

# Физическая аппаратура

УДК 551.501+53.08

## Оценка возможности измерений аэрозольных и ветровых характеристик атмосферы на базе низкокогерентного лидара

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

*Впервые предложена концепция аэрозольного когерентного лидара с непрерывной опорной волной (ОВ), формируемой из излучения наносекундного лазера и наделяемой свойством мультиплицированной временной когерентности (МВК). Лидар использует одночастотный зондирующий лазер, не имеет гетеродина и совместим с ветровым доплеровским низкокогерентным лидаром с МВК опорной и сигнальной волн. Представлена оригинальная процедура восстановления мощности сигнальной волны аэрозольного лидара из хронограммы когерентной составляющей тока фотодетектора.*

PACS: 42.68.Wt

*Ключевые слова:* низкокогерентный лидар, аэрозольный лидар, мультиплицирование, оптоволоконно.

### Введение

При исследовании атмосферных характеристик на основе лидарных технологий применяются методы прямого и гетеродинного детектирования. При большей чувствительности гетеродинного приема, связанной с возможностью усиления сигнальной волны (СВ), он менее распространен в сравнении с прямым детектированием. Это связано с тем, что необходимыми условиями гетеродина в лидарах являются зондирование одночастотным лазером и применение гетеродина с длиной когерентности ( $L_{coh}$ ), не уступающей двукратной дальности зондирования ( $L_{prob}$ ). Такие лазерные системы дороги и технически сложны. Как следствие, лидары с гетеродинамированием представлены лишь семейством различающихся по потенциалу ветровых доплеровских когерентных лидаров (ВДКЛ). В них осуществляется гетеродинамирование СВ с доплеровским смещением спектра, и они являются высокоразрешающим средством получения профилей ветра с практически значимым порогом чувствительности по скорости ветра  $V_{min} = 0,5\lambda/\tau_{pulse} \sim (0,5—1)$  м/с (здесь  $\lambda$  — длина волны и  $\tau_{pulse}$  — длительность зондирующе-

го импульса), но при условии зондирования одночастотными лазерами с субмикросекундной или микросекундной длительностью генерации. При наделении ВДКЛ функцией аэрозольного лидара (АЛ) (метеорологического [1], в частности,) качество измерений характеристик атмосферного рассеяния вследствие низкого пространственного разрешения  $\Delta L_{prob}$  (где  $\Delta L_{prob} = c\tau_{pulse}/2$ ,  $c$  — скорость света) значительно уступает измерениям с прямым детектированием классическими некогерентными АЛ на основе наносекундных лазеров. Последние серийно выпускаются промышленностью, технически совершенны и давно отнесены в разряд коммерческих.

В статье представлены результаты исследования возможности наделения функцией АЛ ветровых доплеровских низкокогерентных лидаров с МВК [2, 3] опорной и сигнальной волн, концептуально определенных в работах [4—6].

### Принципы мультиплицирования

Как было показано в [4, 5], внутриволоконный импульс оптоволоконным мультипликатором (ОМ), состоящим из одних лишь пассивных волоконных элементов (рис. 1), можно преобразовать в многократно удлиненный составной внутриволоконный импульс (СВИ). В данной работе рассмотрен один из возможных вариантов топологии ОМ, а именно, на основе двух последовательных схем мультиплицирования ( $CM_1$  и  $CM_2$ ), составленных из пар оптоволоконных разветвителей (Power Combiners) с конфигурацией портов  $18 \times 1$ . При этом 18 вы-

Гришин Анатолий Иванович, старший научный сотрудник.  
Матвиенко Геннадий Григорьевич, директор.

Поляков Сергей Николаевич, старший научный сотрудник.  
Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева  
Сибирского отделения РАН.

Россия, 634021, г. Томск, ул. Акад. Зуева, 1.  
Тел. (3822) 49-20-86. E-mail: psnsib@iao.ru

Статья поступила в редакцию 25 августа 2010 г.

ходных портов впереди идущего разветвителя  $CM_1$  или  $CM_2$  подключены к 18 входным портам следующего за ним разветвителя через волоконные линии задержки с константами времени  $\Delta t_i^{(1)} = \Delta t_0^{(1)} + (i-1)T_{frag}$  ( $i = \overline{1, 18}$ ) для  $CM_1$  и  $\Delta t_j^{(2)} = \Delta t_0^{(2)} - \Delta t_0^{(1)} + (j-1)18T_{frag}$  ( $j = \overline{1, 18}$ ) для  $CM_2$ .

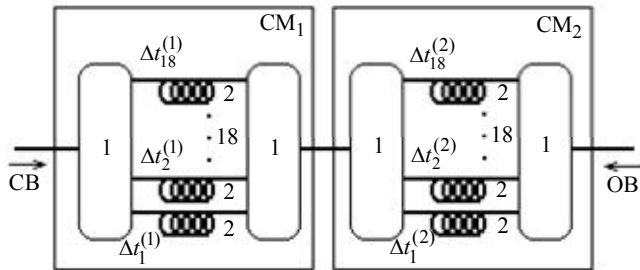


Рис. 1. Схема оптоволоконного мультипликатора для получения СВИ:

1 — оптоволоконные разветвители с конфигурацией портов  $1 \times 18$ ; 2 — волоконные линии задержки;  $CM_1$  и  $CM_2$  — первая и вторая схемы мультиплицирования

В результате длительность мультиплицируемого импульса увеличивается до  $18^2 T_{frag}$ . В частности, при придании СВИ длительности  $\tau_{mfp} = 1024$  нс (для удобства применения процедуры быстрого Фурье-преобразования) длительность мультиплицируемого фрагмента должна составлять величину  $T_{frag} = 3,16$  нс. Это относится как к импульсу, выделяемому из зондирующей волны (ЗВ) для формирования опорной волны (ОВ) длительностью  $\tau_{pulse}$ , так и к фрагменту СВ той же длительности, рассматриваемому в качестве изолированного прямоугольного импульса. При условии, что длительность фрагмента  $T_{frag}$ , выделенного для формирования ОВ, составляет менее 0,7 от длительности зондирующего импульса, СВИ принимает форму прямоугольного импульса [2, 3]. При этом СВИ, сформированным из излучения СВ и ОВ, придается свойство МВК, которое предполагает, что произвольные волновые фронты СВИ в интервале  $[t, t + \tau_{mfp}]$   $M$ -кратно (где  $M$  — коэффициент мультиплицирования при избранной топологии ОМ, равный  $18^2$ ) с периодом  $T_{frag}$  воспроизводят в своей структуре соответствующий им волновой фронт исходного импульса. Комплексные амплитуды СВИ  $E_{mfp}$  могут быть описаны [2, 3] выражением:

$$E_{mfp}(t) \sim M^{-1} \Pi(t, \tau_{mfp}) \times \sum_{n=1}^{N_{frag}} A[(n-1)T_{frag} + \xi(t - nT_{frag})] \exp\{2\pi i \nu_n t\},$$

где  $\Pi(t, \tau_{mfp})$  — функция единичного временного окна длительностью  $\tau_{mfp}$ ;

$A[(n-1)\tau_{frag} + \xi(t - nT_{frag})]$  — временное распределение амплитуды исходной лазерной волны в пределах когерентного цуга, отстоящего от начала генерации на  $\Delta t = nT_{frag}$ ;

$\nu_n$  — частота этого же цуга (она же частота соответствующей фрагментарной компоненты СВИ),  $\xi(t) = (t / \tau_{pulse}) - (t \div \tau_{pulse})$ ;

$(\div)$  — оператор целочисленного деления.

Таким образом, СВИ состоит из параллельно существующих компонент, каждая из которых сформирована излучением следующих друг за другом фрагментов как исходного лазерного импульса длительностью  $T_{frag} \leq \tau_{coh}$  (где  $\tau_{coh}$  — время когерентности), так фрагмента СВ длительностью  $T_{frag}$ . Результатом детектирования сигнала доплеровского лидара будет многокомпонентный фототок, и все его фрагментарные компоненты будут характеризоваться одним и тем же Фурье-спектром, несмотря на дрейф частоты излучения зондирующего лазера.

Необходимо заметить, что свойство МВК не увеличивает лимитируемую лазером временную когерентность СВ и ОВ, волоконно-смешанных и интерферирующих на приемной апертуре фотодетектора, но создает условия для когерентного детектирования лидарного сигнала. При работе лидара в режиме АЛ мультиплицировать СВ нет необходимости. Достаточно того, что благодаря гетеродинному приему происходит ее усиление. Кроме того, обусловленное мультиплицированием удлинение фрагментов СВ привело бы к ухудшению пространственного разрешения.

### Описание лидара

Принципиальная схема лидара, сочетающего функции аэрозольного и ветрового, приведена на рис. 2. В лидаре непрерывная ОВ формируется из зондирующей с помощью кольцевого волоконного резонатора (КОР) 4, ОМ 8 и волоконно-сопряженного акустооптического модулятора (АОМ) 11 с функцией Frequency Shifter, осуществляющего частотный сдвиг ОВ. Временной период КОР  $T_{ring} = MT_{frag}$  равен длительности СВИ  $\tau_{mfp}$ , формируемых в ОМ. Благодаря этому на выходе КОР формируется непрерывная ОВ, обладающая свойством МВК. Зондирующий импульс не пропускается через оптоволоконный тракт и, таким образом, не повреждает его, что позволяет реализовать его в одномодовом варианте, не приводящем к снижению когерентности зондирующего излучения. Разрешение скорости ветра  $V_{min} = 0,5\lambda / \tau_{mfp}$  лимитируется микросекундным интервалом спектральной обработки фототока при детектировании

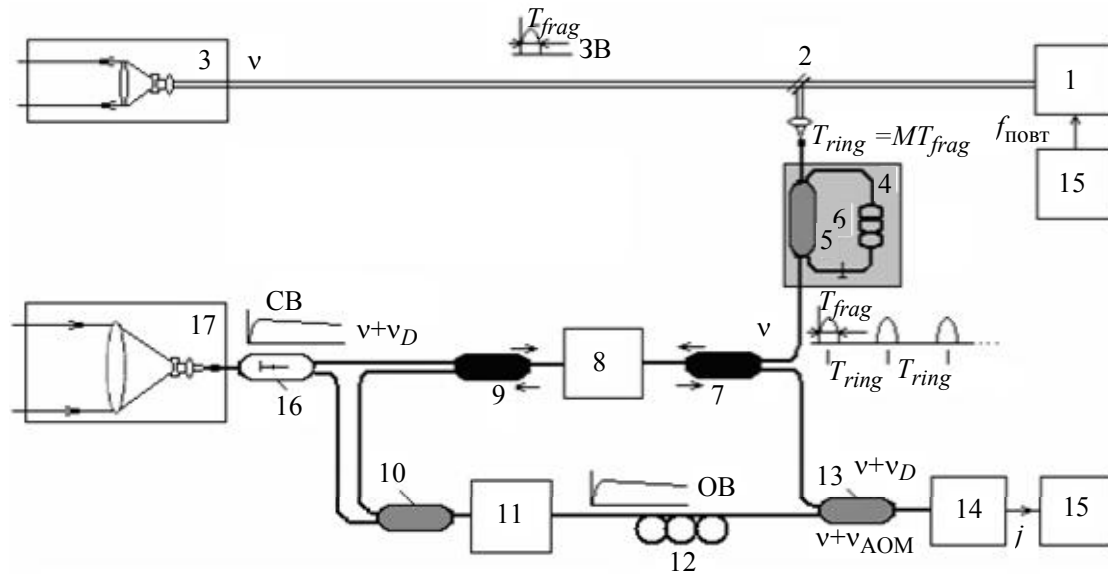


Рис. 2. Принципиальная схема ВДКЛ МВК опорной и сигнальной волн с функцией аэрозольного лидара:

- 1 — лазер с наносекундной длительностью генерации; 2 — светоделитель; 3 — передающая оптическая антенна;
- 4 — кольцевой волоконный резонатор; 5, 10 и 13 — оптоволоконные разветвители; 6 — оптоволоконная задержка;
- 7 и 9 — направленные оптоволоконные разветвители (циркуляторы); 8 — оптоволоконный мультипликатор;
- 11 — акустооптический модулятор с опцией Frequency Shifter; 12 — контроллер поляризации; 14 — фотоприемник;
- 15 — блок обработки, включающий широкополосный усилитель, аналого-цифровой преобразователь и компьютер;
- 16 — оптоволоконный переключатель каналов; 17 — приемная оптическая антенна; оптические антенны;
- $\nu_D$  — доплеровская частота;  $\nu_{AOM}$  — частота акустооптической модуляции;  $\nu$  — несущая оптическая частота

мультиплицированной СВ, ограниченного сверху длительностью СВИ. Для переключения лидара в режим АЛ (но с гетеродинированием СВ, при котором когерентная составляющая фототока пропорциональна двойному произведению интенсивностей ОВ и СВ) используется волоконный переключатель каналов 16, направляющий СВ на фотоприемник, минуя ОМ.

### Процедура восстановления мощности сигнальной волны аэрозольного лидара

При обработке сигнального фототока АЛ используется стандартная процедура вычисления коэффициентов уравнения регрессии  $\text{sinfit}$  для синусоиды вида  $a \cdot \sin(x+b)+c$ . При этом в произвольном интервале оцифрованного фототока  $[t, t+\Delta t_{rec}]$  ( $\Delta t_{rec} \sim 3-5$  периодов биения) удается с точностью до 2—3 % восстановить амплитуду этого биения, отфильтровав шумы. Частота биения  $\nu_{sign} = \nu_{AOM} \pm \nu_D$  и его фаза не восстанавливаются (в этом нет необходимости). При этом пространственное разрешение  $\Delta L = 0,5 c \Delta t_{rec}$  и при  $\nu_{AOM} = 50$  МГц составляет величину от 9 до 15 м. Рис. 3 иллюстрирует одну из возможных реализаций процесса восстановления. Для зашумления моделируемого лидарного сигнала использовался датчик случайных чисел с равномерным распределением плотности вероятности. Отношение сигнал/шум (SNR)

составляло величину 2, отношение частоты аналого-цифрового преобразователя к частоте биения сигнала — 4.

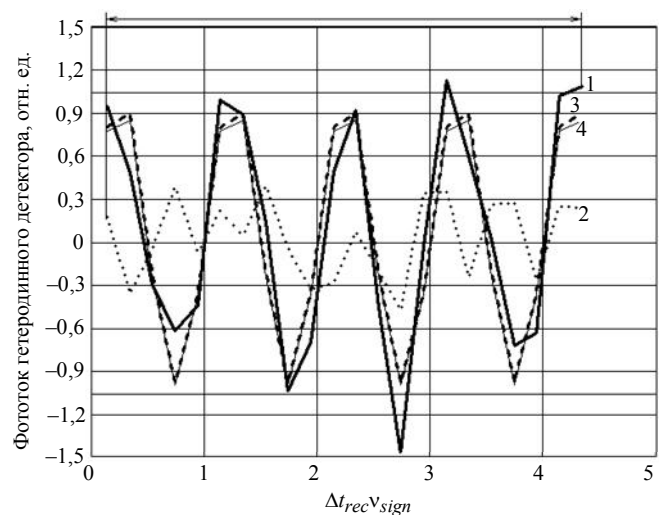


Рис. 3. Восстановление амплитуды протектированного биения когерентной составляющей фототока лидара вычислением коэффициентов уравнения регрессии для синусоиды:

- 1 — зашумленное оцифрованное биение;
  - 2 — равномерно распределенная шумовая компонента;
  - 3 — восстановленный оцифрованный сигнал;
  - 4 — оцифрованное биение в отсутствие шума.
- Коэффициент корреляции кривых 1 и 3 — 0,937, погрешность восстановления — 2,16 %

**Заключение**

Основные результаты работы сводятся к следующим положениям.

1. Впервые сформулирована концепция низкокогерентного аэрозольного лидара с мультиплицированием ОВ.

2. Лидар совместим с коммерческими одночастотными наносекундными лазерами.

3. Предложен и промоделирован оригинальный алгоритм восстановления сигнала аэрозольного короткоимпульсного когерентного лидара.

4. Лидарная схема исключает прохождение мощного зондирующего излучения по волоконному тракту.

5. Оптический тракт лидара реализуем на основе одномодовых волоконных элементов даже при высокой энергетике зондирующего лазера.

**Литература**

1. Grund C. J., Banta R.M., George J. L., Howell J. N., Post M. J., Richter R. A., Weickmann A. M.// Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2001. V. 18. No. 3. P. 376.

2. Пат. 2 338 223 РФ 2008. Способ формирования мультиплицированной временной когерентности оптической волны и устройство для его осуществления. Патентообладатель: Институт Оптики Атмосферы СО РАН, авторы: Г. Г. Матвиенко, С. Н. Поляков, В. К. Ошлаков.

3. Matvienko G. G., Polyakov S. N., Oshlakov V. K.// Laser Physics. 2007. V. 17. No. 11. P. 1327.

4. Matvienko G. G., Polyakov S. N., Oshlakov V. K.// Ibid. 2008. V. 18. No. 11. P.1246.

5. Матвиенко Г. Г., Поляков С. Н., Ошлаков В. К.// Прикладная физика. 2009. № 1. С. 115.

6. Пат. 2365942 РФ 2009. Способ определения скорости рассеивающего пространственно распределенного объекта и доплеровский низкокогерентный лидар для его осуществления/Патентообладатель: Институт Оптики Атмосферы СО РАН, авторы: Г. Г. Матвиенко, С. Н. Поляков, В. К. Ошлаков.

## **Estimation of an opportunity of measurements of aerosol and wind characteristics of an atmosphere on base low coherent lidar**

*A. I. Grishih, G. G. Matvienko, S. N. Polyakov*

V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, SB RAS, 1 Academician Zuev square, Tomsk, 634021, Russia

E-mail: psnsib@iao.ru

*For the first time, the concept aerosol coherent lidar with the continuous reference wave (the RW) formed of radiation of the ns-laser and provided with multiple time coherence (MTC) property is offered. The lidar uses the single-frequency probing laser, has no heterodyne and it is compatible with wind Doppler low coherent lidar with MTC of the reference and signal waves. Original procedure of restitution of capacity of an signal wave of aerosol lidar from chronogram of coherent component of a current of the photodetector is described.*

PACS: 42.68.Wt

*Keywords:* low-coherent lidar, aerosol lidar, multiplication, fiber.

Bibliography — 6 references.

*Received August 25, 2010*

\* \* \*