

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА СИБИРСКОЙ ЛИДАРНОЙ СТАНЦИИ

^{1,2}С.М. Бобровников, ^{1,2}Е.В. Горлов, ¹В.И. Жарков, ¹Д.А. Трифонов

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия
zharkov@iao.ru

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

APPLYING HIGH SPECTRAL RESOLUTION TECHNOLOGY AT THE SIBERIAN LIDAR STATION

^{1,2}S.M. Bobrovnikov, ^{1,2}E.V. Gorlov, ¹V.I. Zharkov, ¹D.A. Trifonov

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia
zharkov@iao.ru

²National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Аннотация. Представлен проект лидара высокого спектрального разрешения на основе йодного молекулярного фильтра для корректных измерений вертикального распределения температуры стратосферы и мезосферы. В конструкции лидара используется главное зеркало Сибирской лидарной станции в сочетании с высокомоощным одночастотным Nd:YAG лазером со сверхузким спектром излучения (Powerlite 9030). Этот подход позволяет применить технологию высокого спектрального разрешения для восстановления профиля молекулярной плотности атмосферы до высот порядка 80–90 км и последующего его пересчета в температуру.

Ключевые слова: лазер, лидар высокого спектрального разрешения, атмосфера.

Abstract. A project of a high spectral resolution lidar based on an iodine vapor molecular filter for adequate measurements of the temperature profiles of the stratosphere and mesosphere is presented. The lidar design includes the main mirror of Siberian Lidar Station and a high-power single-frequency Nd: YAG laser with an ultra-narrow emission spectrum (Powerlite 9030). This approach allows us to apply of high spectral resolution technology to determine the molecular density profile of the atmosphere up to about 80–90 km and to convert it to the temperature.

Keywords: laser, High Spectral Resolution Lidar (HSRL), atmosphere.

ВВЕДЕНИЕ

Температура является важнейшим геофизическим параметром атмосферы. Вертикальное распределение температуры атмосферы и её термическая стратификация во многом отражают устойчивость состояния атмосферы, являются индикаторами климатических изменений, определяют глобальный характер атмосферной циркуляции. При этом с точки зрения полноты получаемой геофизической информации очень важно осуществлять глобальный мониторинг вертикального распределения температуры атмосферы во всём диапазоне высот от приземного слоя до мезосферы с требуемым пространственно-временным разрешением.

Простейшим вариантом систем дистанционного измерения температуры является обыкновенный шар-зонд с контактным датчиком температуры (заметим, что именно эти системы до сих пор стоят на вооружении метеорологических станций, причем не только нашей страны). Достаточно высокая стоимость зонда при необходимости проведения регулярных измерений делает такую систему слишком дорогостоящей. Недостатком является и то, что траектория подъема зонда зачастую существенно отличается от вертикальной. Даже при обычных для нижней атмосферы скоростях переноса воздушных масс при подъеме на высоту в 15–20 км зонд может оказаться смещенным от исходной точки запуска на десятки и даже сотни километров, что делает затруднительным использование таких профилей температуры в задачах метеопрогноза. Кроме того, верхняя граница подъема шар-зонда ограничена высотой 20–25 км.

Существуют более интеллектуальные, отличающиеся от лобового решения варианты, в которых атрибут дистанционности уже не связан просто с проведением многократных контактных точечных измерений, а является неотъемлемой принадлежностью метода. Системами, отвечающими такому критерию, являются лидары, чей принцип действия основан на анализе особенностей взаимодействия с веществом распространяющегося вдоль трассы зондирования лазерного излучения [Бобровников 2015; Arshinov, 1983; Nedeljkovich, 1993; Vaughan, 1993; Behrendt, 2000].

Простейшим примером таких систем измерения температуры могут служить лидары на рэлеевском рассеянии, в которых измерение температуры связано с восстановлением профиля молекулярной плотности атмосферы [Hauchecorne, 1980; Shibata, 1986] и последующим его пересчетом в температуру, оправданном в предположении гидростатического равновесия атмосферы. Исходной информацией для лидаров такого типа является интенсивность упругого рассеяния зондирующего излучения, для которого принципиально неразделимы вклады молекулярного и аэрозольного рассеяния. Последнее обуславливает основной недостаток метода — он оказывается работоспособным лишь для области атмосферы, свободной от присутствия в ней аэрозоля. Обычно это интервал высот от 30 км и выше. Оценки эффективности метода, приведенные в работе [Shibata, 1986], дают в терминах точности измерения температуры величину ± 10 К на высоте зондирования 60 км при времени усреднения профиля 15 мин.

Известные примеры применения данной методики для восстановления температуры в присутствии аэрозоля [Liu, 1999] связаны с использованием дополнительной селекции аэрозольного рассеяния и выделения чисто молекулярного рассеяния.

Данный лидарный метод основан на технологии высокого спектрального разрешения, которая заключается в разделении лидарных откликов молекулярного и Ми (аэрозольного) рассеяния путем применения узкополосного молекулярного абсорбционного фильтра на парах йода. Техническая реализация метода возможна только с помощью импульсного одночастотного лазера с инжектором с сверхузким спектром излучения.

Лидар высокого спектрального разрешения регистрирует сигнал рэлеевского рассеяния, спектр которого уширяется благодаря эффекту Доплера при рассеянии на хаотически движущихся молекулах и эффекту Манделштама-Бриллюэна при рассеянии на флуктуациях плотности. Величина уширения очень мала и составляет 8 ГГц (менее 0.01 нм) в видимой области спектра. Однако сигнал аэрозольного рассеяния практически повторяет спектр лазерного излучения и полностью поглощается в молекулярном абсорбционном фильтре с полушириной порядка 1 ГГц (около 1 пм). Данный метод позволит корректно измерять температуру атмосферы путем восстановления профиля молекулярной плотности атмосферы в интервале высот от 20 км и выше.

Сибирская Лидарная станция (СЛС) имеет огромный потенциал, а именно самое большое монозеркало с диаметром 2.2 м, используемое для задач лазерного зондирования и мощный одномодовый импульсно-периодический Nd:YAG лазер Powerlite 9030 с инжекционным сидером (NP Photonics) [Бобровников, 2017]. Поэтому применение методики высокого спектрального разрешения на СЛС может дать более качественную (ниже погрешность, выше пространственное и временное разрешение, меньшее время накопления измерений и т. д.) количественную информацию о температуре стратосферы и нижней мезосферы.

Для возможности применения методики высокого спектрального разрешения на СЛС были проведены исследования ширины линии излучения второй гармоники одномодового Nd:YAG лазера. Для измерения ширины линии излучения лазера была реализована схема эксперимента (рис. 1).

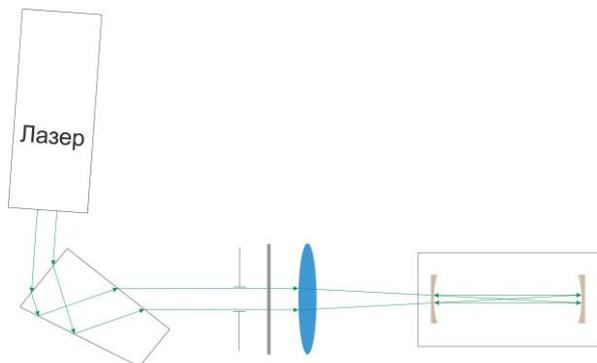


Рис. 1. Схема эксперимента для измерения ширины линии излучения второй гармоники Nd:YAG лазера

Как показано на рис. 1, излучение второй гармоники лазера с длиной волны 532 нм проходит через призму Пеллин-Брока и диафрагму для устранения остатков излучения основной гармоники Nd:YAG лазера. Далее лазерное излучение ослабляется нейтральными светофильтрами и фокусируется линзой в центральную область конфокального сканирующего интерферометра Фабри-Перо SA200-5B (Thorlabs). Измерения интерферометра показали, что спектр линии лазерного излучения, при захвате и удержании одной поперечной его моды, имеет ширину не более 150 МГц (около 0.15 пм), по высоте амплитуды.

Для поиска подходящей линии поглощения йодного фильтра было измерено поглощение 10 см кюветы с парами йода с помощью инжекционного Nd:YAG лазера во всем диапазоне перестройки его длины волны. Кювета находилась при комнатной температуре 26 °С. Схема измерения поглощения йодного фильтра представлена на рис. 2.

Измерения интенсивности лазерного излучения, прошедшего через йодную кювету, проводились в диапазоне перестройки длины волны инжекционного лазера от 532.0625 нм до 532.1175 нм с шагом 2.5 пм. Результаты измерений показали, что в диапазон перестройки длины волны инжекционного Nd:YAG лазера попадает не менее чем две интенсивные полосы поглощения молекулярного йода.

Для разделения аэрозольного и молекулярного рассеяния в тропосфере, авторы работ использовали йодную кювету с подавлением лазерной линии не менее чем в 10 000 раз [Разенков, 2013]. По предварительным оценкам, для полного устранения аэрозольного рассеяния в стратосфере достаточно осуществить подавление лазерной линии не менее чем в 100 раз. Для достижения подавления лазерной линии в три порядка величины необходимо нагреть кювету.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для измерения температуры стратосферы и нижней мезосферы (30–85 км) лучше всего подходит метод, основанный на восстановлении профиля молекулярной плотности атмосферы и последующим его пересчетом в температуру путем регистрации интенсивности упругого рассеяния зондирующего излучения (Рэлеевское рассеяние). Однако для корректного восстановления профиля молекулярной

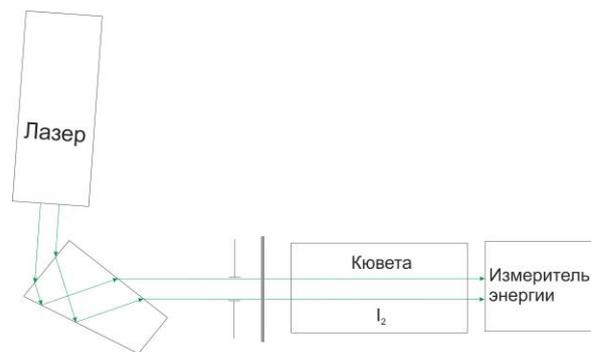


Рис. 2. Схема измерения поглощения кюветы с парами йода

плотности атмосферы необходимо исключить возможность регистрации аэрозольного сигнала. Было показано, что на СЛС для надежного устранения аэрозольного рассеяния возможно применить технологию высокого спектрального разрешения, путем применения узкополосного молекулярного абсорбционного фильтра на парах йода.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-1378.2019.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И. Лидар для измерения вертикального распределения метеопараметров атмосферы // Труды XIV конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». 2015. С. 302–303.

Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И., Трифонов Д.А. СКР-лидар для обнаружения тонкой структуры температурной стратификации в стратосфере // Труды XV конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». 2017. С. 243–245.

Разенков И.А. Аэрозольный лидар для непрерывных атмосферных наблюдений. // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 52–63.

Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M., Zuev V.E., Mitev V.M. Atmospheric temperature measurements using a pure rotational Raman lidar // *Applied Optics*. 1983. V. 22, N 19. P. 2984–2990.

Behrendt A., Reichardt J. Atmospheric temperature profiling in the presence of clouds with a pure rotational Raman lidar by use of an interference-filter-based polychromator // *Applied Optics*. 2000. V.39, N 9. P. 1372–1378.

Hauchecorne A., Chanin M.-L. Density and temperature profiles obtained by lidar between 35 and 75 km // *Geophys. Res. Lett.* 1980. N 7. P. 565–568.

Liu Z., Matsui I., Sugimoto N., High-Spectral-Resolution Lidar Using an Iodine Absorption Filter for Atmospheric Measurements // *Optical Engineering*. 1999. V. 38, N 10. P. 1661–1670.

Nedeljkovich D., Hauchecorne A., Chanin M.L. Rotational Raman lidar to measure temperature from the ground to 30 km // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1993. V. 31, N 1. P. 90–101.

Shibata T., Kobuchi M., Maeda M. Measurement of density and temperature profiles in the middle atmosphere with a XeF lidar // *Applied Optics*. 1986. V.25, N 5. P. 685–688.

Vaughan G., Wareing D.P., Pepler S.J., Thomas L., Mitev V. Atmospheric temperature measurements made by rotational Raman scattering // *Applied Optics*. 1993. V.32, N 15, P. 2758–2764.