

Г.И. Ильин, О.Г. Морозов, Ю.Е. Польский

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЧМ-ЛИДАРА С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЧАСТОТЫ

Представлены оценки возможностей ЛЧМ-лидаров с преобразованием частоты, реализующих различные методы контроля окружающей среды. Обсуждаются принципы построения и пути улучшения метрологических характеристик непрерывных лидаров.

1. Введение

ЛЧМ-лидары находят все большее количество приложений в исследованиях структуры и динамики естественной атмосферы, а также для контроля присутствия и распределения в ней различных искусственных загрязняющих образований. Это объясняется хорошо известными факторами: принципом энергетической эквивалентности импульсных и непрерывных лидаров, возможностью получения выигрыша в разрешающей способности по дальности и стоимости технической реализации ЛЧМ-схемы. В последнее время появилось несколько работ [1–3], посвященных разработке принципов построения многоцелевых ЛЧМ-лидаров, предназначенных для реализации различных методов зондирования атмосферы (дифференциального поглощения, дифференциального поглощения и рассеяния, лазерно-индуцированной флуоресценции) и функционирующих в режимах прямого и гетеродинного детектирования сигналов обратного рассеяния. Отличительной особенностью каждой из схем лидаров является метод модуляции частоты и получения двухчастотного излучения: перестраиваемый с помощью пьезокерамических зеркал и переключателя длин волн CO_2 -лазер [1], амплитудный электрооптический модулятор на кристалле Ge и два He–Ne-лазера, генерирующих на близких переходах [2], электрооптический преобразователь одночастотного когерентного излучения в двухчастотное на кристалле метаниобата лития [3]. В [3] показаны преимущества использования электрооптического преобразователя частоты, разработанного нами [4], и приведены структурная схема и оценки технических характеристик возможной реализации ЛЧМ-лидара.

В настоящей статье приведены результаты дальнейших исследований ЛЧМ-лидара с преобразованием частоты.

2. Возможности лидаров с преобразованием частоты

Для проведения высокоточных лидарных измерений необходимы: высокая воспроизводимость длин волн лазерного излучения и их разностной частоты, а также стабильность и равенство энергий излучения на обеих частотных составляющих. Кроме того, при исследовании тонких и сверхтонких структур спектров поглощения требуется возможность плавной перестройки частот излучения по заданному закону и с заданной скоростью. Выполнение указанных выше требований возможно при использовании в качестве двухчастотного лазерного излучателя широкодиапазонного электрооптического устройства преобразования одночастотного когерентного излучения в двухчастотное [3, 4] и набора одночастотных непрерывных лазеров. Представленное в [3] устройство является фактически преобразователем с диапазоном перестройки до $0,04 \text{ см}^{-1}$ и рабочим диапазоном длин волн от $0,4$ до $4,5 \text{ мкм}$. При реализации метода преобразования частоты [4] на электрооптическом модуляторе типа МЛ-8 возможно получение перестраиваемого лазерного излучения в диапазоне $10,6 \text{ мкм}$ с диапазоном перестройки $0,02 \text{ см}^{-1}$. Наличие мощного теплоотвода кристалла Ge в модуляторе позволит увеличить диапазон перестройки до $0,1\text{--}0,2 \text{ см}^{-1}$.

Поскольку полуширины линий поглощения атмосферных газов в приземном слое атмосферы [5] имеют значения порядка $0,01\text{--}0,1 \text{ см}^{-1}$, а требуемое для практически неискаженной

записи их контура разрешение не хуже $0,001 - 0,01 \text{ см}^{-1}$, то преобразователь частоты может найти широкое применение для построения лидаров на дифференциальном поглощении или для измерения поглощения на длинных трассах. При этом определенный выигрыш может быть достигнут и при проведении интегральных измерений.

Напомним, что в [3] приведены энергетические характеристики возможной реализации лидара в режимах прямого и гетеродинного детектирования, а также даны технические характеристики для реализации ЛЧМ: при максимальной дальности зондирования $R = 2 \text{ км}$ девиация частоты F_d составила 15 МГц , а полоса пропускания $\Delta f - 2 \text{ МГц}$.

Значение полосы пропускания для режима гетеродинирования хорошо согласуется с данными [5]. Частотная стабильность газовых инфракрасных лазеров такова, что ширина полосы сигнала биений между излучением передатчика и гетеродина меньше 1 МГц даже для систем, работающих на длинных трассах. Уширение за счет рассеивающей среды в атмосферной турбулентности обычно также не больше 1 МГц . Если рассеивающей средой является атмосферный аэрозоль, то сильные ветры могут вызвать частотные сдвиги в несколько мегагерц, что было нами учтено при оценке избирательности лидара по скорости движения объектов зондирования.

В случае прямого детектирования полоса пропускания системы определяется однозначно значением девиации частоты.

2.1. Режим прямого детектирования

Интегральные измерения. В этом случае ЛЧМ-режим реализуется с предварительным разнесом двух частотных составляющих на величину f_0 , равную нескольким мегагерцам, которая будет определять центральную частоту избирательного усилителя промежуточной частоты. Таким образом осуществляются измерения с переносом спектра сигнала обратного рассеяния в область с минимальным уровнем шумов фотоприемника. Контроль дальности производится путем измерения разности частот модулирующего ЛЧМ-сигнала и сигнала с выхода промежуточного усилителя приемно-регистрающей системы, а контроль параметра атмосферы – по уровню мощности принятого сигнала на измеренной частоте.

Не вдаваясь в физическую природу явлений, можно сказать, что при прямом детектировании собственные шумы приемников излучения преобладают над фоновыми и определяют пороговую мощность принимаемого сигнала. Выигрыш по отношению сигнал-шум можно вычислить с помощью следующего выражения:

$$G = \int_0^{\Delta f} S(f) df / \int_{f_0 - \Delta f}^{f_0 + \Delta f} S(f) df, \quad (1)$$

где $S(f)$ – спектральная плотность шума фотоприемника. При этом выигрыш будет определяться в основном различной природой и уровнем шумов в различных частотных диапазонах, несмотря на увеличение требуемой полосы пропускания. Для диапазона $\{0, \Delta f\}$ – это токовые шумы с распределением вида $1/f$ и другие мощные шумы низкочастотной природы, для диапазона $\{f_0 - \Delta f, f_0 + \Delta f\}$ – это дробовой шум малой интенсивности.

Для трасс малой протяженности, требующих полос пропускания приемно-регистрающей системы в диапазоне $100 \text{ кГц} - 1 \text{ МГц}$, выигрыш по чувствительности может составить $1 - 2$ порядка.

Дифференциальные измерения. В этом случае предварительный разнос частот определяется настройкой на выбранную линию поглощения. Одна составляющая должна находиться внутри контура поглощения измеряемого газа, а вторая – вне его. С учетом максимального диапазона перестройки частоты в $0,04 \text{ см}^{-1}$ полуширина линии измеряемого газа не должна превышать $0,005 - 0,01 \text{ см}^{-1}$, а длина трассы зондирования $1 - 2 \text{ км}$. Тогда при реализации ЛЧМ-режима сохранится настройка частот зондирующего двухчастотного излучения на контур линии поглощения, а погрешность измерения будет содержать составляющую, определяемую в идеальном случае лоренцевской формой контура поглощения.

В ближнем инфракрасном диапазоне разделить в пространстве или во времени составляющие двухчастотного излучения, полученные с помощью рассматриваемого преобразователя частоты, невозможно. Поэтому лидар дифференциального поглощения и рассеяния, работающий в режиме прямого детектирования, должен содержать в своей структуре сканирующую

ший интерферометр Фабри–Перо, устанавливаемый перед фотоприемником для частотно-временного разделения сигнала обратного рассеяния. В диапазоне 10,6 мкм разделение осуществимо с помощью дифракционной решетки. Это позволяет реализовать классическую схему ЛЧМ-лидара дифференциального поглощения и рассеяния.

Доплеровские измерения. Симметричная структура спектра сигнала зондирования приводит к одинаковому по величине и знаку доплеровскому смещению частоты обеих спектральных составляющих. В режиме интегральных измерений наличие доплеровского сдвига не проявляется, и лидар работает на постоянной промежуточной частоте f_0 . В случае дифференциальных измерений следует учесть, что для одной частотной составляющей доплеровское приращение совпадает по знаку с ЛЧМ-приращением, а для другой – противоположно. Это дает нам возможность регистрации доплеровских сдвигов практически в режиме прямого детектирования по методу первой или второй производной.

2.2. Режим гетеродинного детектирования

В [3] показано преимущество режима гетеродинного детектирования перед режимом прямого детектирования, которое по мощности минимально регистрируемого сигнала составляет 3 – 4 порядка. Поэтому основное внимание в данной статье авторы сосредоточили на вопросах когерентного гомодинного и гетеродинного обнаружения доплеровских сдвигов, обусловленных мощными турбулентными или ветровыми движениями.

Гомодинное обнаружение. Один из возможных вариантов реализации лидара может быть построен на базе одного лазера с оптическим разделением излучения на канал одночастотного гетеродина и канал формирования двухчастотного зондирования. При отсутствии доплеровского сдвига на фотосмеситель поступит сигнал обратного рассеяния на двух частотах W_n и W_v , определяемых законом ЛЧМ в момент времени t , и расположенный симметрично относительно них сигнал гетеродина W_0 . При наличии доплеровского смещения симметрия нарушается, как показано на рис. 1, поскольку частоты составляющих сдвигаются на частоту Доплера W_d и принимают значения, равные W'_n и W'_v . При этом на выходе фотосмесителя мы получим два сигнала на частотах $W_n - W_d$ и $W_v + W_d$. Подав далее эти сигналы на электронный квадратичный детектор, на его выходе получим сигнал с удвоенной частотой Доплера. Сигнал о прозрачности атмосферы с заданной дальности может быть выделен перед квадратичным детектором с помощью анализатора спектра, настроенного в момент времени t на удвоенную частоту модуляции $W_m = 2W_n = 2W_v$.

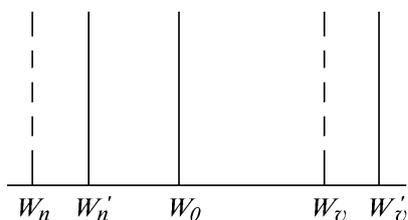


Рис. 1. К обнаружению частоты Доплера

Гетеродинное обнаружение. При доплеровских измерениях мощных ветровых движений полоса пропускания лидара должна быть увеличена на несколько сот килогерц или единицы мегагерц. В этом случае значительно упадет отношение сигнал-шум приемно-регистрирующей системы лидара. Одним из путей его увеличения является применение второго, более мощного лазера. Необходимую мощность гетеродина можно определить из выражения [5]

$$P > A / [\hbar F_0 (D^*)^2], \quad (2)$$

где A – площадь поперечного сечения фотосмесителя; \hbar – постоянная Планка; F_0 – частота излучения лазера; D^* – обнаружительная способность.

Однако применение второго лазера приводит к появлению проблемы биений между излучением передатчика и гетеродина. Величина биений, определяемая значениями в области 1 МГц, будет определять основную погрешность измерения доплеровской частоты. Поскольку

проявление биений и доплеровского сдвига в обрабатываемом сигнале одинаково, для компенсации первых нами было предложено создать в оптической схеме лидара дополнительный канал фотосмещения излучения внешнего гетеродина и двухчастотного передатчика. Выделенный аналогично доплеровскому сигнал биений далее учитывается при обработке результатов измерений. Создание подобного канала в когерентных системах без преобразования частоты ограничено в силу высокого уровня шумов фотосмесителя и других шумов низкочастотной природы.

3. Экспериментальный макет ЛЧМ-лидара с преобразованием частоты

Макет ЛЧМ-лидара (рис. 2) обеспечивал регистрацию атмосферных неоднородностей на расстоянии до 100 м при отношении сигнал-шум не менее 10. Источником зондирующего излучения и внешним гетеродином служили два He-Ne-лазера типа ЛГН-207 с мощностью непрерывного излучения 2 мВт. Преобразование частоты излучения осуществлялось в устройстве, разработанном на базе электрооптического модулятора МЛ-5. Приемная оптика была построена на базе объектива МТО-1000А с фокусным расстоянием 1 м и диаметром 100 мм. В качестве фотоприемного устройства измерительного канала и канала компенсации биений использовалось ФЭУ-84, с выходов которых сигнал поступал на два канала обработки, состоящих из анализатора спектра и детектора. Продетектированный сигнал преобразовывался в цифровую форму с помощью АЦП 1113ПВ1 и передавался для обработки в ПЭВМ типа IBM PC AT 386.

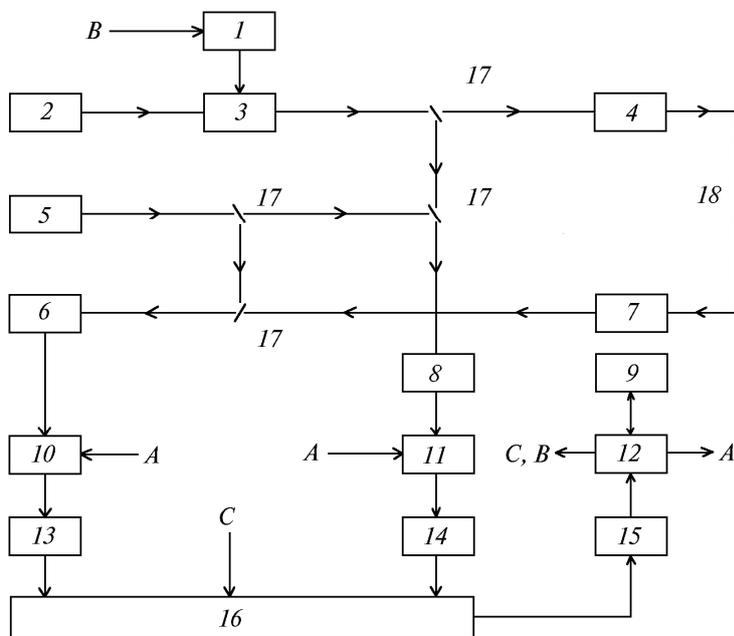


Рис. 2. Экспериментальный макет ЛЧМ-лидара. 1 – ЛЧМ-генератор; 2 – лазер; 3 – двухчастотный преобразователь; 4 – коллиматор; 5 – гетеродин; 6 – ФЭУ измерительного канала; 7 – телескоп; 8 – ФЭУ компенсационного канала; 9 – ПЭВМ; 10, 11 – анализаторы спектра; 12 – интерфейс; 13, 14 – детекторы; 15 – АЦП; 16 – мультиплексор; 17 – система полупрозрачных зеркал; 18 – зондируемое образование

4. Заключение

Таким образом, нами показана возможность создания ЛЧМ-лидаров с преобразованием частоты, реализующих различные методы зондирования атмосферы, на базе электрооптического двухчастотного излучателя. Приведенные оценки и экспериментальные результаты подтверждают реальность их создания и определяют пути улучшения их метрологических характеристик.

1. Гордов Е. П., Хмельницкий Г. С. // 1 Межрес. симп. «Оптика атмосферы и океана»: Тезисы докл. Ч. 2. Томск: ТНЦ СО РАН, 1994. С. 44–45.
2. Агишев Р. Р., Айбатов Л. Р., Польский Ю. Е. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 11–12. С. 1624–1629.

3. Ильин Г.И., Морозов О.Г., Польский Ю.Е. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 12. С. 1871–1874.
4. Ильин Г.И., Морозов О.Г., Польский Ю.Е. // IX Всесоюз. симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы: Тезисы докл. Ч. 2. Томск: ТФ СО АН СССР, 1986. С. 314–317.
5. Лазерный контроль атмосферы / Под ред. Э. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.

Казанский государственный технический университет
им. А.Н. Туполева

Поступила в редакцию
2 июля 1996 г.

G.I. Il'in, O.G. Morozov, Ju.E. Pol'sky. **Explorations of Frequency Transformed LFM-lidar.**

The possibilities of frequency transformed LFM-lidars, which offer different ways of environment monitoring, are estimated. Principles of the CW-lidars design and ways of their metrological characteristics improvement are discussed.