

02;07;12

Параметры зондирования молекулярного водорода в атмосфере на наклонных трассах лидаром с YAG:Nd лазером

© Г.В. Лактюшкин, В.Е. Привалов, В.Г. Шеманин

Балтийский государственный технический университет,
198005 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 16 декабря 1996 г.)

Проведено численное решение лидарного уравнения для обратного колебательного рассеяния молекулами водорода излучения неодимового лазера и его гармоник. Исследовались наклонные трассы в атмосфере с целью выбора длины волны излучателя для обнаружения минимальной концентрации водорода.

Излучение YAG:Nd лазера и особенно его второй, третьей и четвертой гармоник широко используется в системах дистанционного зондирования [1] и позволяет получить импульсы длительностью 10 ns с энергией от 1 до 100 mJ при частоте следования до 50 Hz. Излучение третьей и четвертой гармоник такого лазера можно использовать для дистанционного зондирования молекулярного водорода в атмосфере лидаром комбинационного рассеяния [1]. Поэтому представляет интерес численное решение лидарного уравнения для обратного (рассеяния назад) колебательного комбинационного рассеяния молекул H₂ для YAG:Nd лазера для наклонных трасс в атмосфере с дальностью от 6 km и с высотой от 6 km с целью выбора длины волны излучателя лидара комбинационного рассеяния для обнаружения минимально возможной концентрации водорода.

Лидарное уравнение для обратного комбинационного рассеяния запишем, как и в [2], в виде

$$P(\lambda, R) = P_0(\lambda_0) K \Delta R A_2 T(\lambda_0) T(\lambda) \times \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) N_a i R^{-2}, \quad (1)$$

где $P(\lambda, R)$ — мощность сигнала комбинационного рассеяния на фотоприемнике на длине волны λ , приходящая с расстояния R ; $P_0(\lambda_0)$ — мощность лазера и его длина волны; K — постоянная лидара; ΔR — шаг по расстоянию; A_2 — площадь приемного телескопа; $T(\lambda_0)$, $T(\lambda)$ — пропускание атмосферы соответственно на длине волны лазерного излучения и сигнала обратного комбинационного рассеяния; $(d\sigma/d\Omega)$ — дифференциальное сечение колебательного комбинационного рассеяния исследуемой молекулы; N_a — концентрация молекул; R — расстояние до точки зондирования.

Длины волн полос комбинационного рассеяния исследуемых молекул H₂ для различных длин волн лазерного излучения были рассчитаны по формуле

$$\lambda_{RH} = 1 \left(\frac{1}{\lambda_0} - \tilde{\nu} \right), \quad (2)$$

где $\tilde{\nu}$ — частота собственных колебаний H₂, и приведены в четвертом столбце табл. 1.

Дифференциальное сечение обратного колебательного комбинационного рассеяния, следуя [1] и заменяя циклическую частоту ω на длину волны λ , можно определить по формуле

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_j = \frac{16\pi^4 b_j^2 g_j}{\lambda^4 [1 - \exp(-hc/\lambda kT)]} \times \left\{ a_j^2 + \frac{7}{45} \nu_j^2 \right\}, \quad (3)$$

где b_j — амплитуда нулевых колебаний j -й моды; g_j — степень ее вырождения; $3a_j$ и ν_j — след и анизотропия тензора производной поляризуемости молекулы по нормальной координате g_j ; T — колебательная температура молекул; k , h — соответственно постоянные Больцмана и Планка; c — скорость света.

Оставляя только зависимость от λ , формулу (3) можно переписать в виде

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_j = A/\lambda^4, \quad (4)$$

где постоянная A определена по известному значению сечения молекулы H₂ для длины волны излучения азотного лазера $\lambda_0 = 337.1$ nm, $(d\sigma/d\Omega)_j = 8.7 \cdot 10^{-30}$ cm³/sr, приведенному в последней строке табл. 1, и равно $1.13065 \cdot 10^{-17}$ cm² · nm⁴.

Таблица 1. Значения дифференциальных сечений, длин волн полос комбинационного рассеяния молекул водорода, коэффициентов ослабления атмосферы, относительной спектральной чувствительности фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) и спектральной яркости фонового излучения Солнца, рассчитанные для длин волн второй, третьей и четвертой гармоник YAG:Nd лазера и длин волн полос комбинационного рассеяния ($\nu = 4161$ cm⁻¹)

λ , nm	$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) \cdot 10^{30}$, cm ³ /sr	k , km ⁻¹	λ_{KR} , nm	k , km ⁻¹	$\xi_p(\lambda)$	$S_b \cdot 10^3$, w/m·sr
532	1.40	0.16	683.2	0.145	0.25	7.9
355	7.07	0.31	416.5	0.21	0.52	12.4
266	22.41	0.785	299.1	0.45	0.30	6.0
337.1	8.7		392.7			

Таблица 2. Результаты расчетов мощности обратного комбинационного рассеяния молекулы H₂ для длин волн гармоник YAG:Nd лазера с энергией импульса 100 мДж, дистанцией зондирования 1–6 км, высотой 1–6 км и концентрацией молекул 10²⁰ см⁻³)

H, km	λ, nm	R, km					
		1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
0.0	683.2	7696	1426	469.7	195.5	92.79	47.78
	416.5	65900	9888	2643.0	891.1	342.30	142.70
	299.1	58060	4224	545.6	88.5	16.77	3.34
1.0	683.2	1931	358	117.9	49.05	23.28	11.99
	416.5	16530	2481	663.1	223.60	85.89	35.81
	299.1	14570	1060	136.9	22.21	4.21	0.84
2.0	683.2	1031	191.1	62.9	26.19	12.43	6.40
	416.5	8828	1325.0	354.1	119.40	45.86	19.12
	299.1	7779	565.9	73.1	11.86	2.25	0.45
3.0	683.2	776	143.7	47.33	19.70	9.35	4.81
	416.5	6640	996.3	266.30	89.79	34.49	14.38
	299.1	5851	425.6	54.98	8.92	1.69	0.34
4.0	683.2	682	126.3	41.59	17.31	8.22	4.23
	416.5	5835	875.5	234.00	78.91	30.31	12.64
	299.1	5141	374.0	48.31	7.84	1.48	0.30
5.0	683.2	643	119.1	39.22	16.32	7.75	4.00
	416.5	5502	825.6	220.70	74.41	28.59	11.92
	299.1	4848	352.7	45.56	7.39	1.40	0.28
6.0	683.2	626	116.0	38.19	15.90	7.54	3.88
	416.5	5358	803.9	214.90	72.46	27.83	11.61
	299.1	4721	343.4	44.36	7.20	1.36	0.27

Полученные значения сечений для выбранных длин волн лазера приведены во втором столбце табл. 1. Далее, для конкретного случая нашего лидара K₁ множитель ξ_ν(λ) зависит от спектральной чувствительности фотокатода фотоэлектронного умножителя как

$$K_1 = K_2 \xi_\nu(\lambda). \quad (5)$$

Остальные множители в уравнении (1) имеют следующие значения: ΔR = 7.5 м для времени измерения t_d = 50, A₂ = 0.008 м², K₂ = 0.495 для длины волны 532 нм (результат измерений), энергия лазерного импульса E₀ = 100 мДж, расстояние зондирования R = 1, 2, 3, 4, 5 и 6 км, высота H = 2, 3, 4, 5 и 6 км, значения спектральной чувствительности фотокатодов ФЭУ-79 и ФЭУ-140 (ФЭУ-124) в ультрафиолетовой области взяты из [3] и их относительные величины сведены в шестой столбец табл. 1. Пропускание атмосферы рассчитывалось, как и в [1], по формуле

$$T(\lambda, R) = \exp \left[- \int_0^R k(\lambda) dR \right] \quad (6)$$

по значениям коэффициента ослабления k, которые взяты из [4], и для интересующих нас длин волн представле-

ны в третьем и пятом столбцах табл. 1. Изменение коэффициента ослабления с высотой H учтено в соответствии с данными [4], которые аппроксимировались функцией вида

$$k(H) = k(0) \exp(-0.79H). \quad (7)$$

Используя приведенные выше параметры, мы провели численные расчеты мощности обратного комбинационного рассеяния по уравнению (1) для выбранных длин волн и энергии лазерного импульса E₀ = 100 мДж в диапазоне расстояний зондирования от 1.0 до 6.0 км и изменения высоты также от 1.0 до 6.0 км с целью поиска оптимальной длины волны для обнаружения минимальной концентрации молекул водорода. Результаты расчетов для выбранных длин волн приведены в табл. 2. Из нее следует, что увеличение угла наклона трассы зондирования (или высоты) ведет к снижению мощности комбинационного рассеяния, но меньшему по сравнению с зондированием на горизонтальной трассе без изменения спектральной зависимости множителей, входящих в лидарное уравнение (1). С увеличением расстояния мощность комбинационного рассеяния уменьшается почти на 4 порядка в диапазоне 1–6 км, а при увеличении высоты до 6 км это уменьшение составляет лишь 14 раз. Это различие объясняется сильным влиянием поглощения лазерного излучения в

Таблица 3. Результаты расчетов минимально детектируемой лидаром мощности для длин волн полос комбинационного рассеяния молекул водорода, дистанцией зондирования 1–6 км, и высот 1–6 км

H, km	λ, nm	R, km					
		1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
0.0	683.2	81.52	17.74	6.85	3.35	1.86	1.13
	416.5	248.09	50.32	18.15	8.28	4.29	2.42
	299.1	54.55	8.70	2.46	0.88	0.36	0.14
1.0	683.2	40.81	8.89	3.43	1.68	0.93	0.56
	416.5	124.39	25.21	9.09	4.14	2.13	1.21
	299.1	27.36	4.36	1.24	0.42	0.18	0.08
2.0	683.2	29.83	6.50	2.50	1.23	0.68	0.41
	416.5	91.0	18.39	6.64	3.03	1.57	0.88
	299.1	20.0	3.19	0.90	0.32	0.13	0.06
3.0	683.2	25.89	5.63	2.18	1.06	0.59	0.34
	416.5	78.74	16.09	5.76	2.62	1.36	0.58
	299.1	17.36	2.76	0.76	0.28	0.11	0.05
4.0	683.2	24.30	5.28	2.04	1.00	0.55	0.34
	416.5	73.53	15.02	5.41	2.47	1.27	0.72
	299.1	16.26	2.59	0.73	0.27	0.10	0.05
5.0	683.2	23.56	5.11	1.98	0.97	0.54	0.33
	416.5	71.69	14.56	5.24	2.39	1.26	0.70
	299.1	15.73	2.52	0.71	0.26	0.10	0.05
6.0	683.2	23.27	5.07	1.95	0.96	0.53	0.32
	416.5	70.77	14.33	5.11	2.36	1.22	0.69
	299.1	15.56	2.48	0.70	0.25	0.10	0.05

Таблица 4. Результаты расчетов минимально обнаружимых концентраций молекул H_2 лидаром для длин волн гармоник YAG:Nd лазера, дистанций зондирования 1–6 km и высот 1–6 km

H, km	λ , nm	R, km					
		1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
		N_A, cm^{-3}					
0.0	683.2	1.110^{15}	1.210^{15}	1.510^{15}	1.710^{15}	2.110^{15}	2.410^{15}
	416.5	3.80^{14}	5.10^{14}	6.90^{14}	9.30^{14}	1.310^{15}	1.710^{15}
	299.1	9.410^{13}	2.110^{14}	4.510^{14}	9.910^{14}	2.20^{15}	4.20^{15}
1.0	683.2	2.110^{15}	2.510^{15}	2.910^{15}	3.410^{15}	4.010^{15}	4.710^{15}
	416.5	7.510^{14}	1.010^{15}	1.410^{15}	1.910^{15}	2.510^{15}	3.410^{15}
	299.1	2.010^{14}	4.110^{14}	9.110^{14}	1.910^{15}	4.310^{15}	9.510^{15}
2.0	683.2	2.910^{15}	3.410^{15}	4.010^{15}	4.710^{15}	5.510^{15}	6.410^{15}
	416.5	1.010^{14}	1.410^{15}	1.910^{15}	2.510^{15}	3.010^{15}	4.610^{15}
	299.1	2.610^{14}	5.610^{14}	1.210^{15}	2.710^{15}	5.810^{15}	1.310^{16}
3.0	683.2	3.310^{15}	3.910^{15}	4.610^{15}	5.410^{15}	6.310^{15}	7.510^{15}
	416.5	1.210^{15}	1.610^{15}	2.210^{15}	2.910^{15}	3.910^{15}	4.010^{15}
	299.1	3.010^{14}	6.510^{14}	1.410^{15}	3.110^{15}	6.510^{15}	1.510^{16}
4.0	683.2	3.510^{15}	4.210^{15}	4.910^{15}	5.810^{15}	6.710^{15}	8.010^{15}
	416.5	1.310^{15}	1.710^{15}	2.310^{15}	3.110^{15}	4.210^{15}	5.710^{15}
	299.1	3.210^{14}	6.910^{14}	1.510^{15}	3.410^{15}	6.810^{15}	1.710^{16}
5.0	683.2	3.710^{15}	4.310^{15}	5.110^{15}	5.910^{15}	7.010^{15}	8.310^{15}
	416.5	1.310^{15}	1.810^{15}	2.410^{15}	3.210^{15}	4.410^{15}	5.810^{15}
	299.1	3.210^{14}	7.110^{14}	1.610^{15}	3.510^{15}	7.110^{15}	1.810^{16}
6.0	683.2	3.710^{15}	4.410^{15}	5.110^{15}	6.010^{15}	7.310^{15}	8.310^{15}
	416.5	1.310^{15}	1.810^{15}	2.410^{15}	3.310^{15}	4.410^{15}	5.610^{15}
	299.1	3.310^{14}	7.210^{14}	1.610^{15}	3.510^{15}	7.410^{15}	1.910^{16}

приземном слое атмосферы. Анализ этих результатов показывает, что оптимальным является использование в такой системе лазера, работающего на третьей гармонике с длиной волны 355 nm, которая позволяет получить максимальное значение мощности обратного комбинационного рассеяния для исследуемых молекул в этом диапазоне расстояний и высот.

Однако эти расчеты выполнены для случая отсутствия фоновой засветки или для точного зондирования. Так как фоновое излучение Солнца оказывает сильное влияние на регистрируемую лидаром мощность комбинационного рассеяния, то были выполнены расчеты фоновой мощности на фотоприемнике $P_b(\lambda, R)$ и рассмотрено влияние фоновой засветки на потенциальные возможности лидара. Значение спектральной яркости солнечного излучения для различных времен года, времени суток и метеоусловий взяты из работы [5]. Как самые тяжелые для работы лидара были выбраны условия яркого солнечного дня, и с использованием данных [1,6,7] (из-за неопределенности положения оси телескопа относительно направления на Солнце) было построено спектральное распределение фонового излучения $S_0(\lambda)$, значения которого для выбранных длин волн приведены в последнем столбце табл. 1. Используя эти значения $S_0(\lambda)$, по

уравнению

$$P_b(\lambda, R) = S_b(\lambda)T(\lambda, R)K_2\xi_\nu(\lambda)A_2\Omega(R)\Delta\lambda \quad (8)$$

($\Omega(R)$ — телесный угол поля зрения приемного телескопа, $\Delta\lambda$ — спектральная ширина приемного тракта), аналогичному [7], рассчитали значения фоновой мощности $P_b(\lambda, R)$ для нашего случая. Считая, как и в [1], минимально допустимым отношение сигнала к шуму (S/N) равным 1.5, определим минимально детектируемую лидаром мощность P_m согласно уравнению

$$P_m = (S/N)P_b(\lambda, R). \quad (9)$$

Полученные результаты расчетов представлены в табл. 3. Сравнение этих результатов с данными табл. 2 позволяет заключить, что наибольшее превышение мощности комбинационного рассеяния над фоновой получено для длины волны 266 и 355 nm для всего диапазона расстояний и высот. Причем лазер мощностью 10 MW на этих длинах волн позволит зарегистрировать концентрацию молекул H_2 , значения которых приведены в табл. 4. Следует отметить, что значения минимально обнаружимых концентраций возрастают для всех длин волн в 3–4 раза с изменением высоты от 0 до 6 km, в 2.2 раза для 523 nm, в 4.5 раза для 355 nm и 44.7 раза для 266 nm в выбранном диапазоне расстояний 1–6 km. Минимальное значение концентрации $0.4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^3$ позволяет получить излучение четвертой гармоники на расстоянии 1 km.

Таким образом, полученные результаты показывают возможность оптимального выбора длины волны лазерного излучения для зондирования молекулярного водорода требуемой концентрации в атмосфере на заданном расстоянии на наклонных трассах с учетом фоновых условий.

Список литературы

- [1] Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
- [2] Иванов Е.К., Колбенков В.А., Конопелько Л.А., Растоскуев В.В. // Измерительная техника. 1986. № 5. С. 56–57.
- [3] Справочник по лазерам / Под ред. А.М. Прохорова. Т. II. М.: Сов. радио, 1978. С. 182.
- [4] Справочник по лазерам / Под ред. А.М. Прохорова. Т. I. М.: Сов. радио, 1978. С. 382.
- [5] Camagni P. // Lidar Applications to Aerosols and Particles. Optical Remote Sensing of Air Pollution. Lectures of a Course. Ispra (Italy), 1983. P. 205–253.
- [6] Rosen H., Robish P., Chamberlain O. // Appl. Opt. 1975. Vol. 14. N 8. P. 2703–2706.
- [7] Inaba H., Kobayasi T. // Opto-Electronics. 1972. Vol. 4. N 2. P. 101–123.