

Зондирование молекул водорода в атмосфере лидаром комбинационного рассеяния света

В. Е. Привалов¹, В. Г. Шеманин²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vaevpriv@yandex.ru

²Новороссийский филиал Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова, Новороссийск, Россия; e-mail: shemanin-v-g@nb-bstu.ru

Выполнено численное решение лидарного уравнения комбинационного рассеяния света для измерения концентрации молекул водорода на уровне 10^{13} см^{-3} и выше в атмосфере на расстояниях зондирования до 100 м в режиме синхронного счета фотонов и выбор оптимальных параметров такого лидара. Показано, что для измерения концентрации молекул водорода $N(z) = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ в диапазоне зондирования от 5 до 100 м значение времени измерения лежит в диапазоне от 3,83 с до 26,5 мин.

Ключевые слова: лидар комбинационного рассеяния света, молекула водорода, концентрация, расстояние зондирования, длина волны лазерного излучения

Введение

Большие перспективы использования водорода как нового вида чистого топлива [1] требует создания систем для контроля его утечки из баллонов и трубопроводов, особенно в местах перекачки. Однако дистанционный контроль и измерение концентраций на уровне $1.4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ представляет большую проблему [1–3]. А в работе [4] было предложено лидарное уравнение для комбинационного рассеяния света (КРС) газовыми молекулами в атмосфере с учетом конечной ширины линии генерации. Оказалось, что учет конечной ширины линии генерации реального лазера, соотношение ширин полос КРС и аппаратной функции лидара позволяет уточнить решение такого лидарного уравнения [3]. Целью настоящей работы является оценка возможности измерений лидаром КРС концентрации молекул водорода на уровне 10^{13} см^{-3} и выше в атмосфере на расстояниях зондирования до 100 м в режиме синхронного счета фотонов и выбор оптимальных параметров такого лидара.

Лидар КРС

Оптическая схема лидара КРС подробно рассмотрена в [1, 3]. В качестве зондирующего излучения используется излучение третьей и второй гармоник YAG Nd-лазера с накачкой полупроводниковым лазером с длинами волн 355 нм и 532 нм и полупроводниковых лазеров с длинами волн 405 нм, 650 нм и 785 нм с длительностью импульсов 10 нс и энергиями в импульсе до 10 мкДж при частоте следования лазерных импульсов f до 100 кГц [1, 5]. Излучение лазера направлялось вдоль оси приемного телескопа, а излучение КРС молекулами водорода в атмосфере в направлении назад собиралось приемным телескопом типа Ньютона со сферическим зеркалом диаметром 200 мм и фокусировалось линзовым объективом в волоконный ввод микро спектрометра типа FSD-8.

Лидарное уравнение для КРС

Эта экспериментальная ситуация описывалась лидарным уравнением для КРС в направлении назад в режиме счета фотонов в виде [3, 4] как интеграл в интервале от $(\nu_0 - \Gamma_0)$ до $(\nu_R - \Gamma_R)$ [4]:

$$n(\nu, z) = n_0 c \tau_1 G(z) f t S_0 N(z) (d\sigma / d\Omega) \int_{\nu_0 - \Gamma_0}^{\nu_R + \Gamma_R} T_0(\nu_0, z) \cdot T(\nu_R, z) \cdot \Phi(\nu) A(\nu) d\nu / 2z^2 \quad (1)$$

где $n(\nu, z)$ – число фотонов, зарегистрированное фотоприемником лидара на частоте ν_R комбинационного рассеяния света с расстояния зондирования z ; n_0 – число фотонов на частоте ν_0 лазерного излучения. Кроме того, обозначены S_0 – площадь приемной апертуры телескопа; $G(z)$ – геометрическая функция лидара [1, 4, 5]; $N(z)$ – концентрация исследуемых молекул; t – время измерения или накопления сигнала и $(d\sigma/d\Omega)$ – дифференциальное сечение комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами. Под интегралом два сомножителя – пропускание атмосферы [1, 5] с $\alpha(\nu_0, r)$ и $\alpha(\nu_R, r)$ – коэффициентами ослабления на частотах лазерного излучения и комбинационного рассеяния света молекулами водорода; $\Phi(\nu)$ – функция распределения фотонов лазерного излучения в линии генерации [4, 5] в нашем случае – Гауссова; а аппаратную функцию или спектральный коэффициент пропускания приемной системы лидара $A(\nu)$ [1, 5, 6] имеет Лоренцевскую форму и настроена точно на частоту ν_R полосы комбинационного рассеяния света молекулами водорода с полушириной Γ_a , которая больше чем Γ_R и Γ_0 . Лидарная константа K_l на частоте ν_0 лазерного излучения, измеренная экспериментально в [6], а $\xi(\nu_R)$ – относительная спектральная чувствительность фотоприемника на частоте ν_R излучения комбинационного рассеяния света.

Результаты и обсуждение

Выполним решение этого уравнения (1) для однократного комбинационного рассеяния света и однородной атмосферы [1, 5, 7]. По значению максимума полосы валентных Н-Н колебаний молекул водорода 4161 см^{-1} по данным [1, 5, 6, 8] для всех длин волн лазерного излучения были рассчитаны длины волн полос колебательного КРС молекулами водорода. Значения дифференциальных сечений КРС для молекул H_2 ($d\sigma/d\Omega$) и выбранных длин волн лазерного излучения 355 нм, 532 нм и 405 нм были определены по данным, экспериментально измеренным в [1, 6, 9], при комнатной температуре и нормальном давлении на длине волны излучения 532 нм ($d\sigma/d\Omega$) = $(4.3 \pm 0.9) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2/\text{ср}$. Значения коэффициентов ослабления для этих длин волн взяты из [1, 6]. Поперечное сечение зеркала приемного телескопа лидара было 0.031 м^2 . а шаг по расстоянию – 7,5 м для времени одного измерения 50 нс.

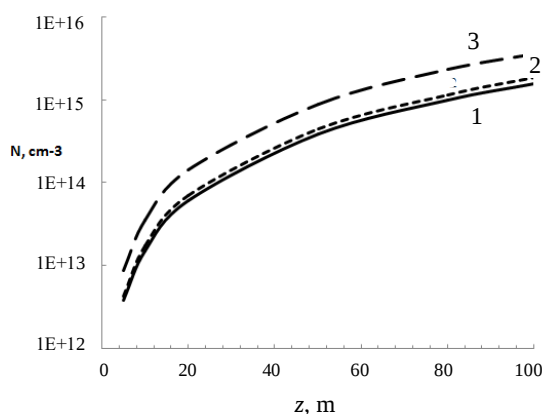


Рис. 1. – Графики рассчитанной по уравнению (1) зависимости концентрации молекул водорода $N(z)$ от расстояния зондирования z (в м) для одного и того же времени измерения $t = 10 \text{ с}$ для длин волн лазерного излучения 355 нм (1), 532 нм (2) и 405 нм (3) для нашей экспериментальной ситуации.

Рассмотрим численное решение уравнения (1) с этими параметрами для всех длин волн лазерного излучения, полагая, что $G(z)$ в нашем случае равно 1, концентрация молекул водорода лежит в диапазоне $10^{13} \dots 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и время измерения – 10 с. Результаты решения уравнения (1) представлены на рис. 1.

Заключение

Таким образом, полученные результаты позволяют выбрать оптимальные параметры лазера и лидара КРС для зондирования молекул водорода в атмосфере на расстояниях зондирования до 100 м. Причем они хорошо согласуются с результатами наших прежних работ [1, 3]. Получено, что зондировать молекулы водорода с концентрациями порядка 10^{13} см^{-3} за время измерения 10 с можно на расстоянии до 50 м на длинах волн лазерного излучения 355 нм и 532 нм, а концентрации порядка 10^{15} см^{-3} за то же время измерения 10 с – на расстоянии до 100 м на тех же длинах волн.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ, проекты № 19-42-230004 и №19-45-230009

Литература

1. Привалов В.Е., Фотиади А.Э., Шеманин В.Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. СПб.: Лань, 2013. 288 с.
2. Privalov V.E., Shemanin V.G. Hydrogen Sulfide Molecules Lidar Sensing in the Atmosphere. Optical Memory and Neural Networks. 2018. V. 27(2), P. 120–131. DOI: 10.3103/S1060992X18020091
3. Privalov V.E., Shemanin V.G. Lidar Measurement of the Power of Raman Light Scattering by Hydrogen Molecules. Measurement Techniques. 2015. Vol. 57, No 12, P. 1356–1359.
4. Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Лидарное уравнение с учетом конечной ширины лазерной линии. Известия РАН. Серия Физическая. 2015. Т. 79. № 2. С. 170–180
5. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
6. Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере. С-Пб.: Балт. ГТУ. 2001. 56 с.
7. Донченко В.А., Кабанов М.В., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Атмосферная электрооптика. Томск: Изд. НТЛ, 2010. 220 с.
8. Лазерный контроль атмосферы. Под. ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
9. Воронина Э.И., Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Зондирование молекул водорода на лабораторном лидаре КР. Письма в Журнал технической физики. 2004. Т. 30, № 5. С. 14.

Hydrogen molecules remote sensing in the atmosphere by the Raman lidar

V.E. Privalov¹, V.G. Shemanin²

¹*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;
e-mail: vaevpriv@yandex.ru*

²*V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, Novorossiysk branch, Novorossiysk, Russia; e-mail: shemanin-v-g@nb-bstu.ru*

The Raman lidar equation numerical solution has been fulfilled for the measurement of the hydrogen molecules concentration at the level of 10^{13} см^{-3} and higher in the atmosphere at the ranging distances up to 100 m in the synchronous photon counting mode and for such a lidar optimal parameters selection. It is shown that for these measurements of concentration of hydrogen molecules $N(z) = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ in the probing range from 5 to 100 m the value of measurement time is in the range from 3.83 s to 26.5 min.

Keywords: combinational light scattering lidar, hydrogen molecule, concentration, probing distance, laser radiation wavelength