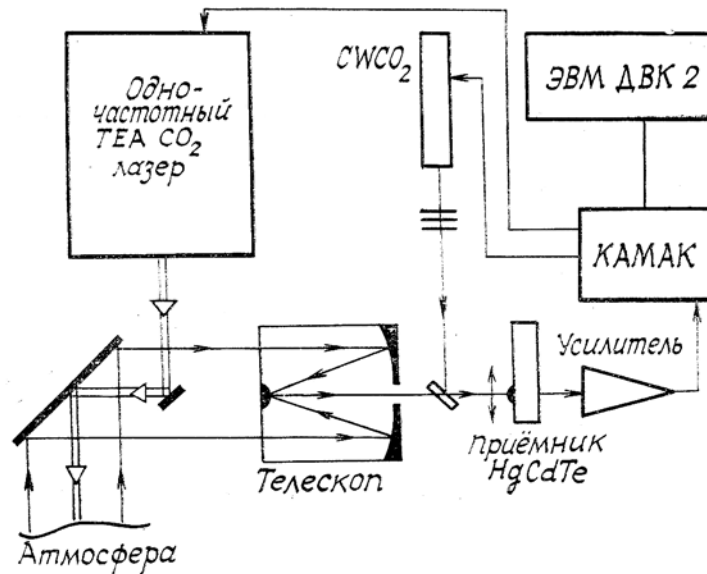


Рис. 2. Функциональная схема доплеровского лидара

Использование данной схемы зондирования в отличие от моностатической схемы позволяет избежать засветки фотоприемника паразитно-рассеянным излучением приемопередающего телескопа.

Частота гетеродинного сигнала выбиралась в оптимальном интервале 4...5 МГц. Гетеродинный сигнал усиливался маломощным усилителем и оцифровывался быстрым АЦП с временем дискретизации 25 нс и буферной памятью 2К 6-разрядных слов. Спектральный анализ гетеродинного сигнала проводился с помощью алгоритма БПФ. Методом 3-х сигма определялась взвешенная средняя частота спектра рассеянного сигнала, для определения которой при нулевой скорости рассеивателя использовалась модель распространения и рассеивания импульса с реальными временными и частотными характеристиками в атмосфере. Разность этих частот и содержит информацию о средней скорости и направлении ветра.

В основе модели, аналогичной для непрерывного ДЛ, лежит предположение, что положения рассеивающих частиц аэрозоля в атмосфере независимы. В этом случае спектр мощности гетеродинного сигнала представляет собою сумму спектров мощности гетеродинных сигналов от отдельных рассеивателей [1]. В нашей модели учтены импульсный характер зондирующего излучения и конечное время приема излучения (выборка фрагмента гетеродинного сигнала из памяти АЦП). Спектральная мощность гетеродинного сигнала с расстояния L описывается формулой

$$S(\nu, L) = \int_{\Delta L} \frac{2e^2 \eta^2 P_{\text{оп}} \beta(\pi) e^{-2\sigma L} |\Phi_{t_1}^{t_2}(\sqrt{P_0} \exp(i(\omega_l - \omega_{\text{оп}} + \omega_d)t))|^2}{h^2 \nu^2 L^2 [1 + (\pi R^2 / \lambda L)^2 (L/F - 1)^2] [1 + (2R/r_k)^2]} dL,$$

где t_1 — время от начала генерации до начала регистрации сигнала; t_2 — время от начала генерации до конца регистрации сигнала; $\Phi_{t_1}^{t_2}(\sqrt{P_0} \exp(i(\omega_l - \omega_{\text{оп}} + \omega_d)t))$ — преобразование Фурье части лазерного импульса в зависимости от t_1, t_2, L ; $P_0(t)$ — зависимость мощности зондирования от времени; e — заряд электрона; $h\nu, \lambda$ — энергия кванта и длина волны зондирующего излучения соответственно, η — квантовая эффективность приемника; $\beta(\pi)$ — коэффициент обратного рассеяния; σ — коэффициент экстинкции; R, F — радиус и фокусное расстояние телескопа соответственно, $P_{\text{оп}}$ — мощность опорного излучения, $\omega_l, \omega_{\text{оп}}, \omega_d$ — соответственно частоты зондирования, опорного излучения и доплеровского сдвига; r_k — радиус когерентности рассеянного излучения, обусловленный турбулентностью атмосферы.

Информация о временных и частотных характеристиках зондирующего импульса получается путем обработки гетеродинного сигнала в течение первых 2-х микросекунд после начала генерации. В этот период времени осуществляется гетеродинный прием паразитно-рассеянного на поворотных зеркалах зондирующего излучения. Гетеродинный сигнал рассеянного атмосферой излучения и соответствующие значения скорости ветра, рассчитанные по вышеизложенной модели, приведены на рис. 3.

При зондировании на расстояниях более 2 км возникает проблема уменьшения сигнала по абсолютной величине за время регистрации гетеродинного сигнала из-за распространения и затухания импульсного излучения. Такая проблема может быть решена с использованием адаптивного усилителя

с изменяющимся коэффициентом усиления, причем увеличение усиления должно компенсировать уменьшение гетеродинного сигнала из-за распространения в атмосфере.

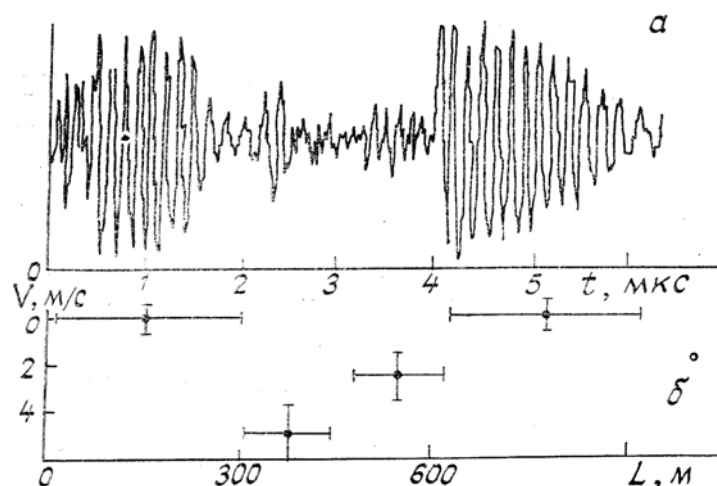


Рис. 3. Пример гетеродинного сигнала рассеянного атмосферой излучения (а), соответствующие значения скорости ветра (б)

Нами был разработан такой усилитель с изменяющимся коэффициентом усиления и синхронизацией времени включения нарастания усиления. Созданный макет доплеровского лидара позволяет уверенно определять скорость ветра при стандартных атмосферных условиях на расстояниях свыше 2-х, а при наличии адаптивного усилителя до 10 км с точностью 2...3 м/с.

Дальность зондирования свыше 10 км может быть увеличена при использовании более технически сложной моностатической схемы зондирования, которую для импульсных мощных лидаров необходимо использовать совместно с системой высокоэффективного оптического затвора, реализованного, например, на акустооптическом дефлекторе с коротким временем включения (100 нс) и эффективностью преобразования 80%. В этом случае в момент появления паразитной засветки акустооптический дефлектор должен быть включен и рассеянное излучение направляется мимо приемной апертуры фотоприемника. После окончания паразитной засветки около 1 мкс включается акустооптический дефлектор и происходит отклонение рассеянного излучения на фотоприемник.

Нам представляется перспективным сочетание в комплексе ветрового мониторинга непрерывного и импульсного ДЛ, одновременно функционирующих на одной трассе с разграничением работы по дальности. Непрерывный ДЛ измеряет скорость ветра на расстояниях до 1 км, а импульсный — с расстояния более 300 метров (мертвая зона для нашего ДЛ), что существенно для исследования ветровых потоков в приземном слое атмосферы. Информация о скорости ветра, полученная с помощью непрерывного и импульсного ДЛ в диапазоне расстояний от 300 метров до 1 км, может быть использована и для взаимной калибровки лидаров.

1. Берсенеv В.И., Гордиенко В.М., Курочкин Н.Н. и др. Дистанционная лазерная доплеровская диагностика аэрозольных потоков //Изв. АН СССР. Сер. физич. 1986. Т. 50. № 6. С. 1225—1228.
2. Gordienko V.M., Akhmanov S.A., Bersenev V.I. et al. //Infrared coherent lidar system for wind velocity measurement, OE I.ASE'91. Laser Radar. V. 1. № 1416-14.
3. Бызова Н.Л., Гордиенко В.М., Курочкин Н.Н. и др. Совместные измерения скорости ветра доплеровским лидаром и анемометрами на высотной мачте //Метеорология и гидрология. 1991. № 3. С. 114—117.
4. Мазурин Н.Ф. Измерительно-вычислительный комплекс высотной метеорологической мачты ИЭМ 33 //Тр. ин-та экспериментальной метеорологии. М.: Гидрометеонздат, 1987. Вып. 10 (131). С. 17—22.
5. Гордиенко В.М., Путивский Ю.Я. Спектральные характеристики ТЕА CO₂-лазера с инжекцией внешнего сигнала //Квантовая электроника. 1991. Т. 18. № 3. С. 316—318.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию
27 июня 1991 г.

V.M. Gordienko, N.N. Kurochkin, A.V. Priezzhev, Yu.Ya. Putivskii.
Measurements of the Wind Flow Speed with a Doppler Lidar Based on the Use of a Single Frequency TEA CO₂-Laser.

A Doppler lidar based on the use of a single frequency TEA CO₂-laser is described. Typical results of wind vector measurements made using the Doppler lidar and instrumentation of the «meteorological tower» are presented. The version of the Doppler lidar developed enables one to reliably determine the wind speed at distances up to above 2 km under standard atmospheric conditions and up to 10 km if using an adaptive amplifier, the accuracy being about 2 to 3 m/s.