

С.Н. Волков, Б.В. Кауль, А.Л. Кузнецов, В.А. Шапранов, Д.И. Шлефонтюк

КОМБИНИРОВАННЫЙ КАНАЛ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И АЭРОЗОЛЯ НА ЛИДАРНОМ КОМПЛЕКСЕ

Приведены принципиальная блок-схема и характеристики одного из измерительных каналов, реализованного на многоканальном лидарном комплексе, диаметр приемной антенны которого составляет 2,2 м. Для измерений используются эффекты комбинационного рассеяния с участием вращательных уровней атмосферных газов и упругое рассеяние на аэрозолях и молекулах. Описана методика извлечения информации о профиле температуры и отношении аэрозольного рассеяния к молекулярному.

Введение

Многофункциональный лидар станции лазерного зондирования атмосферы ИОА СО РАН с приемной антенной на основе параболического зеркала диаметром 2,2 м [1] позволяет увеличить высотный диапазон методов лазерного зондирования атмосферы. В число задач, решаемых с помощью лидара, включены измерения вертикальных профилей температуры и влажности воздуха, т.е. параметров, определяющих динамику конденсационных процессов. Для их измерения подходит известный метод, основанный на использовании эффекта спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) [2, 3]. Возможно также применение методов дифференциального поглощения, разрабатываемых в ИОА в течение ряда лет. Применение метода СКР осложняется малым сечением рассеяния, а метод дифференциального поглощения требует определенного качества лазерного излучения, что обычно достигается за счет потери мощности лазера. В этой связи актуально использование большой приемной антенны, позволяющей при умеренной мощности передатчика получить энергетический потенциал, достаточный для измерений в области высот $1,5 \div 15$ км. Измерение тех же параметров в приземном слое предполагает использование других лидаров, поскольку на указанный слой приходится зона сильного действия геометрического фактора антенного устройства большого лидара, включая теневую зону [1]. В зависимости от конкретных соотношений между диаграммами направленности приемной и передающей антенн невыполнение условия обратной пропорциональности сигнала квадрату расстояния может наблюдаться до высот $10 \div 20$ км. Возможная неопределенность геометрической функции антенного устройства не является помехой при реализации методов зондирования, использующих отношение сигналов на двух или более частотах, если при этом обеспечена идентичность оптических путей. Ниже мы описываем устройство комбинированного канала, использующего упругое и комбинационное рассеяния, и приводим примеры измерений, показывающие существующие и потенциальные возможности канала. В настоящее время канал оснащен лазером со средней мощностью излучения от 0,5 до 0,8 Вт. По этой причине мы рассматриваем канал как некоторый промежуточный макетный вариант, который позволяет нам отработать методику измерений до того времени, когда более благоприятные финансовые и другие условия позволят оснастить его лидарным передатчиком со средней мощностью $15 \div 20$ Вт, как это предполагалось при проектировании станции.

2. Устройство канала

Принципиальная блок-схема изображена на рис. 1. Изучение второй гармоники YAG-лазера ($\lambda = 532$ нм) 1, с энергией импульса $50 \div 80$ мДж и частотой повторения 10 Гц коллимируется для достижения расходимости излучения, равной $1'$, и направляется в атмосферу системой из трех зеркал 2 вдоль оптической оси зеркальной приемной антенны 3, имеющей диаметр 2,2 м и фокусное расстояние 10 м.

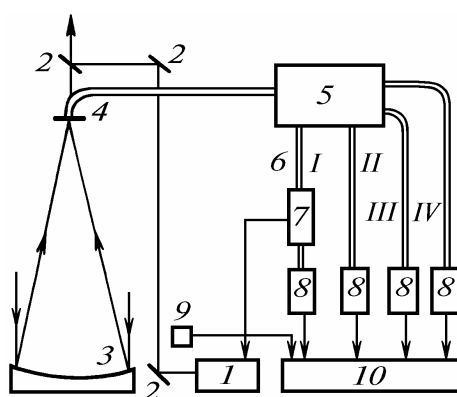


Рис. 1. Блок-схема измерительного канала: 1 – лазер с коллиматором; 2 – отклоняющие зеркала; 3 – параболическое зеркало приемной антенны; 4 и 6 – световодные жгуты; 5 – двойной дифракционный монохроматор; 7 – электромеханический затвор; 8 – фотодетекторы субканалов I–IV; 9 – фотоэлемент для получения импульса запуска системы регистрации сигналов; 10 – система регистрации на базе ЭВМ «Электроника-60»

Рассеянное на несмещенной и комбинационных частотах излучение, поступившее на антенну, фокусируется на торец световодного жгута 4, составленного из кварцевых моноволокон, и передается на щель первой ступени двойного дифракционного монохроматора 5. В фокальной плоскости объектива монохроматора выделяются два спектральных интервала, центры которых соответствуют положению вращательных линий КР молекул азота с квантовыми числами $J = 6$ и 14 . Также выделяется участок спектра, соответствующий несмещенной частоте. Это излучение световодным жгутом 6 передается на фотодетектор 8 субканала I. Перед детектором установлен электромеханический обтюратор 7 для отсечки излучения, приходящего с высот ниже 15–20 км. Электромагнитная головка обтюратора вырабатывает электрические импульсы, которые после деления частоты используются для запуска затвора лазера с частотой около 10 Гц.

Свет, рассеянный на оптических элементах первой ступени монохроматора, создает фон излучения несмещенной частоты. Его интенсивность составляет примерно 10^{-4} от первоначальной. Вторая ступень монохроматора позволяет сконцентрировать большую часть этого фона в узкий пространственный интервал в фокальной плоскости объектива. Это излучение, сравнимое по интенсивности с линиями вращательного КР, световодным жгутом передается на фотодетектор 9 субканала II, который предназначен для определения превышения аэрозольного рассеяния над молекулярным на тех высотах, которые в субканале I отсекаются обтюратором.

Излучение двух участков спектра вращательного КР световодными жгутами передается на фотодетекторы субканалов III и IV. Подавление фона несмещенной частоты в этих субканалах составляет 10^{-8} . В качестве фотодетекторов используются ФЭУ-104, специально отобранные по качеству счетных характеристик. Регистрация импульсов фототока всех субканалов осуществляется четырехканальным счетчиком импульсов, встроенным в ЭВМ «Электроника-60». Быстродействие счетчиков составляет 25 МГц.

3. Методика измерений

На рис. 2 приведен пример реализации сигналов всех четырех субканалов КР-канала станции зондирования. Каждый из них описывается уравнением лазерного зондирования

$$N_i(h) h^2 = A_i G_i(h) \beta_i(h) \exp \left\{ -2 \int_0^h \sigma(h') dh' \right\}, \quad (1)$$

где $I = 1, 2, 3, 4$; N_i – число зарегистрированных фотонов в некотором пространственном стробе на высоте h ; A – аппаратная постоянная i -го субканала; $G_i(h)$ – геометрическая

функция антенного устройства; $\beta_i(h)$ – коэффициенты обратного рассеяния на рабочей длине волны i -го субканала.

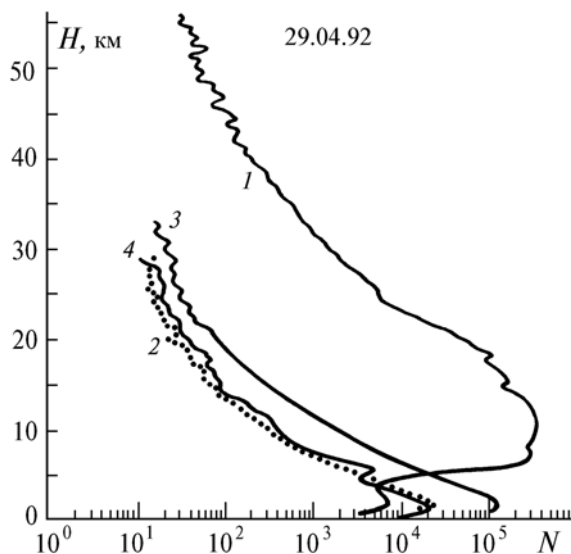


Рис. 2. Пример реализации сигналов в субканалах I–IV, которым соответствуют кривые 1–4. N – число фотоотсчетов во временном стробе, соответствующем $\Delta H = 480$ м при накоплении по 10^4 посылкам лазерных импульсов

Между входящими в систему уравнений (1) величинами существуют следующие соотношения:

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_a + \beta_m, \quad (2)$$

$$\beta_3 + \beta_4 = k \beta_m, \quad (3)$$

где β_a и β_m – соответственно аэрозольный и молекулярный компоненты коэффициента обратного рассеяния на несмещенной частоте; k – коэффициент пропорциональности.

$$G_1(h) = F(h) G(h), \quad G_2(h) = G_3(h) = G_4(h) = G(h), \quad (4)$$

где $G(h)$ – собственно геометрическая функция антенного устройства, а $F(h)$ – функция действия электромеханического затвора, имеющая область значений от 0 до 1. Вследствие малого частотного сдвига вращательных линий КР коэффициент ослабления $\sigma(h)$ принимается равным для всех четырех субканалов.

Следствием соотношений (1)–(4) являются выражения:

$$N_1(h)/N_2(h) = F(h)A_1/A_2, \quad (5)$$

$$R(h) = kN_2(h)/(A_2N_3(h)/A_3 + A_2N_4(h)/A_4), \quad (6)$$

где $R(h) = [\beta_a(h) + \beta_m(h)]/\beta_m(h)$ – отношения рассеяния.

Величины $N_i(h)$ измеряются в процессе зондирования. Отношения типа A_i/A_j определяются соответствующей калибровкой как отношения реакций детекторов субканалов на равные световые потоки. Коэффициент k находится как среднее значение из множества калибровочных измерений, для которых можно априорно задать значение $R(h)$.

Таким образом, соотношения (5) и (6) дают возможность определить функцию открытия электромеханического затвора $F(h)$ и отношение рассеяния в зоне неопределенности геометрической функции антенного устройства. Кроме того, суммарный сигнал третьего и четвертого субканалов дает возможность довольно точной оценки этой функции путем расчета сиг-

нала КР в нижних слоях, используя высотный ход убывания плотности молекулярной атмосферы и значения сигнала КР на высотах 15 ÷ 20 км, где сигнал пропорционален h^{-2} , в качестве калибровочных отсчетов.

Профиль температуры находится из отношения сигналов в субканалах III и IV. Согласно методике, описанной в [4], профиль отношения $L(h)$ связан с температурой следующей формулой:

$$L(h) = [N_3(h) - n_3] / [N_4(h) - n_4] = \exp [\alpha/T(h) + b], \quad (7)$$

где $N_3(h), N_4(h)$ – измеренные числа фотоотсчетов в субканалах III и IV; n_3, n_4 – произведения измеренной средней скорости поступления шумовых отсчетов на длительность строба и количество вспышек лазера; α и β – аппаратные постоянные, зависящие от выбора участков вращательного СКР.

Абсолютная ошибка измерений температуры оценивается формулой

$$\delta T = T^2 \delta L / (\alpha L), \quad (8)$$

где δT и δL – среднеквадратические отклонения соответствующих величин.

Если предположить, что сигнальные и шумовые отсчеты подчиняются пуассоновской статистике, то формулу (8) можно записать в следующем виде:

$$\delta T = T^2 \sqrt{N_3 + n_3 + L^2(N_4 + n_4)} / \alpha(N_3 - n_3).$$

Калибровочная константа α имеет значение порядка $7 \cdot 10^2$ °К. Поэтому для измерения температуры с точностью в один градус требуется накопить порядка 10^5 фотоотсчетов в стробе. Из приведенного на рис. 3 профиля температуры хорошо видно возрастающее с высотой влияние недостаточного статистического накопления сигнала. Ввиду того, что некоторые наши исследования требуют сведений о температуре и влажности на высотах образования перистых облаков, нам необходимо увеличить энергетический потенциал лидара. Простая интерполяция уже полученных результатов показывает, что для достижения точности $1 \div 1,5^\circ$ на высотах тропопаузы требуется увеличение потенциала на порядок.

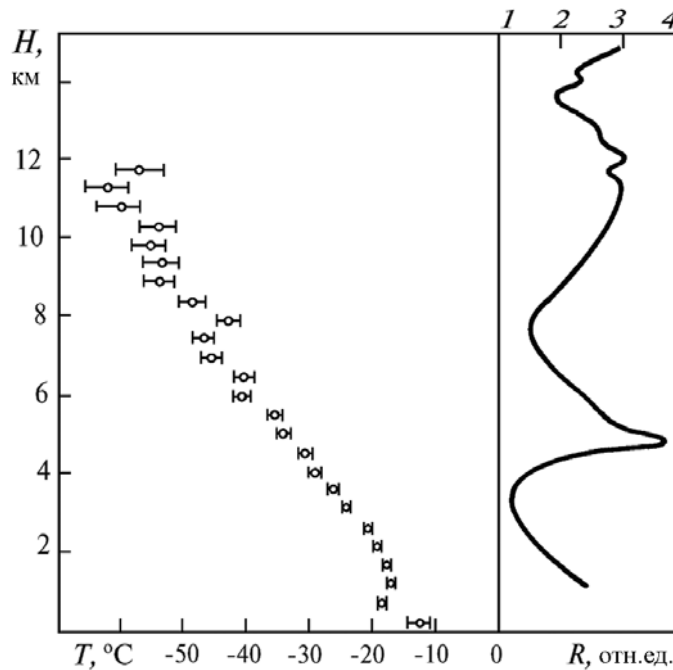


Рис. 3. Профиль температуры T и отношения рассеяния R , полученные обработкой сигналов, представленных на рис. 2 кривыми 2, 3, 4

Нами планируются некоторые мероприятия по улучшению качества оптического тракта канала, но главный резерв состоит в оснащении лидара лазером со средней световой мощностью $5 \div 10$ Вт. Одновременно это будет способствовать решению проблемы измерения влажности и корректного разделения аэрозольного и молекулярного рассеяния.

Последнее станет возможным до высот 20–30 км и позволит использовать известную [5] методику оценки профиля температуры на больших высотах по интенсивности рэлеевского рассеяния.

1. Кауль Б. В. // Оптика атмосферы. 1992. Т. 5. N. 2. С. 431–438.
2. Cohen A., Cooney Y. A., Geller K. N. // Appl. Opt. 1976. V. 15. N. 11. P. 2896.
3. Arshinov Yu. F., Bobrovnikov S. M., Zuev V. E., Mitev V. // Appl. Opt. 1983. V. 22. N. 19. P. 2984.
4. Волков С. Н., Кауль Б. В., Шапранов В. А., Шелефонтьук Д. И. // Оптика атмосферы. 1992. Т. 5. N. 6. С. 608–610.
5. Kent G. S., Wright R. W. H. // Journ. Atmosph. Terr. Phis. 1969. V. 32. P. 917.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
г. Томск

Поступила в редакцию
19 ноября 1992 г.

S. N. Volkov, B. V. Kaul, A. L. Kusnetsov, A. P. Shapranov,
D. I. Shefontyuk. **A Combined Channel for Measuring the Profiles of Temperature and Aerosol at Lidar Complex of High Altitude Lidar Sensing.**

The paper presents a basic block-diagram and characteristics of one of the measuring channels, realized with the use of the multichannel lidar complex, with the diameter of receiving antenna 2.2 m. For the measurements the Raman scattering effects are used with participation of rotational levels of atmospheric gases as well as elastic scattering on aerosols and molecules. The methods are described for obtaining the data on the temperature profile and the relationship of aerosol scattering to molecular one.