

УДК 551.501+53.08

Ветровой доплеровский низкокогерентный метеолидар в полностью волоконном исполнении

А. И. Гришин, Г. Г. Матвиенко, С. Н. Поляков

Предложена концепция ветрового доплеровского низкокогерентного метеолидара с непрерывной опорной волной, формируемой из части усиленного излучения TTL-модулируемого DFB-лазера, пропускаемого через оптоволоконную кольцевую линию задержки.

PACS: 42.68.Wt

Ключевые слова: ветровой доплеровский низкокогерентный метеолидар, оптоволоконная кольцевая линия задержки.

Введение

Одной из тенденций развития когерентных доплеровских метеолидаров является все большее применение в них оптоволоконных элементов, что значительно упрощает их изготовление и техническое обслуживание, а также приводит к их удешевлению. При этом они наследуют схему МОРА (Master Oscillator Power Amplifier), в которой высококогерентный непрерывный волоконный эрбиевый лазер используется в качестве гетеродина и, кроме того, его излучение после прохождения работающего в импульсном режиме акустооптического модулятора (АОМ) усиливается в волоконном усилителе, создавая мощный зондирующий импульс со смещенной длиной волны. Необходимо заметить, что длина когерентности гетеродина не должна уступать дальности зондирования, а спектр излучения должен быть стабилен во временном интервале зондирования. Стоимость такого гетеродина может составлять до половины цены лидара. Кроме того, для обеспечения практически значимого значения нижнего предела чувствительности по скорости ветра $V_{\min} = 0,5 \cdot \lambda / \tau_{\text{pulse}} \sim (0,5—1)$ м/с (λ — длина волны) длительность зондирующего импульса τ_{pulse} должна иметь субмикросекундные или микросекундные значения. Именно по такому принципу построены метеолидары, описанные в работе [1], а также выпускаемые фирмой Leosphere Lidar Environmental

Observations. При этом оба лидара используют зондирующие импульсы с энергией ~ 10 мкДж, повторяемые с килогерцовыми частотами. Обработка данных измерений содержит процедуру накопления и последующего усреднения Фурье-циклограмм оцифрованного тока фотодетектора, обеспечивающую приемлемую точность измерения скорости ветра при отношении сигнал/шум на уровне от -15 дБ и менее.

В 2001 г. группа новозеландских авторов [2] предложила формировать импульсную опорную волну без применения схемы МОРА, аккумулируя ее на время измерений в оптоволоконной кольцевой линии задержки (ОКЛЗ). Они же экспериментально показали возможность такого измерения скорости, используя при этом зондирующие импульсы с гауссовым временным профилем, длительность и/или время когерентности которых уступали временному периоду ОКЛЗ. Каждый из этих трех факторов порождал в зондируемом объеме "слепые зоны". Это вполне уместно при контроле скорости пространственно-сосредоточенного объекта (вариант полицейского лидара), и высокая временная когерентность в этом случае действительно не нужна. Что же касается ветровых лидаров с субмикросекундными временем когерентности и длительностью импульсов, то реализовать их без схемы МОРА никому пока не удалось, равно как и реализовать предложение новозеландских авторов по приложению их схемы к ветровым лидарам. Работа над концепцией низкокогерентных доплеровских лидаров, воспроизводящей новозеландскую схему, продолжена в работе [3], которая унаследовала все недостатки работы [2]. В частности, в ней применена короткая (длиной 5 м) ОКЛЗ. Это привело к падению разрешения по скорости до ~ 10 м/с при длительности (на уровне 0,5 от максимальной мощности) импульсов не более 50 нс. Для компенсации потерь

Гришин Анатолий Иванович, старший научный сотрудник,
Матвиенко Геннадий Григорьевич, директор института.
Поляков Сергей Николаевич, старший научный сотрудник.
Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского
отделения РАН.

Россия, 634021, Томск, пл. Академика Зуева, 1.

Тел./факс (3822) 49-20-86. E-mail: aig@iao.ru

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2010 г.

мощности в короткой ОКЛЗ, коэффициент которых описывается выражением

$$P_{RW}(t) / P_{RW}(0) \cong (1-T)(10^{-0,1\epsilon_{ring} T})^{t/T_{ring}}, \quad (1)$$

где P_{RW} — мощность циркулирующей в ОКЛЗ опорной волны;

ϵ_{ring} — коэффициент внутренних потерь мощности ОКЛЗ в децибелах;

T — доля ответвляемой в ОКЛЗ мощности;

T_{ring} — временной период кольцевой задержки, в нее введен эрбиевый волоконный усилитель.

Последнее не только усложняет схему, но требует усилий предотвращения его срыва в режим самогенерации. Кроме того, временной профиль выводимой из задержки опорной волны, представляет собой последовательность пилообразных импульсов, напоминающих частоток, что неминуемо должно приводить к паразитному обогащению спектра лидарного сигнала. Во всех перечисленных работах, а именно в [1—3], форма зондирующего импульса гауссова или близка к гауссовой. В результате не обеспечивается равномерность распределения мощности сигнальной волны в разрешаемом зондируемом объеме. Это является источником дополнительной погрешности определения скорости ветра.

В данной работе авторам удалось математическим моделированием установить возможность преодоления недостатков схемы низкокогерентного доплеровского лидара с ОКЛЗ, присущее работам [2, 3].

Схема лидара

Проведенные исследования показали, что, в частности, может быть увеличена длительность зондирующих импульсов до уровня, обеспечивающего измерения скорости ветра с нижним пределом чувствительности $\sim(0,5—1)$ м/с при незначительном ослаблении опорной волны при циркуляции в ОКЛЗ (рис. 1) и, соответственно, показано отсутствие необходимости ее усиления.

Расчет затухания опорной волны в ОКЛЗ от дальности наклонного зондирования L_{prob} выполнен по формуле (1), преобразованной к виду

$$P_{RW}(L_{prob}) \cong \epsilon_{АОМ} P_{RW}(0)(1-T)(10^{-0,1\epsilon_{ring} T})^{L_{prob}/(2cT_{ring})}, \quad (2)$$

где $\epsilon_{АОМ}$ — коэффициент потери мощности в акустооптическом модуляторе.

Расчет выполнен параметром: $\epsilon_{АОМ} = 0,53$;

$\epsilon_{ring} = 0,1$ дБ; $T = 0,95$ и $0,98$; $T_{ring} = 1$ мкс.

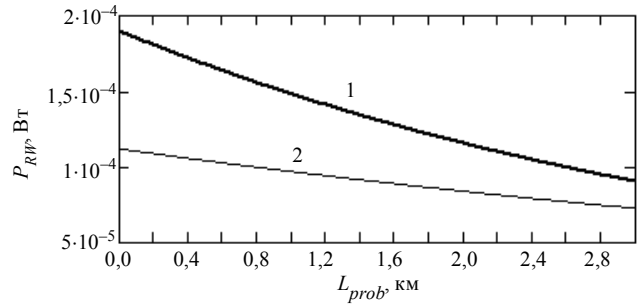


Рис. 1. Зависимости $P_{RW}(L_{prob})$: кривые 1 и 2 для случаев $T = 0,95$ и $0,98$, соответственно

Начальная мощность $P_{RW}(0) = 0,5$ мВт выбрана с учетом необходимости получения мощности опорной волны в конце интервала зондирования на уровне не менее 100—200 мкВт, который является оптимальным при детектировании сигнала доплеровского лидара когерентного лидара лавинным фотодиодом со спектральной чувствительностью 30—40 А/Вт.

Схема лидара приведена на рис. 2. Она включает схему МОРА, состоящей из иницилирующего TTL-модулируемого DFB-лазера 2 с мегагерцовой шириной спектральной линии и поддерживающего поляризацию эрбий-иттербиевого волоконного усилителя 3 с выходной мощностью до 10 Вт ($\lambda = 1550$ нм). Данная схема МОРА совместно с генератором 1 позволяет получать практически прямоугольные зондирующие импульсы с частотой повторения до 20 кГц и с энергией до 10 мкДж в единичном импульсе. Часть мощности полупроводникового лазера с распределенной обратной связью (далее DFB-лазера) отводится в ОКЛЗ 8 с временным периодом $T_{ring} = \tau_{pulse}$ и покидает ее в форме непрерывной опорной волны, которая далее сдвигается по частоте акустооптическим модулятором 10 с функцией Frequency Shifter.

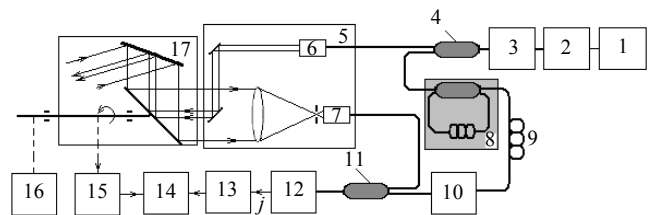


Рис. 2. Схема низкокогерентного лидара:

- 1 — генератор прямоугольных импульсов;
- 2 — TTL-модулируемый DFB-лазер; 3 — поддерживающий поляризацию эрбий-иттербиевый волоконный усилитель;
- 4 и 11 — оптоволоконные разветвители; 5 — приемопередающая оптическая антенна; 6, 7 — волоконно-сопряженные коллиimator и фокусер; 8 — ОКЛЗ, состоящий из оптоволоконных разветвителя и линии задержки; 9 — контроллер поляризации; 10 — акустооптический модулятор с функцией Frequency Shifter; 12 — фотодетектор; 13 — АЦП;
- 14 — компьютер; 15 — датчик фазы поворота; 16 — электро-механический привод; 17 — сканатор

При избранной топологии оптоволоконного тракта лидара прямоугольные зондирующие импульсы обеспечивают равномерное распределение разрешаемого зондируемого объема в отличие от случаев с гауссовыми импульсами классических когерентных лидаров в [1—3]. Это снижает погрешность определения скорости ветра, и опорная волна является квазинепрерывной и лишена "частоточной" амплитудной модуляции, характерной для схем, предложенных в [2, 3]. Кроме того, спектральному сдвигу подвергается не мощная зондирующая волна, а слабощная опорная, что позволяет многократно снизить требование к пропускной мощности АОМ и к выходной мощности питающего его генератора с соответствующим их удешевлением.

Энергетические и точностные характеристики лидара

Расчет мощности лидарного сигнала и отношения сигнал/шум (*SNR*) для случая наклонного зондирования выполним на основе известной методики расчета, описанной в работах [4, 5], адаптировав ее к рассматриваемому лидару и используя для простоты лидарное уравнение из работы [6]. При этом мощность интерференционной составляющей сигнала $j_{coh}(h, \theta)$ на выходе фотодетектора быть определена [7] выражением

$$j_{coh}(h, \theta) = 2S_{ph} \sqrt{\epsilon_{opt} P_{SW}(h \sec(\theta)) P_{RW}(h \sec(\theta))}, \quad (3)$$

где h — высота зондирования;
 θ — угол зондирования, измеряемый от вертикали;
 $P_{SW}(h, \theta)$ — мощность принимаемой сигнальной волны;
 ϵ_{opt} — коэффициент эффективности оптической системы лидара;
 S_{ph} — спектральная чувствительность фотодетектора.

При этом

$$P_{SW}(h \sec(\theta)) = 0,5G(h)A\beta_{\pi}(h)T_{atm}^2(h) \times [P_{las} - P_{RW}(h \sec(\theta))]c\tau_{pulse}h^{-2}\cos^{-2}(\theta),$$

где $G(h)$ — геометрическая функция лидара;
 A — площадь приемной апертуры;
 $\beta_{\pi}(h)$, $\text{км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ — коэффициент обратного рассеяния;
 $T_{atm}^2(h)$ — коэффициент пропускания;
 P_{las} — мощность выходных импульсов лазерной системы МОРА;
 c — скорость света.

В расчетах использовалась линейная модель убывания величины коэффициента обратного рассеяния β_{π} с высотой, описываемая выражением:

$$\beta_{\pi}(h) = \alpha_0 \gamma (1 - 3 \cdot 10^{-4} h) (550 \cdot 10^{-9} \text{ м/л}), \quad (4)$$

где α_0 — приземное значение объемного коэффициента рассеяния;

γ — нормированная индикатриса в направлении назад, $\gamma = 0,04$.

В дальнейших расчетах ограничимся тремя значениями α_0 для приземного слоя атмосферы, равными 0,028; 0,014 и $7,079 \cdot 10^{-3}$, соответствующим метеорологическим дальностям видимости 5, 10 и 20 км. Коэффициент пропускания атмосферы $T_{atm}(h \sec(\theta)) = \exp(-2h \sec(\theta) \int_0^h \alpha(z) dz)$ определим с учетом выражения (4).

При оценке *SNR* пренебрежем темновыми шумами фотодетектора, ограничившись учетом дробовых шумов, и определим его выражением [8]:

$$SNR(h \sec(\theta)) = \frac{\sqrt{2\epsilon_{opt} S_{ph} P_{SW}(h \sec(\theta)) P_{RW}(h \sec(\theta))}}{\sqrt{q \Delta\nu [\epsilon_{opt} P_{SW}(h \sec(\theta)) + P_{RW}(h \sec(\theta))]}},$$

где q — заряд электрона;

$\Delta\nu$ — ширина полосы пропускания частот фотодетектора.

Для оценки погрешности измерения горизонтальной составляющей скорости ветра δV воспользуемся методикой, описанной в [5, 10] и согласно которой δV определяется выражением

$$\delta V(h, \theta) = \lambda \sin(\theta) / (4\pi) \times \frac{\sqrt{f_{Ny} [\pi^{3/2} w + 8\pi^2 w^2 / SNR(h \sec(\theta)) + \sqrt{\pi^2 w^2 / (3 \cdot SNR^2(h \sec(\theta)))}] / T_{av}}}{},$$

где f_{Ny} — частота Найквиста;

T_{av} — время усреднения Фурье-циклограмм тока фотодетектора;

$$w = \sqrt{V_{bw}^2 + V_{atm}^2} / V_{Ny};$$

V_{Ny} — максимальная регистрируемая скорость, ограниченная частотой Найквиста f_{Ny} ;

$V_{bv} = \lambda / (2\pi \cdot \tau_{puls})$ — неопределенность измерения скорости ветра, обусловленная длительностью зондирующего импульса;

$V_{atm} = 0,4$ м/с — стандартная ошибка измерения скорости в зондируемом объеме атмосферы, обусловленная ее турбулентностью и сдвигами ветра.

Расчет $SNR(h \sec(\theta))$ и $\delta V(h, \theta)$ для значений угла зондирования $\theta = 30^\circ$ и 15° проведем для набора параметров, указанных ниже, и проиллюст-

рируем на рис. 3 дальности наклонного зондирования. Большие значения SNR и меньшие значения погрешности измерения скорости ветра (несмотря на малую выборку реализаций измерений) в сравнении с погрешностями ветрового лидара, описанного в [1], связаны с применением высокочувствительного лавинного фотодиода вместо PIN-фотодиода.

Мощность зондирующего импульса, Вт.....	$\leq 9,995$
Длина зондирующей волны, нм.....	1550
Длительность зондирующего импульса, нс....	до 1000
Число реализаций для одного направления....	10
Углы сканирования, отмеряемые от вертикали, град.....	30 и 15
Эффективность приемной оптической системы.....	0,15
Мощность, отвечаемая в ОКЛЗ, мВт.....	5
Мощность опорной волны, мВт.....	$< 0,1$
Коэффициент потерь мощности в АОМ.....	0,53
Спектральная чувствительность детектора, А/Вт.....	36
Частота Найквиста при оцифровке фототока, МГц.....	200
Значения коэффициента рассеяния в приземном слое атмосферы, m^{-1}	0,028; 0,014 и $7,079 \cdot 10^{-3}$

Заключение

Предложенная концепция ветрового доплеровского низкокогерентного метеолидара с непрерывной опорной волной, формируемой из части усиленного излучения TTL-модулируемого DFB-лазера, пропускаемого через оптоволоконную кольцевую линию задержки, позволяет:

осуществлять когерентное гетеродинирование сигнальной волны лидара с доплеровским смещением спектра во временных интервалах, не уступающих времени когерентности опорной волны и длительности зондирующего импульса;

формировать непрерывную опорную волну из части усиленного прямоугольного импульса амплитудно-модулируемого излучения непрерывного TTL-модулируемого DFB-лазера коммерческого класса.

Основным техническим результатом, достигаемым изобретением, является снижение погрешности измерений скорости ветра, снижение энергопотери при введении опорного частотного сдвига $f_{\text{АОМ}}$.

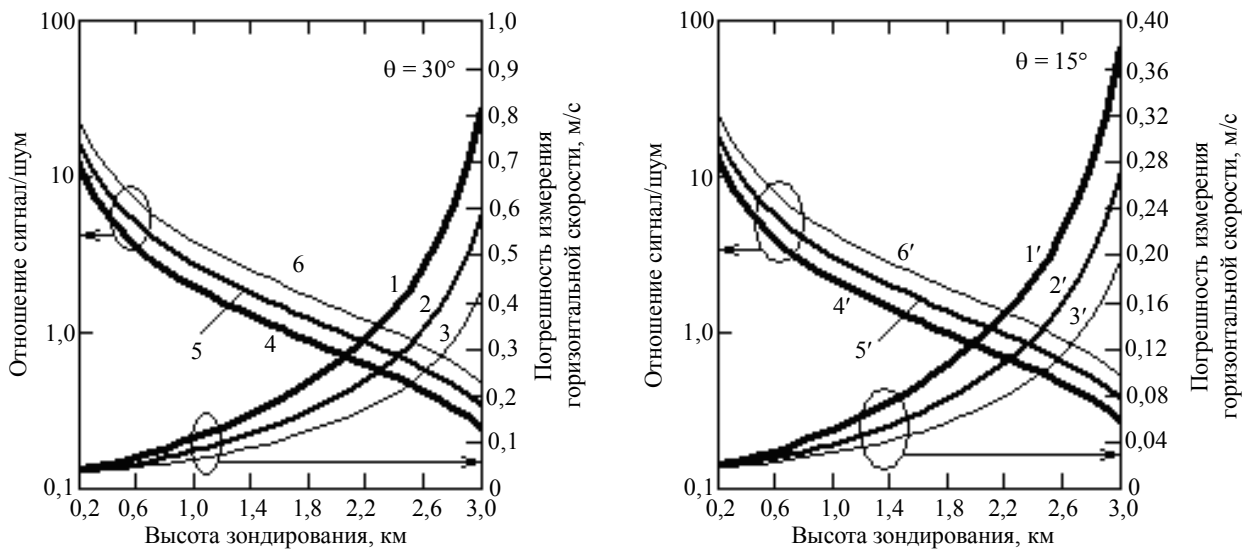


Рис. 3. Зависимости SNR (кривые 1, 2, 3 и 1', 2', 3') и погрешности измерения (кривые 4, 5, 6 и 4', 5', 6') горизонтальной скорости ветра от высоты зондирования (для $\theta = 30^\circ$ и 15°)

Литература

1. Kameyama S., Ando N., Hirano R., Wadaka S. // Appl. Opt. 2007. V. 46. No. 11. P. 1953.
2. Dorrington A. A., Künemeyer R., Danehy P. M. // Ibid. 2001. V. 40. P. 3076.
3. Shen, Jyi-Lai. // International Journal of Infrared and Millimeter Wave. 2006. V. 27. P. 753.
4. Menzies R. T., Hardesty R. M. // Proc. IEEE. 1974. V. 74. P. 449.
5. Гордиенко В. М., Путивский Ю. Я. // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. № 3. С. 284.
6. Самохвалов И. В., Копытин Ю. Д., Ипполитов И. И. и др. Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности. — Новосибирск: Наука, 1987.
7. Протопопов В. В., Устинов Н. Д. Лазерное зондирование. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1985.
8. Орлов В. М., Самохвалов И. В., Матвиенко Г. Г. и др. Элементы теории светорассеяния и оптическая локация. — Новосибирск: Наука, 1982.

All-fiber wind low-coherent Doppler meteorological lidar

A. I. Grishin, G. G. Matvienko, S. N. Polyakov

V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1 Academician Zuev square,
Tomsk, 634021, Russia
E-mail: aig@iao.ru

The concept of wind low-coherent Doppler meteorological lidar with continuous reference wave formed from part of the amplified radiation TTL-modulated DFB-laser, passed through the fiber ring delay, proposed for the first time.

PACS 42.68.Wt

Keywords: wind low-coherent Doppler meteorological lidar, fiber ring delay.

Bibliography — 8 references.

Received December 20, 2010