

В.Г. Гольдорт¹, Е.П. Гордов², В.Н. Ищенко¹, А.А. Ковалев¹,
Г.А. Коганов³, М.М. Макогон⁴, Х. Рутт⁵, Р. Шукер³

Двухволновый непрерывный автодинный СО₂-лидар

¹ *Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

² *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия*

³ *Физический факультет университета Бен-Гуриона, г. Бер-Шева, Израиль*

⁴ *Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия*

⁵ *Факультет электроники и компьютерных наук Саутгемптонского университета, Великобритания*

Поступила в редакцию 25.01.2005 г.

Излагаются итоговые результаты, полученные при выполнении гранта ИНТАС № 99-822. Рассматривается автодинный лидар с новой версией двухчастотной лазерной системы на базе непрерывных СО₂-лазеров. Приведены результаты моделирования на основе решения полуклассических лазерных уравнений, адаптированных к дальности зондирования до 300 км, а также оценки чувствительности лидара, выполненные по феноменологической модели применительно к более чем 20 загрязняющим газам. Описаны лазер, созданный на основе специально разработанного автодинного лазера с улучшенными характеристиками, а также методика проведения экспериментов по определению его характеристик. Результаты выполненных предварительных экспериментов удовлетворительно согласуются с оценками.

Введение

Автодинный эффект в лазерах состоит в возникновении автоколебаний при введении в резонатор части генерируемого излучения (отраженного, например, от лоцируемого объекта), так что в этом случае лазер является не только источником, но и эффективным приемником слабого излучения [1–3].

Основные принципы функционирования параметрических автодинных лидаров изложены в [4] и кратко могут быть сформулированы следующим образом. Излучение непрерывнодействующего лазера с изменяемой во время генерации частотой направляется оптической системой лидара в сторону удаленного отражателя (строения, лес, неровности рельефа). Отразившееся от него излучение тем же телескопом направляется в резонатор лазера. Взаимодействие генерируемой и возвращенной в резонатор волн приводит к периодическому изменению мощности генерации, причем частота возникающей модуляции отражает расстояние до отражателя, а амплитуда — потери на трассе. По сути дела, в такой постановке лидар является внутррезонаторным лазерным спектрометром [5].

Полученные в ходе теоретических и экспериментальных исследований результаты показывают, что использование лазера для приема его возвращенного сигнала позволяет не только регистрировать крайне низкие световые потоки (например, в СО₂-лазере достигнута пороговая чувствительность 10^{-17} Вт/Гц^{1/2} [4]), но и определять оптические (в том числе и поляризационные [6, 7]) свойства удаленного отражателя и характеристики его движения с помощью одной и той же аппаратуры. Это де-

лает автодинный лидар перспективным средством для дистанционного зондирования атмосферы и земной поверхности. Высокая чувствительность автодинных лидаров и отсутствие необходимости согласования волновых фронтов посылаемого и принимаемого излучения (лазерный резонатор делает это «автоматически») позволяют надеяться на разработку лидаров этого типа для авиационных и космических систем.

В то время как физика непрерывных автодинных лазеров достаточно ясна [2,3], об импульсных лазерах этого сказать в настоящее время нельзя. Лазерные локаторы на импульсных лазерах весьма удобны для многих приложений, так как определение расстояния до объектов сводится к простым измерениям времени задержки возвращенного сигнала, а малая длительность импульсов даже при высокой их энергии (до 10 Дж) позволяет не опасаться проявления нелинейных взаимодействий в атмосфере.

Положительные особенности обоих подходов могут быть объединены в гибридном лазере [8, 9], в котором непрерывная и импульсная секции с активной средой помещены в общий резонатор. Такая конфигурация используется для усиления и гетеродинамирования принимаемого эхосигнала, вводимого в резонатор, на фиксированной продольной моде. Серия лабораторных и атмосферных экспериментов показала существенное усиление эхосигнала [8].

Физической причиной такого усиления в гибридном лазере, содержащем импульсную и непрерывно работающую секции, является запас энергии, сохраняющийся в обеих секциях после генерации импульса. Это означает, в частности, что для эхосигнала, возвращающегося перед восстановлением

полной инверсии в непрерывной секции, последняя работает как усилитель ниже порога самовозбуждения. Экспериментально установлено, что усиление составляет от одного до трех порядков величины в зависимости от времени задержки эха. Ранее было показано [8], что такой режим имеет место, пока в импульсной секции существует так называемый «хвост» импульса (до 10–100 мкс) и после восстановления генерации непрерывной секции (около 1 мс). Численное моделирование [10] показывает хорошее согласие с экспериментальными результатами для задержек менее 10 мкс. Более детально физика автодинных лазеров и их использование для зондирования параметров среды и объектов описаны в [11–13].

Первые результаты, полученные космическими лидарами [«LITE» (НАСА) и «БАЛКАН» (ИОА СО РАН)], показали большой потенциал их использования при наблюдении Земли. В настоящее время имеется ряд проектов космических лидаров, предназначенных для определения характеристик атмосферы и земной поверхности, важных для метеорологических приложений и контроля окружающей среды. Однако исследователи, главным образом, полагаются на традиционные лазеры, используемые только как передатчики, что ограничивает потенциальные выгоды от их применения. В то же время достигнутая в лабораторных экспериментах чувствительность делает автодинный лидар вполне подходящим и для таких применений.

В предлагаемой статье изложены результаты трехлетней работы в рамках гранта ИНТАС № 99-822, посвященные разработке новой версии CO₂-лазера для автодинного лидара, установлению минимально обнаружимых сигналов, оценке возможности использования лидара для контроля содержания в атмосфере загрязняющих газов методом дифференциального поглощения (ДИАЛ).

Макет параметрического автодинного лидара с двухволновой CO₂-лазерной системой

Применение метода дифференциального поглощения для контроля содержания газовых компонентов атмосферы предполагает использование лазерной системы, одновременно (или в близкие моменты времени) генерирующей на двух длинах волн, одна из которых находится в области центра линии поглощения, а другая — в области крыла линии; на первой длине волны поглощение максимально, на второй — минимально. Возможности использования метода дифференциального поглощения применительно к параметрическому автодинному CO₂-лидару для осуществления газоанализа атмосферы экспериментально и теоретически изучались в [7, 14–17].

В отличие от [6, 12], где двухчастотная работа лазера была реализована на одной лазерной трубке, нами была разработана лазерная система, которая базируется на двух CO₂-лазерах, работающих в непрерывном одномодовом режиме и независимо перестраиваемых по линиям генерации в области 940–

1087 см⁻¹ [23]. Частоты излучения лазеров стабилизировались, что крайне необходимо для достижения высокой чувствительности измерений методом ДИАЛ [18].

На базе этой системы была собрана лабораторная установка автодинного лидара. В качестве передающей и принимающей оптики использовался телескоп по схеме Кассегрена. В процессе калибровочных экспериментов, выполненных по топографическим целям (кирпичная стена на расстоянии 40 м и лес в 200 м), на пути зондирующего луча помещалась ячейка длиной 2 см с этиленом переменного давления. В этих экспериментах использовались лазерные переходы P(14) (коэффициент поглощения в этилене 31 см⁻¹/атм) и P(18) (низкое поглощение в этилене) полосы 0001–1000. В качестве сигнала лидара принималась амплитуда колебаний интенсивности излучения вблизи момента максимальной скорости движения зеркала резонатора.

Близкое к линейному (рис. 1) поведение калибровочных кривых в зависимости от давления этилена было зарегистрировано для обеих целей.

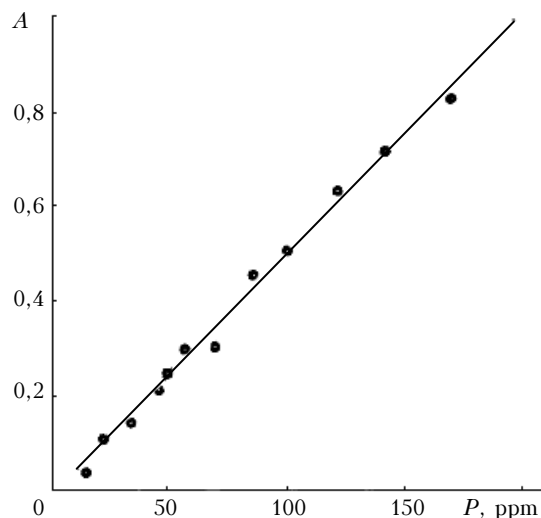


Рис. 1. Зависимость нормированного лидарного сигнала от концентрации этилена в кювете; отражатель — кирпичная стена

Пересчет полученного результата на слой газа L_T (в общем случае не совпадающем с длиной трассы зондирования L) толщиной 20 м показывает, что для минимального измеренного нормированного сигнала величиной 0,03 пороговая чувствительность автодинного лидара составит около 6 ppb, что неплохо согласуется с расчетами, приведенными в табл. 2 (см. ниже), и практически совпадает с определенной ранее [14].

Моделирование работы автодинного лидара

Ранние теоретические и экспериментальные исследования лазера-автодина были нацелены, главным образом, на понимание внутренних процессов в лазерах. В [19, 20] был представлен подход, позволивший аналитически выразить такие параметры

атмосферы, как концентрация газов и расстояние до отдаленной цели, по экспериментально измеренным величинам.

Была рассмотрена модель параметрического автодинного лидара, основанного на двухуровневой лазерной схеме. Малая отражательная способность удаленного зеркала (обычно 10^{-9} в реальных экспериментах) позволила получить аналитические решения на основе теории возмущений.

Вывод соответствующих уравнений, так же как процедура получения их приближенных решений, описаны в [19, 21]. Влияние поглощения атмосферы между лазерным локатором и отражателем на величину поля в резонаторе учтено путем дополнительного уменьшения эффективного коэффициента отражения выходного зеркала:

$$R'_0(t) = R_0 + \exp(-2\sigma CL)(1 - R_0)^2 \times \\ \times R_2 \cos\left[\frac{\omega\tau}{l}a(t) + \varphi\right], \quad (1)$$

где R_0 – коэффициент отражения выходного зеркала; R_2 – коэффициент отражения удаленного отражателя; C – концентрация находящегося по пути зондирования газа с сечением поглощения σ ; ω – частота лазерного излучения; τ – время прохождения сигнала до удаленного отражателя и обратно; l – длина резонатора; $a(t)$ – закон модуляции длины резонатора лазера; φ – начальная фаза.

Искомая концентрация C находится как функция амплитуд биений на плотном (X_1) или выходном (Y_1) зеркале:

$$C = \frac{1}{2\sigma L} \ln \frac{1}{X_1} A, \quad C = \frac{1}{2\sigma L} \ln \frac{1}{Y_1} B. \quad (2)$$

Коэффициенты A и B зависят как от параметров лазерного локатора, так и от невозмущенных величин X_0 или Y_0 , которые определены на соответствующем зеркале; выражения для A , B , X и Y приведены в [19].

Измеренная частота появляющихся биений интенсивности ν_b для пилообразной модуляции длины резонатора (ν_b^{\max} для гармонической модуляции) позволяет вычислить расстояние L до цели:

$$L = l \frac{\pi \nu_b^{\max}}{4\Omega} \frac{\lambda}{a_0} \quad \text{и} \quad L = \frac{l \nu_b \lambda}{2 \Omega a_0} \quad (3)$$

(a_0 и Ω – амплитуда и частота колебаний зеркал).

Уравнение (2) позволяет также оценивать ожидаемую частоту биений. Предположим, например, что намечено проводить исследования до расстояния 10 км с CO_2 -лидаром, длина резонатора которого составляет 60 см, а зеркало колеблется на частоте 1 кГц с амплитудой 1 мкм. Тогда следует ожидать частоту биений приблизительно 12,6 МГц. Отметим, что в каждом конкретном случае (и это особенно важно при зондировании на больших расстояниях) выбор параметров модуляции должен проводиться таким образом, чтобы частота биений не выходила за пределы полосы пропускания резонатора.

Фактически уравнения (1)–(3) представляют собой решение обратной задачи дистанционного зондирования. Сравнивая две модуляционные схемы, следует заключить, что гармоническая модуляция имеет два очевидных недостатка. Первый заключается в том, что в этом случае приходится иметь дело с короткими интервалами времени вблизи момента прохождения зеркалом точки равновесия, чтобы отфильтровать максимальную частоту биений ν_b^{\max} , в то время как при пилообразной модуляции частота биений фиксированна и нет необходимости иметь дело с широким спектром сигнала. Второй (вероятно, меньший) недостаток состоит в том, что максимальная частота биений ν_b^{\max} при гармонической модуляции выше, чем постоянная частота ν_b при пилообразной модуляции (считаем, что a_0 и Ω идентичны в обоих случаях).

Это различие, однако, может стать важным, когда нужно измерить очень большие расстояния. Действительно, отношение этих частот

$$\nu_b^{\max} / \nu_b = \pi / 2. \quad (4)$$

Например, если расстояние L около 300 км, $a_0 = 0,2$ мкм и частота колебания зеркала 0,25 кГц, то $\nu_b^{\max} \approx 30$, а $\nu_b \approx 19$ МГц.

Необходимо отметить также, что в точке изменения направления движения зеркала резонатора при пилообразной модуляции имеет место сбой фазы колебаний интенсивности излучения лазера (рис. 2, а, б), что может осложнить усреднение сигнала.

Пример численного решения для сигнала автодинного лазерного локатора при гармонической модуляции показан на рис. 2, в. Это решение хорошо соответствует реальным сигналам, наблюдаемым в ходе экспериментов [14, 22], и позволяет оптимизировать функционирование лазерного локатора.

Учтем то обстоятельство, что в действительности концентрация C анализируемого газа при зондировании по вертикали может быть не постоянна по трассе зондирования. Согласно барометрической формуле плотность воздуха экспоненциально уменьшается, поэтому приемлемо ввести тот же самый тип зависимости для содержания газов, которые хорошо перемешаны в атмосфере, например метана. Для более тяжелых газов можно также использовать экспоненциальную зависимость, но с другим значением пространственного масштаба β . Чтобы принять во внимание новую закономерность ослабления сигнала в газе, необходимо использовать следующую формулу вместо выражения (1):

$$R'_0 = R_0 + \exp\left\{-\frac{2\sigma C_0}{\beta}(e^{-\beta a} - e^{-\beta L})\right\} \times \\ \times (1 - R_0)^2 R_2 \cos\left[\frac{\omega\tau}{l}a(t) + \varphi\right]. \quad (5)$$

Заметим, что коэффициент $\exp(-\beta a)$ равен 1 с очень хорошей точностью, потому что амплитуда колебаний зеркала около 1 мкм, что при масштабе $1/\beta$ от нескольких метров до нескольких километров дает $\beta a \sim 10^{-9} - 10^{-6}$. Поэтому выражение для R'_0 упрощается:

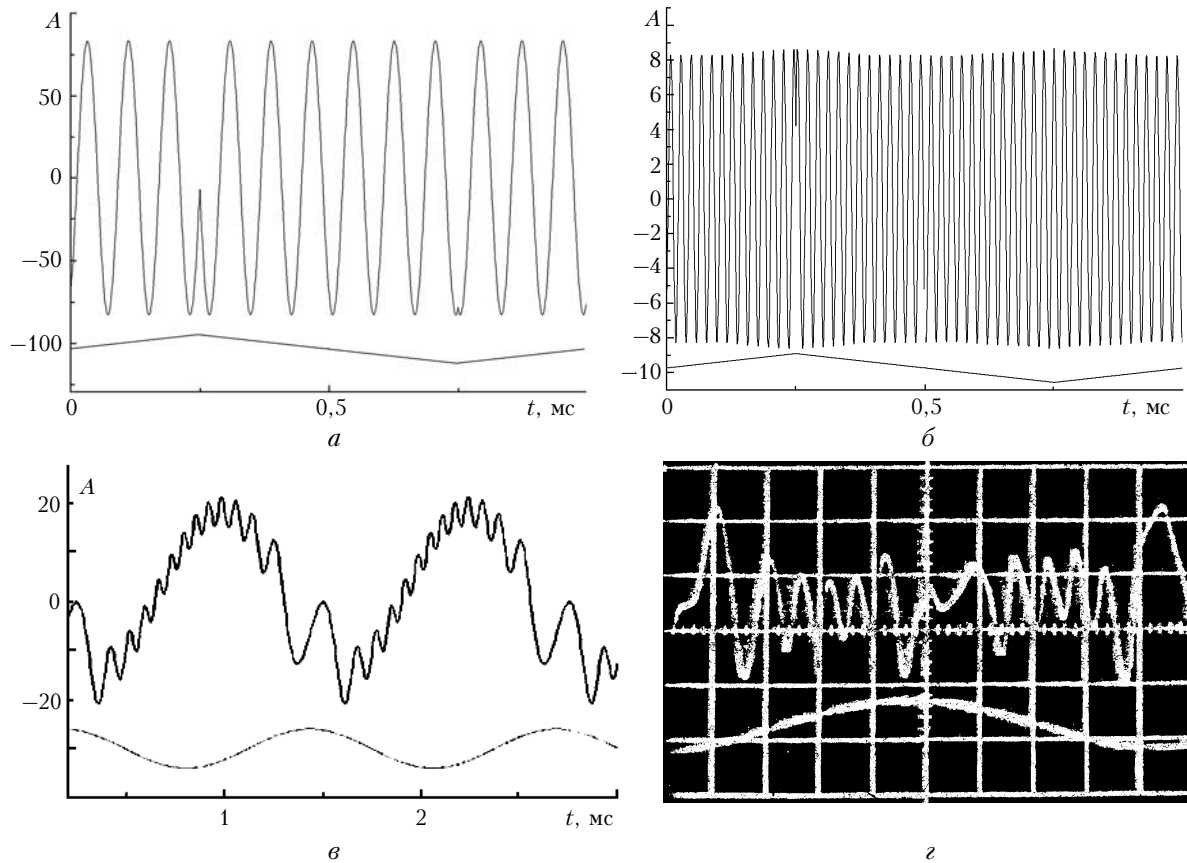


Рис. 2. Примеры численных вычислений (а–в) и экспериментальная запись сигнала биений (г). Нижняя кривая отображает положение зеркала резонатора, верхняя – сигнал лидара в произвольных единицах; частота модуляции 1 кГц (а, б), и 250 Гц (в, г), дальность зондирования 10 (а) и 40 м (б, г)

$$R'_0 = R_0 + \exp\left\{-\frac{2\sigma C_0(1 - e^{-\beta L})}{\beta}\right\} \times (1 - R_0)^2 R_2 \cos\left[\frac{\omega\tau}{l}a(t) + \varphi\right]. \quad (6)$$

Сравнивая его с (1), видим, что учет уменьшения содержания газа с высотой привел к появлению коэффициента $\exp\{-2\sigma C_0(1 - e^{-\beta L})/\beta\}$ в уравнении (6) вместо $\exp(-2\sigma CL)$ в уравнении (1). Так как для однородной трассы CL равно числу $N_{\text{однор}}$ поглощающих молекул на единицу сечения пучка, а для неоднородной трассы то же самое число $N_{\text{неод}}$ равно $C_0(1 - e^{-\beta L})/\beta$, то из сравнения (1) и (6) следует, что амплитуды биений зависят, как и следовало ожидать, только от числа поглощающих молекул и не зависят от их распределения по трассе.

В зависимости от высотного распределения поглощающих молекул (величина β) и высоты L расположения лазерного локатора (это может быть высота полета носителя) имеют место следующие варианты:

1. Однородно перемешанный газ. В этом случае β известно и концентрация газа C_0 вблизи поверхности может быть легко определена.

2. Рассматриваемый газ является одним из загрязняющих веществ и находится в тонком слое неизвестной ширины. В этом случае лидарные измере-

ния могут дать только полное число поглощающих молекул по трассе зондирования.

3. Зондирование газа ведется со спутника. В этом случае $\beta L \gg 1$ и может быть определено общее количество поглощающих молекул независимо от высоты полета. Высота полета только изменит пороговую чувствительность измерения [17].

Оценка чувствительности измерений концентрации загрязняющих газов

Автодинный лидар на CO_2 -лазере является хорошей системой для дистанционных измерений концентрации загрязняющих атмосферу газов методом дифференциального поглощения, поскольку многие из них имеют полосы поглощения в районе 9–11 мкм.

Минимально измеримая концентрация газа C_{min} может быть рассчитана по формуле, полученной на основе [14]:

$$C_{\text{min}} = \frac{\kappa}{2\Delta\sigma L_1(1 - R_0)} \sqrt{\frac{h\nu\Delta f R_0}{P_0 r_{\text{эф}}}} \zeta, \quad r_{\text{эф}} \approx T_{\text{тр}}^2 \frac{A S_{\text{т}}}{\pi L^2}, \quad (7)$$

где κ – параметр накачки лазера; $\Delta\sigma$ – разность между коэффициентами поглощения на частотах зондирования, $\text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$; h – постоянная Планка; ν – частота лазерного излучения; Δf – ширина полосы

пропускания электронного тракта; P_0 – внутриврезонаторная мощность генерации; ξ – заданное отношение сигнала к шуму; $r_{эф}$ – эффективное отражение изучаемой поверхности; $T_{тр}$ – пропускание оптического пути между излучателем и приемником; A – альbedo отражателя (топографического объекта или подстилающей поверхности); S_T – площадь приемного телескопа. В табл. 1 и 2 приведены значения C_{min} (ppb в табл. 1, ppm в табл. 2) для ряда газов; при оценках было принято, что $\kappa = 0,36$, $R_0 = 0,85$, $P_0 = 10$ Вт, $S_T = 80$ см², $\xi = 10$, $T_{тр} = 0,1$, $A = 0,04; 0,5$, $L_T = 20$ м.

Для вертикальной трассы (рис. 3) $\Delta f = v/(H\Delta\theta)$ без поперечной развертки и $\Delta f = vs/(H\Delta\theta)^2$ с разверткой (v – скорость движения носителя; H – вы-

сота его полета; $\Delta\theta$ – расходимость пучка; s – ширина полосы развертки).

Заключение

На основе теоретического описания автодинного лазерного локатора были выявлены возможности определения методом дифференциального поглощения концентраций ряда загрязняющих веществ и парниковых газов. Рассмотрены следующие случаи: зондирование по горизонтальной трассе, зондирование приземных слоев с авиационного носителя с высоты 1 и 5 км как с поперечным, так и без поперечного сканирования, а также зондирование со спутника.

Таблица 1

Газ	Параметр лазерного излучения			$\Delta\sigma$	C_{min}	
	Полоса	Переход	Частота, см ⁻¹		$A = 0,04$	$A = 0,5$
CFCl ₃	00 ⁰ 1–02 ⁰	R(22)	1079,85	29,2	0,176	0,050
CF ₂ Cl ₂	00 ⁰ 1–10 ⁰	P(32)	932,96	35,7	0,133	0,038
C ₂ H ₄	00 ⁰ 1–10 ⁰	P(14)	949,48	31	0,155	0,044
C ₂ HCl ₃	00 ⁰ 1–10 ⁰	P(20)	944,19	12,6	0,380	0,108
C ₂ H ₃ Cl	00 ⁰ 1–10 ⁰	P(22)	942,38	8,8	0,544	0,154
C ₂ Cl ₄	00 ⁰ 1–10 ⁰	P(42)	922,91	31	0,153	0,043
C ₂ Cl ₃ F ₃	00 ⁰ 1–02 ⁰	P(26)	1041,28	21	0,240	0,068
C ₄ H ₅ Cl	00 ⁰ 1–10 ⁰	R(18)	974,62	9,2	0,529	0,150
C ₄ H ₈	00 ⁰ 1–10 ⁰	P(38)	927,00	3,5	1,357	0,384
C ₆ H ₆	00 ⁰ 1–02 ⁰	P(30)	1037,43	2,5	2,010	0,568
NH ₃	00 ⁰ 1–02 ⁰	R(30)	1084,63	55,8	0,092	0,026
PH ₃	00 ⁰ 1–02 ⁰	P(22)	1045,02	1,7	2,966	0,839
O ₃	00 ⁰ 1–02 ⁰	P(12)	1053,92	12,2	0,415	0,117
N ₂ H ₄	00 ⁰ 1–10 ⁰	P(22)	942,38	2,7	1,773	0,502
(CH ₃) ₂ N ₂ H ₄	00 ⁰ 1–10 ⁰	P(30)	934,89	2	2,385	0,674
CH ₃ N ₂ H ₄	00 ⁰ 1–10 ⁰	R(30)	982,10	1,38	3,542	1,002
HNO ₃	00 ⁰ 1–10 ⁰	R(38)	986,57	0,2	24,497	6,929
¹³ CO ₂	00 ⁰ 1–10 ⁰	P(44)	920,83	0,0015	3155,55	892,52
				S/N	$1,01 \cdot 10^5$	$3,58 \cdot 10^5$

Таблица 2

Вертикальная трасса ($L_T = 20$ м, $\Delta\theta = 10^{-3}$, $s = H$, $v = 150$ м/с для $H = 1, 5$ км и $v = 8$ км/с для $H = 300$ км)

Газ	$H = 1$ км		$H = 5$ км		$H = 300$ км							
	Без сканирования	Со сканированием	Без сканирования	Со сканированием	Без сканирования	Со сканированием						
							$A = 0,04$	$A = 0,5$	$A = 0,04$	$A = 0,5$	$A = 0,04$	$A = 0,5$
CFCl ₃	0,107	0,030	3,399	0,961	0,240	0,068	7,601	2,150	0,430	0,122	30,404	8,600
CF ₂ Cl ₂	0,082	0,023	2,584	0,731	0,183	0,052	5,779	1,635	0,327	0,092	23,115	6,538
C ₂ H ₄	0,095	0,027	3,002	0,849	0,212	0,060	6,714	1,899	0,380	0,107	26,855	7,596
C ₂ HCl ₃	0,233	0,066	7,366	2,084	0,521	0,147	16,472	4,659	0,932	0,264	65,887	18,636
C ₂ H ₃ Cl	0,333	0,094	10,537	2,980	0,745	0,211	23,562	6,664	1,333	0,377	94,247	26,657
C ₂ Cl ₄	0,094	0,026	2,960	0,837	0,209	0,059	6,619	1,872	0,374	0,106	26,476	7,489
C ₂ Cl ₃ F ₃	0,147	0,042	4,641	1,313	0,328	0,093	10,379	2,936	0,587	0,166	41,515	11,742
C ₄ H ₅ Cl	0,324	0,092	10,250	2,899	0,725	0,205	22,920	6,483	1,297	0,367	91,679	25,931
C ₄ H ₈	0,831	0,235	26,276	7,432	1,858	0,526	58,756	16,619	3,324	0,940	235,023	66,474
C ₆ H ₆	1,231	0,348	38,916	11,007	2,752	0,778	87,020	24,613	4,923	1,392	348,078	98,451
NH ₃	0,056	0,016	1,783	0,504	0,126	0,036	3,986	1,128	0,226	0,064	15,946	4,510
PH ₃	1,816	0,514	57,439	16,246	4,062	1,149	128,43	36,328	7,266	2,055	513,749	145,31
O ₃	0,254	0,072	8,038	2,273	0,568	0,161	17,973	5,084	1,017	0,288	71,892	20,334
N ₂ H ₄	1,086	0,307	34,343	9,714	2,428	0,687	76,794	21,721	4,344	1,229	307,176	86,882
(CH ₃) ₂ N ₂ H ₄	1,460	0,413	46,179	13,061	3,265	0,924	103,25	29,206	5,841	1,652	413,036	116,82
CH ₃ N ₂ H ₄	2,169	0,614	68,595	19,402	4,850	1,372	153,38	43,383	8,677	2,454	613,531	173,53
HNO ₃	15,001	4,243	474,38	134,17	33,544	9,488	1060,7	300,02	60,005	16,972	4242,98	1200,1
S/N	828	2930	26,2	92,5	370	1310	11,7	41,4	207	732	2,93	10,3

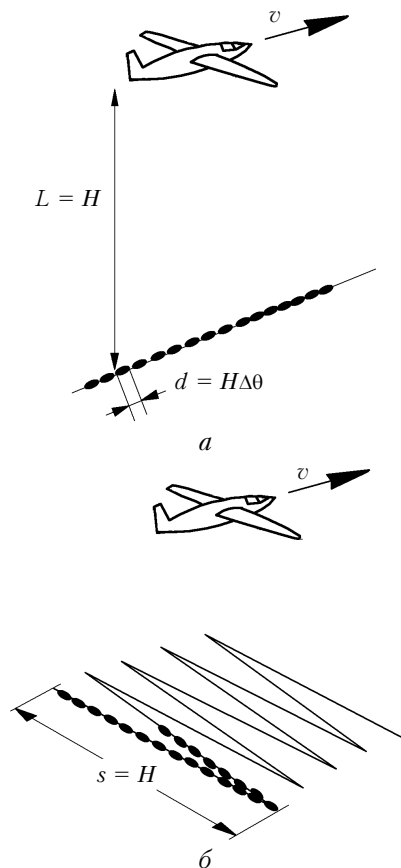


Рис. 3. Схема зондирования по вертикальной трассе: *а* – без поперечной развертки зондирующего луча; *б* – с поперечной разверткой

Результаты, полученные для лидара ($P_0 = 10$ Вт) с телескопом, имеющим площадь приемной оптики 80 см^2 , показывают, что для горизонтальной трассы пороговая чувствительность обнаружения всех проанализированных газов (кроме $^{13}\text{CO}_2$) может составить менее 10–100 ppb, т.е. ниже уровня ПДК. Для вертикальной трассы без сканирования обнаружимые минимальные концентрации составляют не более 0,1–3 ppb. Со сканированием предел обнаружения для $(\text{CH}_3)_2\text{N}_2\text{H}_4$, $\text{CH}_3\text{N}_2\text{H}_4$ и HNO_3 повышается до 100–1000 ppb, а для других веществ – до 3–50 ppb.

Таким образом, открывается возможность создания авиационных и (в потенциале) спутниковых газоаналитических лидаров нового поколения, которые могут обеспечить контроль многих газов (в том числе и чрезвычайно опасных) на больших территориях в рутинном режиме в интересах экологии, разведки ископаемых и других природных ресурсов, контроля производства (и в меньшей степени транспортировки) опасных веществ и т.д.

Основное ограничение пределов обнаружения в практических приложениях автодинных лазерных локаторов связано с поперечным сканированием. Наиболее реалистичный способ увеличить чувствительность лидара состоит в том, чтобы увеличить диаметр принимающего телескопа и выходную мощность лазера.

Настоящая работа была поддержана грантом INTAS – ESA № INTAS-99-822.

1. King P.G.R., Steward G.J. // *New Science*. 1963. V. 17. N 2. P. 180–185.
2. Harris M., Loudon R., Mander G.L., Vaughan J.M. // *Phys. Rev. Lett.* 1991. V. 67. P. 1743.
3. Godlevskii A.P., Gordov E.P., Fazliev A.Z., Pomurovskii Ya.Ya., Sharin P.P. Parametric laser-reception lidar // *Appl. Opt.* 1987. V. 26. N 8. P. 1607–1611.
4. Гордов Е.П. Автодинные лидары второго поколения // *Оптика атмосф. и океана*. 1995. Т. 8. № 1–2. С. 265–279.
5. Лукьяненко С.Ф., Макогон М.М., Саница Л.Н. Внутривиброакустическая лазерная спектроскопия. Основы метода и применения. Новосибирск: Наука, 1985. 121 с.
6. Гордов Е.П., Хмельницкий Г.С. О поляризационных характеристиках сигналов в ЛП-лидарах // *Оптика атмосф. и океана*. 1994. Т. 7. № 1. С. 112–114.
7. Gordov E.P., Khmel'nitskii G.S., Fazliev A.Z. // *Laser Optics'95: Gas Lasers* / I.M. Belousova, Editor: Proc. SPIE, 1996. V. 2773. P. 160–163.
8. Churnside J., Gordov E.P., Khachatryan A.V. // *Technical digest on Coherent Laser Radar: Technol. and Appl. OSA*. 1991. V. 12. P. 198.
9. Гордов Е.П., Орловский В.М., Потеряев А.Г., Хачатурян А.В., Чурнсайд Дж. Гибридный автодинный лидар // *Оптика атмосф. и океана*. 1993. Т. 6. № 4. С. 440–443.
10. Гордов Е.П., Фазлиев А.З. Отклик на экосигнал гибридного CO_2 -лазера // *Оптика атмосф. и океана*. 1993. Т. 6. № 4. С. 469–471.
11. Gordov E.P. Potential of Laser Autodyning for a Spaceborne Doppler Wind Lidar // *Proc. ESA Doppler Wind Lidar Workshop, WPP-095*. P. 261–265.
12. Gordov E.P., Makogon M.M., Fazliev A.Z., Orlovskii V.M. Potential of the hybrid laser autodyning for long range lidar applications // *Proc. of the 9th conference on Coherent Laser Radar*. Linkoping, Sweden. 1997. P. 277–279.
13. Gordov E.P., Makogon M.M., Fazliev A.Z., Orlovskii V.M. Basics and applications of the laser detection of weak light signals // *Proc. SPIE*. 1998. V. 3485. P. 583–591.
14. Шарин П.П. Исследование возможностей зондирования характеристик атмосферы на основе внутривиброакустических эффектов в CO_2 -лазере: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 1992.
15. Годлевский А.П., Гордов Е.П., Жилиба А.И., Шарин П.П. Доплеровский лидар с внутривиброакустическим приемом на CO_2 -лазере // *Оптика атмосф.* 1990. Т. 3. № 1. С. 25–30.
16. Гордов Е.П., Каганов Г., Макогон М.М. Потенциальные возможности непрерывного параметрического автодинного CO_2 -лидара для оценки источников углеродов // *Тр. конф. «Измерение, моделирование и информационные системы как средства реабилитации окружающей среды»*. 24–28 октября 2000 г. Томск, 2000. С. 21–23.
17. Gordov E.P., Makogon M.M., Kaganov G., Fazliev A.Z., Matvienko G.G. Modeling of Autodyne Lidar Potential for DIAL Applications // *11th coherent Laser Radar Conference*, 1–6th July 2001. Malvern, Worcestershire, UK. P. 60–63.
18. Зуев В.В., Катаев М.Ю., Макогон М.М., Мицель А.А. Лидарный метод дифференциального поглощения (ДП). Современное состояние исследований // *Оптика атмосф. и океана*. 1995. Т. 8. № 8. С. 1136–1164.

19. *Koganov G.A., Shuker R., Gordov E.P.* Analytical estimation of parameters of autodyne lidar // *Appl. Opt.* 2002. V. 41. N 33. P. 7087–7091.
20. *Koganov G.A., Shuker R., Gordov E.P., Makogon M.M.* Analytical estimation of autodyne lidar parameter for environmental DIAL applications // Invited paper in Proc. of Intern. Conf. on Environm. Observat. Modeling and Information Systems as tools for urban/regional pollution mitigation: ENVIROMIS-2002. Tomsk, Russia, July 6–12 2002. V. 1. P. 24–27.
21. *Хазанов А.М., Коганов Г.А., Гордов Е.П.* Решение задачи зондирования на основе количественного описания ЛП-лидара // *Оптика атмосф. и океана.* 1989. Т. 2. № 8. С. 862–868.
22. *Churnside J.H.* Laser Doppler velocimetry by modulating a CO₂ laser with backscattered light // *Appl. Opt.* 1984. V. 23. N 1. P. 61–66.
23. *Гольдорт В.Г., Гордов Е.П., Ищенко В.Н., Ковалев А.А., Макогон М.М.* Двухволновая СО₂-лазерная система для параметрического автодинного лидара // *Оптика атмосф. и океана.* 2006. Т. 19. № 2–3. С. 210–211.

V.G. Goldort, E.P. Gordov, V.N. Ishchenko, A.A. Kovalev, G.A. Koganov, M.M. Makogon, H. Rutt, R. Shuker. **Double wavelength cw autodyne CO₂-lidar.**

Results of three year work under INTAS-ESA grant 00822 are summarized in this paper. The autodyne lidar with new version of double wavelength cw CO₂-laser is considered. Theoretical model based on semiclassical laser theory equations and phenomenological description of laser sounding gives quite optimistic estimates the lidar sensitivity for detection of 20 polluting atmospheric gases up to 300 km distance. Specially developed cw laser adjusted to laser autodyning is described. To estimate lidar characteristics, special methodic was elaborated and results of first experiments agree quite satisfactorily with the estimates.