

В.В. Зуев, О.А. Романовский

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ГАЗОВЫХ КОМПОНЕНТ АТМОСФЕРЫ В СРЕДНЕЙ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА

В работе анализируются возможности лидарных систем, работающих в средней ИК области спектра. Рассматривается применение первых, вторых гармоник и суммарных частот CO_2 -лазера для лидарного зондирования профилей влажности и угарного газа по методу дифференциального поглощения. Проводится отбор линий поглощения H_2O и CO , пригодных для зондирования. Анализируются результаты численного моделирования для вертикальных и горизонтальных трасс зондирования при наземном и самолетном базировании лидара.

В настоящее время при лидарном зондировании газовых компонент атмосферы активно используется метод дифференциального поглощения (МДП), основанный на эффекте резонансного поглощения лазерного монохроматического излучения в пределах изолированной линии поглощения исследуемого газа, концентрация газа $N(R)$, усредненная по интервалу ΔR , определяется в этом случае по известной формуле:

$$N(R) = \frac{\ln(P_0(R)/P_0(R + \Delta R)) - \ln(P_1(R)/P_1(R + \Delta R))}{2(K_0(R) - K_1(R))\Delta R}, \quad (1)$$

где $P_i(R)$ и $P_i(R + \Delta R)$ — принимаемые лидарные эхо-сигналы с дистанции R и $R + \Delta R$ по трассе зондирования на длинах волн, расположенных внутри ($i = 0$) и вне контура ($i = 1$) селективной линии поглощения исследуемого газа; $K_0(R)$ и $K_1(R)$ — значения коэффициентов поглощения газа на соответствующих длинах волн в точке R трассы зондирования, рассчитанные на основе модельных распределений термодинамических параметров атмосферы.

Данный метод успешно реализовывался на практике с помощью лидаров, работающих в видимой, ближней и средней ИК-области спектра. При этом определялись горизонтальные и вертикальные профили H_2O , NO_2 , O_3 и некоторые другие [1]. Исследовались также возможности определения вертикальных профилей водяного пара для различных линий поглощения H_2O в области 0,72 и 0,94 мкм [2] и 3 мкм [3].

Целью данной работы является анализ возможностей лидарных систем, работающих в средней ИК-области спектра как на основных, так и на преобразованных частотах CO_2 -лазера.

В области спектра 9–11 мкм, где расположены основные линии излучения CO_2 -лазера, лидарное зондирование профилей водяного пара и других газовых компонент имеет ряд ограничений, связанных, во-первых, с дискретностью спектра излучения CO_2 -лазера и, следовательно, строго ограниченным выбором частот зондирования, во-вторых, с относительно невысокой эффективностью приемников лазерного излучения, работающих в этой области [4].

Применение в лидарных системах параметрических преобразователей частоты лазерного излучения на основе нелинейных кристаллов ZnGeP_2 и CdGeAs_2 позволяет с эффективностью от единиц до десятков процентов путем генерации вторых гармоник и суммарных частот излучения CO_2 -лазера перекрыть диапазон 4,5–5,5 мкм со средним расстоянием между синтезированными линиями излучения $\leq 0,003 \text{ см}^{-1}$ [5]. К тому же фотоприемники, работающие в этой области спектра, например, на основе InSb , имеют на два-три порядка большую эффективность, чем фотоприемники диапазона 9–11 мкм [4]. Наконец, в области 4,5–5,5 мкм эхо-сигналы от атмосферного аэрозоля в несколько раз больше, чем в области 9–11 мкм [6].

В данной работе анализируются несколько пар линий поглощения H_2O и CO применительно к задачам наземного и самолетного лидарного зондирования профилей указанных газовых компонент атмосферы.

Выбор линий поглощения осуществлялся по методике, описанной в работе [7], при этом отбираемые линии поглощения должны удовлетворять следующим требованиям: во-первых, обладать достаточной концентрационной чувствительностью к исследуемому газу, во-вторых, на этих линиях должно быть минимальным мешающее поглощение другими атмосферными газами, и, в-третьих, центр выбранной линии поглощения должен с хорошей точностью совпадать с центром линии излучения. В таблице приведены выбранные пары линий поглощения и соответствующие им синтезированные линии излучения, пригодные для зондирования по МДП H_2O и CO , и пропускание на них для 1-км приземной трассы.

Выбранные пары линий поглощения и линий излучения на основных и преобразованных частотах $C^{12}O_2^{16}$ -лазера и пропускание (T) на них для 1-км приземной трассы

№ п/п	Газ	ν линии, $см^{-1}$	ν изл., $см^{-1}$	$\Delta\nu$, $см^{-1}$	Номер линии	T_{H_2O} лето	T_{CO} фон	T_{CO} 1 ppm
1	H_2O	975,943	975,931	0,012	$R(20)$	0,25	0,91	1,00
			974,623		$R(18)$	0,99	0,90	1,00
2	H_2O	2105,781	2105,803	0,022	$P(6)+$	0,11	0,98	0,98
			2104,391		$P(20)$ $2P(14)$	0,97	0,99	0,98
3	CO	2154,596	2154,605	0,009	$2R(18)$	0,64	1,00	0,08
			2151,976		$2R(20)$	0,96	1,00	1,00
4	CO	2086,327	2086,322	0,005	$2P(24)$	0,84	1,00	0,08
			2082,556		$2P(26)$	0,87	0,99	0,99

Из таблицы видно, что выбранные пары линий поглощения и излучения удовлетворяют перечисленным выше требованиям, кроме линии с $\nu = 2154,605 \text{ см}^{-1}$, где имеется достаточно сильное мешающее поглощение водяным паром, то есть эту линию поглощения угарного газа можно использовать только при низких концентрациях водяного пара.

Потенциальные возможности лидарных систем характеризуются точностью восстановления зондируемых параметров атмосферы. При лазерном зондировании по МДП погрешность восстановления определяется уровнем случайных ошибок при регистрации лидарных эхо-сигналов и систематических ошибок априорного расчета профиля дифференциального коэффициента поглощения. Систематические ошибки и пути их минимизации достаточно подробно рассмотрены в [8]. В данной работе анализируются погрешности восстановления вертикальных и горизонтальных профилей водяного пара и угарного газа, обусловленные случайными ошибками, которые возникают за счет шумовых флуктуаций в регистрируемых лидарных эхо-сигналах и определяются из (1) как

$$\frac{\Delta N(R)}{N(R)} = \frac{1}{2\Delta K(R) \Delta R \cdot N(R)} \sqrt{\sum_{i=1}^2 (\delta_{0i}^2 + \delta_{1i}^2)}, \quad (2)$$

где δ_{0i}^2 и δ_{1i}^2 — относительные дисперсии регистрируемых лидарных сигналов в линии и вне линии поглощения исследуемого газа на расстоянии $R(i=1)$ и $R+\Delta R(i=2)$ от лидара. Для токового режима регистрации лидарных сигналов с использованием полупроводниковых фотоприемников δ равно обратному отношению сигнал-шум (S/N) и описывается как

$$\delta_{ji} = \frac{NEP + P_{\text{дш}}}{P_{j,i}} \quad \text{для } j = 0, 1 \text{ и } i = 1, 2; \quad (3)$$

где NEP — эквивалентная мощность шума фотодетектора; $P_{\text{дш}}$ — мощность дробового шума; $P_{j,i}$ — принимаемые мощности лидарных эхо-сигналов в линии ($j=0$) и вне линии ($j=1$) поглощения на расстоянии $R(i=1)$ и $R+\Delta R(i=2)$, описываемые известным уравнением лазерной локации [1].

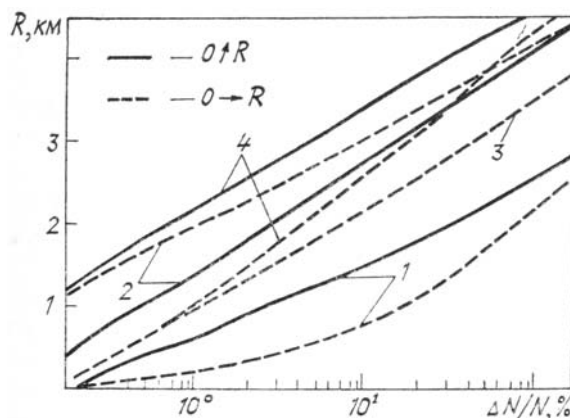


Рис. 1

Численное моделирование проводилось для следующих параметров лидарной системы наземного и самолетного базирования: энергии излучения лазера $E_0 = 1$ и $0,1$ Дж, NEP равен 10^{-9} и 10^{-11} Вт для диапазонов спектра $9-11$ и $4,5-5,5$ мкм соответственно, диаметр приемного зеркала $D_{пр} = 0,5$ м, пространственное разрешение $\Delta R = 250$ м, общая эффективность приемопередающей системы η бралась равной $0,004$. Усреднение проводилось по 1000 импульсов.

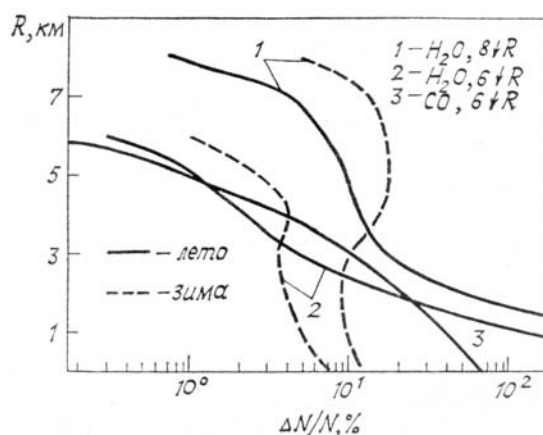


Рис. 2

Оптико-метеорологические модели заимствованы из [6], данные о спектральных параметрах линий поглощения из [9]. При расчете высотных профилей коэффициентов поглощения учитывалось неполное совпадение центров линий поглощения исследуемых газов и центров синтезированных линий излучения. Расчет проводился по фойгтовскому контуру с учетом возможного влияния крыльев соседних линий поглощения в диапазоне 20 см^{-1} .

На рис. 1 приведены случайные ошибки восстановления лидарных профилей водяного пара и угарного газа по схеме (1) из модельных эхо-сигналов P_{ji} , рассчитанные для случая вертикальных (сплошные линии) и горизонтальных (штриховые линии) трасс зондирования. Изображенные на рис. 1 кривые пронумерованы следующим образом: 1 — зондирование H_2O на основных частотах CO_2 -лазера (пара линий № 1 из таблицы); 2 — зондирование H_2O на преобразованных частотах (пара № 2); 3 — зондирование CO на линии поглощения с центром $\nu = 2154,596 \text{ см}^{-1}$ (пара № 3); 4 — зондирование CO на линии с $\nu = 2086,322 \text{ см}^{-1}$ (пара № 4). Видно, что лидарное зондирование H_2O на основных частотах CO_2 -лазера позволяет достичь только 2 и 2,5 км дальности для случая горизонтальной и вертикальной трассы зондирования соответственно. Применение преобразованных частот CO_2 -лазера позволяет повысить дальность зондирования до 4 км. Из-за мешающего поглощения водяным паром использование линии CO с центром $\nu = 2154,596$ (кривая 3) не позволяет, как видно из рис. 1, проводить восстановление профилей концентрации угарного газа на расстоянии большем 3,5 км. Применение для зондирования CO пары линий № 4 из таблицы (кривые 4) более перспективно, так как дает возможность повысить потолок зондирования до 4,5 км.

На рис. 2 приведены результаты численного моделирования зондирования при самолетном базировании лидара: кривые 1 — профили случайных ошибок при зондировании H_2O на преобразованных частотах CO_2 -лазера (пара линий № 2 из таблицы) для высоты полета самолета 8 км; 2 — то же для высоты полета 6 км; кривая 3 — при зондировании CO на линии поглощения с центром $\nu = 2086,322 \text{ см}^{-1}$. Сплошные линии соответствуют условиям лета, штриховые — зимы средних широт. Профили ошибок для пары линий № 1 из таблицы не приведены из-за высокого уровня ошибок, практически не выходящего для всех высот за 100%. Как видно из рис. 2, зондирование влажности может осуществляться с погрешностями менее 20% на всех высотах зимой и до высоты 2–3 км летом, а зондирование угарного газа до высоты 2 км.

Результаты численного моделирования показывают высокие потенциальные возможности использования преобразованных частот CO_2 -лазера.

1. Межерис Р. М. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир. 1987. 550 с.
2. Browell E. V. // SPIE. Laser Spectroscopy for Sensitive Detection. 1981. P. 79–86.
3. Зуев В. В., Романовский О. А. // Исследование Земли из космоса. 1986. № 5. С. 9–17.
4. Фотоприёмники видимого и ИК-диапазонов / Под ред. Р. Дж. Кисса. М.: Радио и связь. 1985. 325 с.
5. Андреев Ю. М., Гейко П. П., Грибенюков А. И. и др. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 3. С. 20–26.
6. McClatchey R. A., Fenn R. W., Selby J. E. A. e. a. Optical Properties of the Atmosphere, Report AFCRL-71-0279, AFCRL, Bedford. Mass. 1971. 86 p.

7. Андреев Ю.М., Зуев В.В., Романовский О.А. Автоматизированная система поиска оптимальных длин волн для лазерного газоанализа методом дифференциального поглощения. Ч. 1. Методика поиска. М., 1988. 45 с. Деп. в ВИНТИ 25.05.88. № 4058-B88.
8. Зуев В.В., Романовский О.А. К учёту систематических погрешностей в лидарном методе дифференциального поглощения. М., 1987. 48 с. Деп. в ВИНТИ 25.06.87. № 4675-B87.
9. Husson N., Chedin A., Scott N.A. e. a. Ann. Geoph. Fasc. 2. Ser. A. 1986.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакция
21 октября 1988 г.

V. V. Zuev, O. A. Romanovsky. Numerical Simulation of Lidar Sounding of Atmospheric Gaseous Constituents in the Middle IR Spectral Region.

Capabilities of lidar systems operating in the middle IR spectral region are examined. The utility of the CO₂-laser first and second harmonic and sum frequency generation for lidar sounding of atmospheric water vapor and carbon monoxide concentrations by the DIAL technique is discussed. The absorption lines of H₂O and CO most useful for remote gas analysis are listed. The results obtained from numerical simulation of ground-based and airborne lidar sensing of the atmosphere along horizontal and vertical paths are presented.