

А.П. Годлевский, Е.П. Гордов, А.И. Жилиба, П.П. Шарин

ДОПЛЕРОВСКИЙ ЛИДАР С ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫМ ПРИЕМОМ НА CO₂-ЛАЗЕР

Изучаются возможности доплеровского лидара с внутриврезонаторным приемом на CO₂-лазер как в лабораторных измерениях, так и в открытой атмосфере. Зарегистрированы колебания с амплитудой до 50 мкм естественного отражателя, удаленного на расстояние 500 м.

Исследование параметров движущихся объектов доплеровским лидаром (ДЛ) проводится обычно с использованием гетеродинной схемы приема [1]. Наряду с этим развивается другая версия сверхчувствительного приема эхо-сигнала ДЛ на основе когерентного лазерного приема (ЛП) [2]. В работе [3] сообщается о лабораторной реализации ДЛ с приемом на YAG:Nd³⁺-лазер. В настоящей статье приводятся результаты использования ДЛ с приемом на CO₂-лазер как в лабораторных измерениях, так и в реальной атмосфере на дистанции до 500 м.

1. Суть ЛП в системе ДЛ заключается в том, что анализируемый эхо-сигнал направляется обратно в резонатор лазера, где происходит его смещение с полем внутри резонатора. Это позволяет при определенных условиях довольно существенно подняться над шумами фотоэлектронной схемы. Основные особенности динамики генерации такого приемопередатчика описываются моделью лазера с выносным зеркалом [2], в качестве которого в нашем случае используется отражающая поверхность.

$$\dot{I} = - \left(C - \frac{\kappa}{1 + \beta I} - \alpha \cos \Omega t \right) I, \quad (1)$$

где I — безразмерная интенсивность поля в резонаторе лазера; C — резонаторная ширина; κ , β — коэффициенты линейного усиления и насыщения активной лазерной среды; α — характеризует потери на трассе, обусловленные неполным отражением поверхности, рассеянием, поглощением на участке, «выходное зеркало CO₂-лазера — отражающая поверхность». Значение α зависит также от того, какая часть возвращаемой в лазер волны согласована с модой резонатора. Разумеется, для CO₂-лазера кроме уравнения (1), описывающего динамику лазера моделью Лэмба [4], необходимо было бы привлечь уравнение для населенности рабочих уровней. Однако это дополнение не меняет интерпретации полученных экспериментальных данных. Зависимость доплеровского сдвига частоты Ω от скорости движения отражающей поверхности вдоль оптической оси приемопередатчика v имеет вид

$$\Omega = \frac{4\pi v}{\lambda}. \quad (2)$$

В процессе колебания отражающей поверхности v периодически изменяется в интервале $0 \div v_{\max}$. Соответственно изменяется интенсивность внутри резонатора, а именно появляется модуляция, которая имеет вид повторяющихся структур. В поворотной точке колебательного движения поверхности, когда $v = 0$, движение меняет направление. Согласно (1) в этот момент биений отсутствуют. Интервал между срывами биений соответствует полупериоду колебания поверхности $T/2$. Амплитуда колебаний выражается в виде $x(t) = \int_0^{T/2} v(t) dt$ или $x(t) \approx \bar{v} \frac{T}{2}$, где \bar{v} — средняя скорость за полупериод.

Принимая это во внимание, а также соотношение (2), представим x в виде $x = \frac{T \lambda}{T_D} \frac{\lambda}{2}$ (3), где T_D —

период доплеровской модуляции интенсивности. Используя (2) и (3), находим x и v из полученных осциллограмм. Заметим, что (1) и (3) неприменимы, когда период доплеровской модуляции становится сравнимым или меньше времени релаксации поля в резонаторе $\sim C^{-3}$, тогда лазер не успевает реагировать на быстроизменяющееся воздействие. Максимальная скорость, которую можно зарегистрировать, определяется из соотношения $v_{\max} = \frac{\lambda}{2} \nu^{\max}$. Для CO₂-лазера $\nu^{\max} \sim 10^8$ Гц, значит $v_{\max} = 530$ м/с. Другим фактором, ограничивающим пределы измерения амплитуды и скорости, являются флуктуации коэффициента показателя преломления атмосферы, которые приводят к флуктуациям оптической длины трассы. Если характерное время этих флуктуаций сравнимо с периодом доплеровского сигнала, то даже при неподвижной отражающей мишени будут иметь место биения интенсивности. Известно, что в атмосфере без осадков временной масштаб турбулентности T_0 порядка

10^{-3} с, а с осадками — 10^{-4} – 10^{-5} с [5]. Для регистрации минимальных колебаний необходимо уменьшить влияние турбулентности за счет увеличения скорости движения мишени. При скоростях $v > 5,3 \cdot 10^{-3}$ м/с в условиях атмосферы без осадков и $v > 5,3 \cdot 10^{-2}$ м/с с осадками влиянием атмосферной турбулентности можно пренебречь. Подробно вопрос о точности и чувствительности ДЛ с ЛП будет обсуждаться в следующей работе.

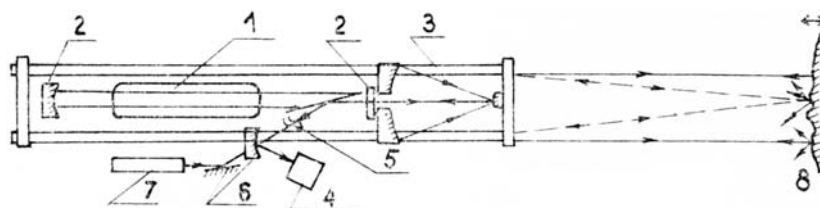


Рис. 1. Оптическая схема доплеровской лидарной установки: 1—газоразрядная трубка CO_2 -лазера; 2—зеркала лазерного резонатора; 3—телескоп Кассегрена; 4—фотоприемник (ФСГ-22-3А); 5—оптические ослабители; 6—поворотные зеркала; 7—котировочный He-Ne-лазер; 8—мишень

2. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Эта установка состоит из CO_2 -лазера, приемопередающей оптической системы и аппаратуры регистрации сигналов. В непрерывном CO_2 -лазере с выходной мощностью 18 Вт (Р(20), $\lambda = 10,6$ мкм) использовалась газоразрядная трубка с длиной разрядного промежутка $l \sim 120$ см. Резонатор лазера типа Фабри—Перо длиной 130 см образован медным сферическим зеркалом (радиус кривизны 3 м) и плоским полупрозрачным зеркалом из германия. Для селекции поперечных мод внутри резонатора устанавливалась ирисовая диафрагма. Стабилизация интенсивности лазера достигалась уменьшением внешних механических возмущений резонатора путем размещения газоразрядной трубки и всех оптических элементов установки, включая приемопередающую систему на одном каркасе из инваровых стержней диаметром 2 см, снижением нестабильности теплоотвода от активной среды и стабилизацией тока питания газоразрядной трубки. С помощью стабилизатора обеспечивалось поддержание заданного тока в диапазоне от 4 до 35 мА с точностью до 1% и снижение уровня пульсаций до 0,2%. Оптическая система для передачи и приема излучения представляла собой телескоп Кассегрена с апертурой главного зеркала 15 см и фокусным расстоянием 70 см. Точная наводка и фокусировка на исследуемый объект осуществлялась соответственно тонкой юстировкой главного зеркала и изменением положения вторичного зеркала вдоль оптической оси телескопа. Часть лазерного пучка, отраженная от окна газоразрядной трубки, фокусировалась сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 5 см на фотоприемник (ФСГ-22-3А). Сигнал с фотоприемника исследовался с помощью осциллографа, анализаторов спектра РОВОТРОН-01012 и СК-4-56. Кроме того, выходной сигнал фотоприемника подавался через усилитель звуковой частоты на головной телефон. Следует подчеркнуть удобство такого измерения выходного излучения лазера для настройки «на слух» оптических элементов системы, для установки оптимального уровня возбуждения лазера и обнаружения объекта исследования.

3. Измерения проводились как в лабораторном помещении на расстоянии 3 м, так и в открытой атмосфере на расстоянии 20, 110 и 500 м. В качестве мишени использовались предметы с различными отражательными способностями. Они подвергались вибрации с помощью мощной динамической головки, усилителя и генератора звуковых частот. Плавная регулировка частоты и амплитуды колебаний позволяла получить доплеровский сигнал в диапазоне частот от 1 до 20 кГц. Для наблюдения медленных колебаний с большой амплитудой был использован имитатор линейно движущегося объекта [6]. Он представлял собой спираль Архимеда, изготовленный из дюралевого листа. При равномерном реверсивном вращении вокруг оси спираль имитировала возвратно-поступательное движение поверхности. При нормальном падении световой волны на такую поверхность отраженная волна приобретает доплеровский

сдвиг частоты, равный $\frac{\lambda}{2}(r_{\max} - r_{\min})f$, где r_{\max} , r_{\min} — соответственно максимальный и минимальный

радиусы спирали; f — частота вращения вала спирали. На рис. 2, а приведена типичная осциллограмма биений интенсивности лазера, полученная при отражении от гармонически колеблющейся алюминиевой фольги с частотой 100 Гц. Расстояние от лазерной системы до отражателя 20 м. Нижний луч — напряжение, пропорциональное закону движения отражателя. Видно, что биения представляют собой частотно-модулированный сигнал без несущей частоты, которая пропорциональна скорости движения мишени. Действительно, на вершинах синусоиды, когда скорость равна нулю и поверхность меняет направление движения на противоположное, наблюдаются срывы биений. Интервал между срывами биений соответствует половине периода колебаний мишени. Общее число полос в этом интервале указывает на амплитуду колебаний в единицах половины длины волны лазера. Таким образом, приведенная осциллограмма показывает на колебание объекта с частотой 100 Гц и максимальной амплитудой 26,5 мкм. Доплеровская частота порядка $\sim 2,5$ кГц указывает на максимальную скорость отражателя, равную — 1,32 см/с. В качестве примера регистрации медленных колебаний с большой амплитудой на рис. 2, б приведена осциллограмма, иллюстрирующая 5-миллисекундный фрагмент доплеровского сигнала от имитатора. Общее

число полос, равное 45 за время наблюдения, указывает на амплитуду перемещения, равную $\sim 0,25$ мм. Скорость движения порядка $\sim 4,8$ см/с.

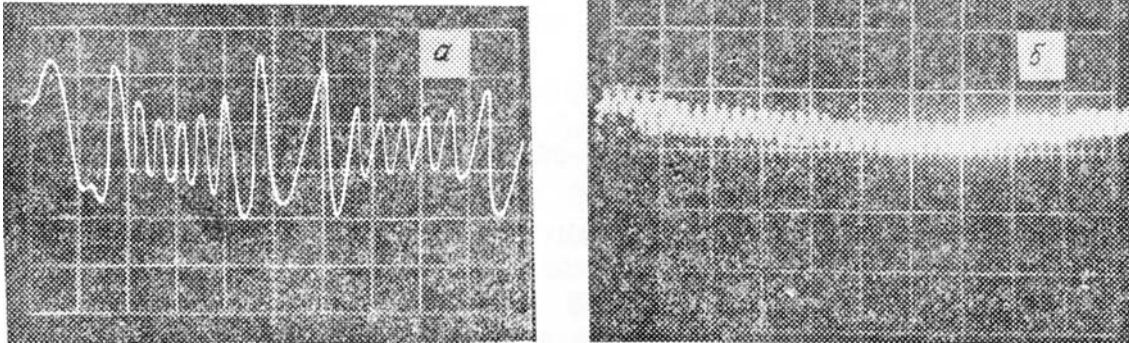


Рис. 2. Осциллограммы биений интенсивности лазера: *a* — от алюминиевой фольги, колеблющейся с частотой 100 Гц (верхний луч) и напряжения, пропорционального закону движения фольги (нижний луч). Развертка — 1 мс/дел, горизонтальный масштаб — 100 мВ/дел; *b* — от имитатора линейно движущегося объекта (5-миллисекундный фрагмент доплеровского сигнала). Развертка — 0,5 мс/дел, горизонтальный масштаб — 20 мВ/дел. Расстояние от лазерной системы до объекта — 20 м

В следующей серии лабораторных опытов, состоявшей из многочисленных измерений амплитуды доплеровского сигнала от отражателя, колеблющегося с постоянной частотой и амплитудой порядка 10 изучалась зависимость амплитуды биений от мощности излучения, возвращаемой в лазер. В этих опытах телескоп убирался, ослабление излучения осуществлялось с помощью мишеней с известным коэффициентом отражения. На рис. 3 приведена зависимость нормированной амплитуды сигнала от эффективного коэффициента отражения мишени. Как видно из графика, амплитуда биений пропорциональна квадратному корню из мощности отраженного излучения. Минимально обнаруженное значение мощности было равно $4,0 \cdot 10^{-13}$ Вт/Гц^{1/2}.

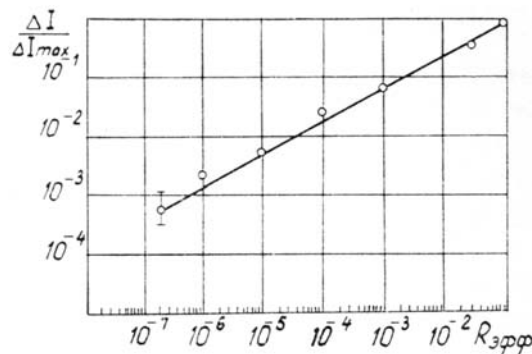


Рис. 3. Зависимость нормированной амплитуды доплеровского сигнала от эффективного коэффициента отражения, характеризующего значение возвращаемой в лазер мощности

Атмосферные исследования включали измерения ослабления сигнала и флуктуации сигнала. Результаты измерений отношения сигнал-шум (ОСШ) от 7 объектов с различными коэффициентами отражения и степенью шероховатости, расположенных на расстоянии 3, 110 и 500 м от лазерной системы, представлены в таблице. Уровень шумов фиксировался перекрытием лазерного пучка после телескопа. Диаметр коллимированного пучка на мишени на расстоянии 110, 500 м был около 18 и 28 м соответственно. Угол падения лазерного пучка на мишень относительно нормали к ее поверхности не контролировался, однако можно утверждать, что во всех измерениях он не превышал 30° (в обеих плоскостях). Из таблицы видно, что на расстоянии 3 м ОСШ коррелирует с отражательной способностью мишени, достигая максимума при отражении от металлических поверхностей с зеркальным и зеркально-диффузным отражением. Падение ОСШ с расстоянием от алюминиевого отражателя составило $\sim 0,044$ дБ/м, тогда как от двух других металлических мишеней с неровными поверхностями было в среднем $\sim 0,07$ дБ/м. Ослабление сигнала от остальных мишеней с диффузным отражением достигало значения порядка $\sim 0,14$ дБ/м. При фокусировке пучка на дюралевый лист, расположенный на расстоянии 110 и 500 м ОСШ увеличивалось соответственно в 15 и 9 раз по сравнению со значениями, измеренными с коллимированным пучком. В целом значительно большее ослабление сигнала, чем при квадратичном ослаблении, возможно, связано с увеличением размера пучка и изменением влияния неровностей с расстоянием.

Зависимость отношения сигнал-шум от расстояния до мишени

Мишень	ОСШ, (дБ)		
	Расстояние, м		
	1	110	500
Алюминиевое зеркало	93—96	63—65	32
Дюралюминиевая плита с грубо обработанной поверхностью	63	42	20
Неровная алюминиевая фольга	67	29—32	15
Деревянная поверхность	40	22	9
Бумажный картон	43	20	—
Наждачная бумага ($d > 1$ мм)	32	19	—
Наждачная бумага ($d < 1$ мм)	30	15—16	—

На рис. 4,а приведена осциллограмма доплеровского сигнала от дюралевой мишени с шероховатой поверхностью, колеблющейся с частотой 45 Гц. Мишень расположена на расстоянии 110 м от лазерной системы.

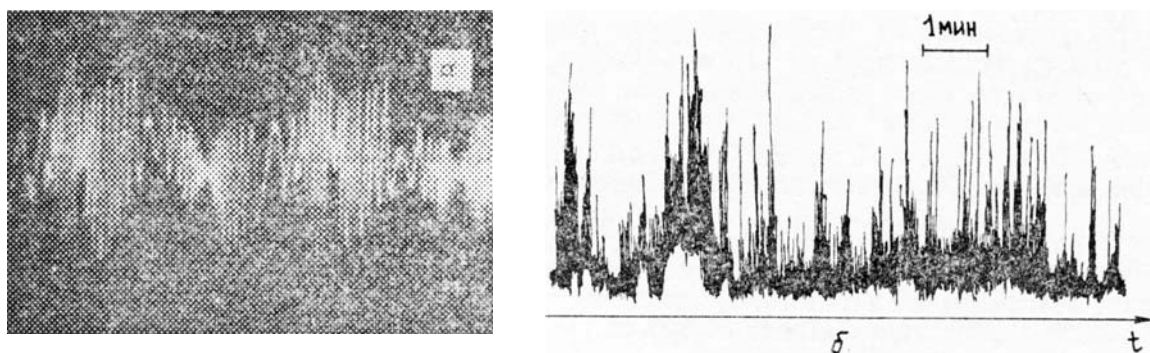


Рис. 4. Осциллограмма локационного эхо-сигнала: а — от дюралевой мишени, расположенной на расстоянии 110 м от лазерной системы. Развертка — 5 мс/дел, горизонтальный масштаб — 10 мВ/дел; б — от качающегося под действием движения воздуха дюралевой мишени

Наблюдаемые сильные временные вариации амплитуды доплеровского сигнала обусловлены двумя эффектами — вариацией спекл-структуры на мишени и турбулентностью атмосферы. Из рис. 4,а видно, что частота вариации, вызываемая этими эффектами, значительно меньше, чем доплеровская частота, которая в данном случае порядка 1,3 кГц. Глубина модуляции доходила до 80%. Более слабые низкочастотные вариации амплитуды сигнала с глубиной модуляции до 20% наблюдались при отражении от зеркальной мишени. По-видимому, они обусловлены турбулентностью атмосферы. Наряду с измерением амплитуды и скорости отражающей поверхности, движущейся под действием регулярных возмущений, регистрировался доплеровский сигнал от предметов, качающихся от ветра. На рис. 4,б приведена запись огибающей доплеровского сигнала от алюминиевого листа, подвешенного на расстоянии 110 м от лазерной системы. Ширина полосы электрического тракта была 0,5—1 кГц. Наблюдаемые сильные флуктуации сигнала в большей степени обусловлены дезориентацией отражающей поверхности объекта относительно оптической оси лазерного пучка из-за значительной доли зеркальной составляющей отражения, чем уходом частоты сигнала за ширину полосы электрического тракта. При тех же условиях флуктуации сигнала от мишени из дерева, имеющей широкую диаграмму отражения, были значительно меньше.

Таким образом, основной результат использования ДЛ с ЛП заключается в регистрации колебаний топографических объектов с амплитудой 50 мкм, удаленных на расстоянии до 500 м в атмосфере. Это оказалось возможным, благодаря стабилизации интенсивности CO_2 -лазера, высокой динамической чувствительности и помехозащищенности ДЛ с ЛП.

Авторы благодарят А.В. Хачатуряна за техническую помощь при проведении экспериментов.

1. Протопопов В. В., Устинов Н. Д. Лазерное гетеродинамирование. //Под ред. Н.Д. Устинова. М.: Наука, 1985. 288 с.
2. Gordov E.P., Godlevskii A.P., Popugovskii Ya.Ya. et al. //Appl. Opt. 1987. V. 26. № 9. P. 1607–1611.
3. Бураков С. Д., Годлевский А. П., Останин С. А. //Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 2. С. 206–210.
4. Lamb W. E. Jr. //Phys. Rev. 1964. V. 134A. P. 1429–1450.
5. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 277 с.
6. Ремизов С. А., Старченко А. Н. //Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 9. С. 1870–1872.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
20 сентября 1989 г.

A.P. Godlevskii, E.P. Gordov, A.I. Zhiliba, P.P. Sharin. **Doppler Lidar with the CO₂-Laser Intracavity Detection of Radiation.**

Capabilities of the use of a Doppler lidar with the CO₂-laser intracavity detection of radiation in the laboratory and atmospheric experiments are investigated in the paper. Vibrations of a natural reflector with the amplitude of 50 μm have been recorded with such a lidar at a distance of 500 m.