

АВИАЦИОННЫЙ РАМАНОВСКИЙ ЛИДАР С УЛЬТРАСПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2009 г. С. В. Алимов*; О. Б. Данилов**, доктор физ.-мат. наук;
А. П. Жевлаков**, канд. физ.-мат. наук; С. В. Кащеев**;
Д. В. Косачев*, канд. физ.-мат. наук; Ан. А. Мак**, канд. физ.-мат. наук;
С. Б. Петров**, канд. физ.-мат. наук; В. И. Устюгов**, канд. физ.-мат. наук

* ООО “Тюментрансгаз”, г. Югорск , Ханты-Мансийский АО

** Институт лазерной физики НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”,
Санкт-Петербург

Рассмотрены основные компоненты техники создания лидара с ультраспектральным ($\lambda/\Delta\lambda \geq 1000$) разрешением, развитой в ИЛФ НПК “ГОИ им. С.И. Вавилова”. Особое внимание удалено возможности многоцелевого применения метода спонтанного комбинированного рассеяния для аэропоиска и синхронного обнаружения широкого набора химических веществ и соединений при лазерном зондировании земной биосферы на одной длине волн. Представлены технические характеристики функциональных подсистем и результаты летных испытаний лидара.

Коды OCIS: 300.6540, 350.1260, 350.6090.

Поступила в редакцию 11.11.2008.

Введение

Исследование состояния земной биосферы является важным источником информации для решения не только текущих социально-экономических задач, но и проблем устойчивого развития цивилизации в целом [1]. Эффективность прогноза климатических и экологических изменений достигается при реализации достаточно полного мониторинга с учетом всех естественных и антропогенных факторов, влияющих на окружающую среду. Учет источников загрязнения атмосферного воздуха и инвентаризация выбросов осуществляются во многих странах мира, в том числе и в России.

На территории России, как известно, насчитывается около 100 000 опасных производств и объектов, из которых особую опасность представляют 1500 ядерных и 3000 химических и биологических объектов. В нефтяной и газовой промышленности стран СНГ эксплуатируются более 200 000 км магистральных газопроводов, 65 000 км магистральных нефтепроводов, более 6000 км продуктопроводов и более 300 000 км промысловых трубопроводов различного назначения. При этом 2/3 магистральных трубопроводов имеют возраст более 25 лет. На трубопроводном транспорте нефти и газа ежегодно происходит более 100 крупных аварий [2].

Недостатком работы практических всех предприятий, связанных в своей деятельности с

загрязнением окружающей среды, является отсутствие современных диагностических средств, технологий и специалистов. В России разработано множество средств диагностики природной среды не только для целей эколого-метеорологического мониторинга, но и для задач исследовательского, технического, бытового и специального назначения. Однако с учетом огромного числа факторов, действующих на измерительную аппаратуру в реальных условиях, а также требований соответствующих нормативно-технических документов большинство хорошо зарекомендовавших себя в лабораторных условиях приборов оказываются непригодными для эксплуатации в реальных условиях. Для многих направлений экологического диагностирования повышение точности и чувствительности измерений параметров антропогенных загрязнений остается наиболее проблемным.

Лидарные исследования позволяют оценивать выделение веществ техногенного и природного происхождения, их распространение и поглощение во всей земной биосфере, проводить оперативное дистанционное определение локальных концентраций вредных и взрывоопасных конденсированных и газообразных примесей в атмосфере, на поверхности земли и воды, в том числе обнаружение утечек из нефте- и газопроводов. Лазерное зондирование – наиболее современный метод исследования параметров составляющих земной биосферы, которые дис-

танционно в принципе не могут быть измерены другими методами. К преимуществам лидарного метода по сравнению с традиционными, например физико-химическими, относятся дистанционность, бесконтактность, возможность непрерывного площадного и профильного сканирования с одновременным определением широкого набора химических элементов и соединений, а также высокая скорость детектирования. Важно также, что лидарные комплексы осуществляют оперативное зондирование биосферы без деструктивных воздействий на нее.

Развитие лидарной техники началось в 1970-х годах [3], а широкий размах получило в 1990-х годах благодаря удешевлению комплектующих изделий и элементной базы, с одной стороны, и прогрессу в лазерной технике, средствах вычислительной техники и программного обеспечения, с другой. Несмотря на то что лидарные средства измерения считаются достаточно новой технологией, они уверенно занимают прочные позиции на мировом рынке. И сегодня можно констатировать их массовое распространение не только в промышленно развитых, но и во многих развивающихся странах.

Большое количество организаций и фирм за рубежом занимаются разработкой подобной аппаратуры, обработкой и интерпретацией полученной информации. Развитие лидаров стоит в общем ряду разработок авиационных лазерных информационных комплексов – одного из приоритетных направлений в многолетней деятельности Института лазерной физики (ИЛФ) НПК “ГОИ им. С.И. Вавилова”.

Известно множество примеров разработки отечественными предприятиями образцов лидаров

на основе твердотельных, полупроводниковых, газовых (He–Ne-, азотных, эксимерных, CO₂-, HF-, DF-, Cu-) лазеров [4–6]. Развитие этой аппаратуры идет в направлении определения наиболее перспективных способов получения спектральной информации, повышения чувствительности, пространственного и спектрального разрешения, увеличения точности привязки шкалы длин волн при сокращении габаритов и веса, внедрения унифицированных узлов аппаратуры и т. д. По селективной способности определения спектров современные спектрометры делятся на многоспектральные ($\lambda/\Delta\lambda \geq 10$), гиперспектральные ($\lambda/\Delta\lambda \geq 100$) и ультраспектральные ($\lambda/\Delta\lambda \geq 1000$). При исследовании в атмосфере газовых составляющих с низкой концентрацией необходимо использовать ультраспектральные лидары, обеспечивающие спектральное разрешение $\lambda/d\lambda \geq 1000$ в широком спектральном диапазоне.

До последнего времени разработки лидарных систем, обладающих экстремально высоким спектральным разрешением, практически отсутствовали. В созданном в ИЛФ ГОИ им. С.И. Вавилова прототипе авиационного лидара, по-видимому, впервые реализована и продемонстрирована ультраспектральная селективность.

Лидарный метод спонтанного комбинационного рассеяния

Для измерений содержания газообразных примесей и конденсированных веществ в окружающей среде в основном используются метод дифференциального поглощения (ДП) и метод спонтанного комбинационного рассеяния (СКР),

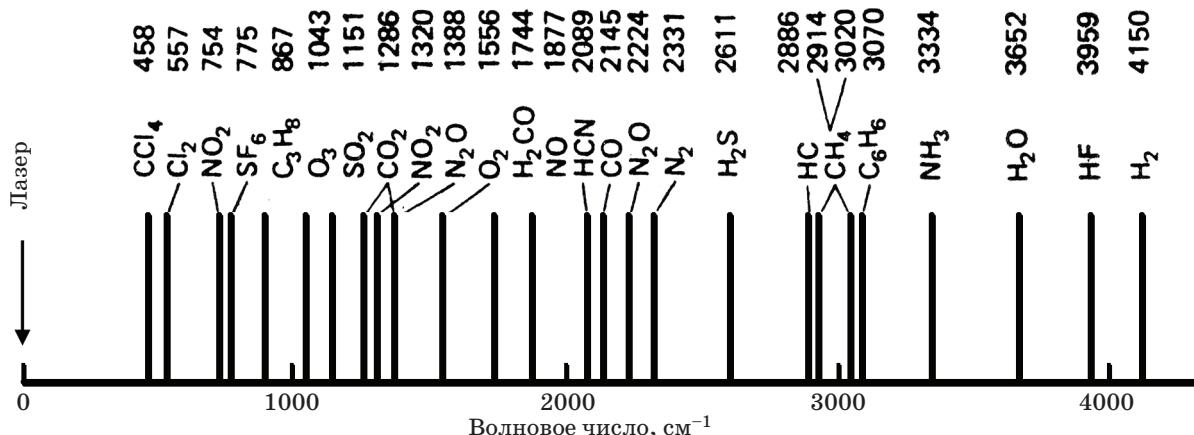


Рис. 1. Стоксовы сдвиги (v_{kw}) КР различных молекул при возбуждении лазерным излучением.

или рамановский. Лидары, построенные на методе ДП, работают в ИК диапазоне (в окнах прозрачности атмосферы), а метод СКР наиболее чувствителен в УФ области.

Комбинационное рассеяние излучения газами, жидкостями и твердыми телами является прямым источником информации о химическом составе различных сред (рис. 1) [7]. Этот метод нашел широкое применение не только при оперативном контроле состояния приземной атмосферы, экологической безопасности среды, но и для проведения широкого круга исследований в интересах физики и химии атмосферы, геофизики и геологии, других сфер антропогенной деятельности. В частности, рамановская спектроскопия широко используется при исследованиях, реставрации, восстановлении и консервации произведений искусства и объектов культурного наследия [8, 9]. При проведении спектрального анализа рассеянного на частичках излучения с волновым числом $v_0 = 1/\lambda_0$ (λ_0 – длина волны) наблюдаются серии боковых частот, сдвинутые на величины, равные частотам колебательно-вращательных переходов облучаемых молекул $v_{\text{кв}}$.

В сравнении с ДП метод СКР обладает следующими достоинствами:

- возможность при зондировании одним лазером одновременно регистрировать широкий набор и непосредственно измерять абсолютные значения концентраций химических веществ –

газовых компонентов, жидкостей и аэрозолей – без изменения состава и режима аппаратуры. Метод ДП для идентификации каждого из веществ в сложных смесях требует набора лазеров или лазера с перестройкой в спектральном диапазоне 2,5–15 мкм, работающего одновременно на двух близкорасположенных длинах волн; кроме того, широкие полосы поглощения атмосферными парами воды и углекислым газом не позволяют обнаруживать компоненты, имеющие собственные полосы поглощения в этих же спектральных интервалах. Метод ДП пригоден для регистрации лишь тех веществ, линии поглощения которых совпадают с длиной волны зондирующего лазера. Отсутствие переналожения спектров СКР в широком диапазоне длин волн открывает возможности селекции исследуемых антропогенных выбросов на фоне системы Земля-атмосфера при наблюдении с борта летательных аппаратов;

- чрезвычайно высокая чувствительность к спектральным отличительным признакам различных покрытий и материалов, поэтому метод СКР особенно эффективен при обнаружении малоконтрастных объектов. Эффективность метода может быть усиlena за счет дополнительной селекции целей по отрицательному контрасту “объект–фон”;

- возможность использования метода СКР как вочных, так и дневных условиях из-за отсутствия солнечных помех при использовании

Примеры зарубежных рамановских лидаров

№ п.п.	Наименование КР-лидара	Длина волны лазера, нм	Регистрируемые вещества	Фирма-разработчик
1	IAP RMR Lidar	355, 532	SO ₂ , CH ₄ , пары Na,	Leibniz Inst. of Atmospheric Physics, Germany
2	Tito Scalo (PZ)	355	Аэрозоли, пары HO ₂	Potenza, Southen Italy
3	UPC SRL system (Scanning Raman Lidar)	532, 1064	Аэрозоли, пары HO ₂	EARLINET European network, Spain-France
4	SRL (Scanning Raman Lidar)	532	Аэрозоли, пары HO ₂	Der. of Energy, Oklahoma, USA
5	RASL (Raman Airborne Spectroscopic Lidar)	308, 355, 532, 1064	CO ₂ , O ₂ , SO ₂	Colorado, State Univ., USA
6	AROTEL	355	Озон, аэрозоли, NO ₂	Langley Research Center, USA
7	ARL (Airborne Raman Lidar)	351	CH ₄ , H ₂ O	Goddar Space Flight Center, USA
8	Raman Lidar c-130	532	SO ₂ , NO ₂ , аэрозоли	National Center for Atmospheric Research, Japan
9	PARS (Photo-acoustic Raman spectrometer)	266	H ₂ , CH ₄	Mitsubishi Heavy Industry, Japan

ультрафиолетовой “солнечно-слепой” области спектра ($\lambda \leq 300$ нм). На чувствительность оптико-электронных систем, применяемых в методе ДП, влияет не только рассеянное днем солнечное излучение, но и тепловой фон Земли, особенно в летних условиях;

– возможность непосредственно измерять абсолютную концентрацию газовых составляющих атмосферы, так как в качестве рефера служит концентрация азота;

– более высокая надежность и менее жесткие условия эксплуатации, в частности, в СКР-лидерах не требуются лазеры с точной настройкой и стабилизацией длины волны, охлаждаемые фотоприемные устройства;

– легкая перестраиваемость схемы для регистрации флуоресценции обнаруживаемых веществ без изменения структурных элементов.

Лидарный метод комбинационного рассеяния широко используется за рубежом. В последние десятилетия разработаны рамановские лидары различного назначения. Чаще они работают в спектральном диапазоне более 350 нм в верхнюю полусферу и размещаются стационарно на земле для обнаружения в атмосфере, в частности, паров воды и метана до высот порядка 10 км (вочных условиях) [10, 11], на автомобилях для экологических исследований промышленных выбросов [12] и на самолетах для измерения концентрации озона, паров воды и пр. [13–15].

В таблице, составленной по материалам J. of Geophysic Research 2003.V. 108. № .D23, приведены примеры зарубежных авиационных рамановских лидаров, откуда следует, что все лидары, как правило, регистрируют лишь единицы атмосферных компонентов и примесей. В качестве источников зондирования в них применяются твердотельные лазеры с ламповой накачкой или эксимерные лазеры, обладающие небольшим ресурсом работы (не более 10^8 импульсов) и солидными массогабаритными характеристиками (масса 150–200 кг, объем до 1 м³).

Метод формирования ультраспектрального разрешения в рамановском лидаре

Хотя молекулярные колебания имеют ширину спектральной линии не более 1 см⁻¹, спектры рамановского рассеяния различных молекул, особенно в коротковолновой области, могут располагаться близко друг к другу. Например, у азота и метана значения волновых чисел колебательных переходов отличаются мало. Поэтому

использование рамановского метода для селекции широкого набора атмосферных примесей требует ультравысокого спектрального разрешения, что позволяет исключить перекрытие спектральных линий СКР при существенной разнице концентраций соответствующих молекул.

Современные рамановские лидары могут быть построены с весьма малыми габаритами и массой. Это вполне обеспечивается применением компактных твердотельных лазеров с диодной накачкой и облегченной оптикой. Улучшение инструментальной точности и массогабаритных характеристик в оптико-электронных комплексах, как известно, связано с уменьшением длины волны излучения. Применение УФ средств подсветки и приема в лидарах позволяет качественно увеличить чувствительность и точность обнаружения химических веществ и физических объектов. Традиционные средства повышения чувствительности и селективности приемных систем, как правило, связаны с увеличением светосилы входной оптики и с уменьшением спектральной ширины сигналов. В лидарных комплексах подобный путь часто сопровождается необходимостью увеличения мощности зондирующего излучения, что не гарантирует безопасность воздействия на органы зрения людей, попавших в область его распространения. Поэтому реализация перечисленных требований к точности измерений предполагает разработку методов и устройств, способствующих значительному снижению уровня фоновых засветок, увеличению помехозащищенности и отношения сигнал/шум.

Зондирующее излучение лидаров может представлять угрозу для здоровья людей из-за возможного поражения органов зрения и ожогов кожи. Причем на практике наибольшее внимание уделяется только угрозе зрению случайных наземных наблюдателей (рис. 2), тогда как ожоги кожи возможны лишь на очень близких расстояниях (единицы метров), т. е. в лабораторных условиях, где с аппаратурой работает специально обученный персонал при соблюдении норм безопасности.

Лидары с длиной волны источника зондирования порядка 1,0 мкм оказываются самыми опасными (наивысший, IV класс опасности по международной классификации), а в диапазоне спектра около 0,26 и 1,5 мкм оказываются самыми безопасными (низший, I класс опасности). Такое принципиальное различие объясняется тем, что стекловидное тело глаза в значительной степени прозрачно на $\lambda \approx 1,0$ мкм и почти полно-

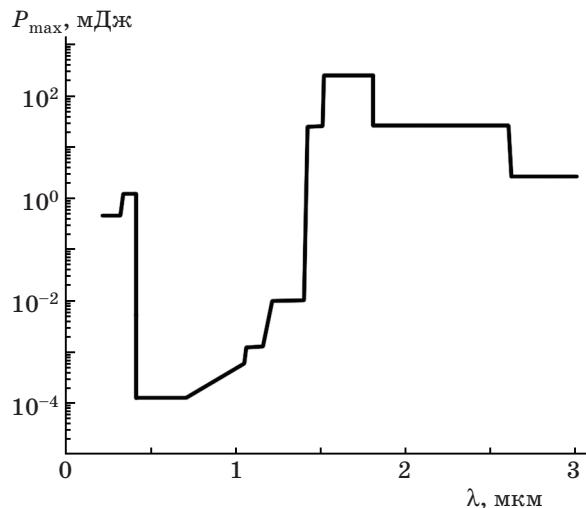


Рис. 2. Диаграмма безопасных уровней облучения глаз P_{\max} лазерными импульсами [16]. Диаметр пучка 10 мм, длительность импульса 6 нс, частота 10 Гц.

стью непрозрачно на $\lambda \approx 0,26$ и $1,5$ мкм. Поэтому УФ лазерное излучение не может достигнуть сетчатки и вызвать ожог, так как оно будет полностью поглощено стекловидным телом глаза. Напротив, лазерное излучение с $\lambda \approx 1,0$ мкм будет сфокусировано хрусталиком и без серьезного ослабления достигнет сетчатки, что при превышении порогового значения плотности мощности может привести к ожогу сетчатки.

Однако не следует считать, что лидары с рабочей $\lambda \approx 1,5$ мкм предпочтительны из-за их почти полной безопасности. Поскольку стекловидное тело глаза в основном состоит из воды, оно оказывается почти непрозрачным – вода интенсивно поглощает излучение на $\lambda \approx 1,5$ мкм. Кроме того, лидары с такой длиной волны чрезвычайно чувствительны к содержанию водяного пара в атмосфере и могут “слепнуть” уже при незначительном снижении метеорологической дальности видимости. По этой же причине лазерные импульсы с $\lambda \approx 1,5$ мкм не отражаются от водных и увлажненных поверхностей, а также от объектов, на поверхности которых по каким-либо причинам имеется слой влаги (например, роса). С этих позиций зондирование УФ лазерными импульсами является более предпочтительным.

Наиболее мощными источниками УФ когерентного излучения традиционно являлись электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов. До 1990-х годов на их

основе строилось большинство авиационных лидаров [17–19]. Но затем благодаря прогрессу в развитии электронной компонентной базы, компьютерной техники и программного обеспечения приоритеты в лазерном зондировании сместились в направлении использования малогабаритных твердотельных лазерных источников зондирования, более эффективных средств детектирования и обработки информации. Одно из требований к лазеру для СКР-лидара – он должен быть импульсным для обеспечения пространственного разрешения. При этом желательно, чтобы длительность импульса не превышала 10 нс, так как локальные скопления обнаруживаемых веществ могут иметь характерные размеры порядка 1 м. Второе – высокий темп следования импульсов при минимально возможных габаритах и энергопотреблении. И, наконец, длину волны зондирующего излучения целесообразно выбирать в УФ области спектра, где сечения СКР максимальны.

Дифференциальные сечения рамановского рассеяния колебательных переходов молекул увеличиваются с уменьшением длины волны. Поэтому в УФ области спектра метод СКР имеет наибольшие чувствительность и быстродействие. При $\lambda < 250$ нм заметно сказывается экстинкция атмосферы, а в области $\lambda > 320$ нм резко увеличивается уровень фоновых засветок, особенно в дневное время. В УФ области спектра основными поглощающими компонентами в атмосфере являются молекулы озона O_3 и кислорода O_2 . Но озон в тропосфере имеет чрезвычайно низкую концентрацию, а кислород поглощает в диапазоне 180–220 нм. Поэтому для работы в приземном слое атмосферы наиболее приемлем диапазон $\lambda = 250$ – 320 нм.

В этом “солнечно-слепом” диапазоне существенно повышается чувствительность лидара из-за предрезонансного усиления сигнала СКР [20, 21], в частности, для основных загрязнителей атмосферы (SO_2 , NO_2 , NO , H_2S , NH_3 и ароматических углеводородов), полосы поглощения которых лежат в данной области спектра.

Входные телекомпоненты в лидарах чаще всего строятся на основе отражательной оптики, поскольку зеркала могут иметь большие размеры при отсутствии хроматизма. Наибольшее распространение получили схемы Ньютона и Кассегрена, в фокусе которых устанавливается полевая диафрагма, щель полихроматора (спектрографа) или световолокно. Значительно реже используются линзовые входные объективы прежде всего из-за хроматических aberrаций и габаритных

ограничений. Очевидно, что схема Кассегрена при одинаковых фокусных расстояниях компактнее, хотя в ней имеет место экранирование вторичным зеркалом.

Для ультрафиолетовых приборов вообще, а для измеряющих слабые сигналы лидаров в особенности, необходима эффективная борьба с фоновыми засветками в самом приборе при одновременном подавлении рэлеевского рассеяния лазерного излучения на молекулах воздуха. Наиболее радикальным средством борьбы с рассеянным светом является применение двойных и даже тройных монохроматоров. Среди многообразия спектрографов с вогнутой решеткой наиболее широкое распространение получило лишь несколько, в частности, схема Пашена–Рунге. В приборах, построенных по этой схеме, входная щель, вогнутая решетка и выходная щель либо фотоприемник устанавливаются неподвижными на круге Роуланда, являющимся линией дисперсии, и механически не связанными друг с другом. С переходом в УФ область у призм и дифракционных решеток, как известно, существенно возрастает угловая и линейная дисперсия.

Для получения минимального уровня рассеянного излучения двойной полихроматор может строиться как по схеме с горизонтальной плоскостью симметрии, так и по смешанной, горизонтально-вертикальной схеме. Рассеянный свет зависит от количества оптических деталей в приборе: чем их меньше, тем лучше. Количественно оценить уровень рассеянного излучения на стадии проектирования невозможно, так как рассеянное излучение зависит от качества оптики, культуры ее производства.

Сигналы от рассеянного назад атмосферными компонентами излучения интенсивных источников зондирования относительно слабы во всем спектральном диапазоне чувствительности метода. Применение в лидарах высокочувствительных матричных ФПУ и линеек для УФ диапазона позволяет одновременно регистрировать спектр СКР со стоксовым сдвигом в широком интервале $v_{\text{кв}}$, от 400 до 4000 см⁻¹ (рис. 1), что дает возможность идентифицировать практически любые вещества. Существенными достоинствами подобных ФПУ является возможность одновременной регистрации в одноимпульсном режиме и накопления сигнала детектором в многоимпульсном. Однако в связи с тем, что матричные ФПУ и линеек для УФ и видимого диапазонов имеют максимальный размер чувствительных элементов не более 25 мм, их удобно использовать для обзорного анализа. Для

обнаружения конкретно выбранных веществ и более надежной их идентификации предпочтительно использовать ФЭУ, что дает возможность применять полихроматоры с высокой дисперсией. Модуль с ФЭУ важно выбрать с высокой квантовой эффективностью, определяющей в УФ области отношение сигнал/шум, при этом также необходимо учитывать темновой порог и темновой ток.

Повышение разрешающей способности приборов, предназначенных для исследования рассеивающих фоны веществ, связано с быстродействием фотоприемников. В “солнечно-слепой” области ФЭУ по сравнению с ПЗС-модулями обладают более высокими чувствительностью и быстродействием, что необходимо для регистрации сигналов с наносекундной длительностью. При этом могут быть применены два метода детектирования: цифровой со счетом фотонов и аналоговый с интегральным накоплением. Оба метода имеют высокую скорость регистрации сигналов, позволяют получать хорошее пространственное разрешение и обеспечивают увеличение чувствительности за счет накопления сигналов.

Поскольку измерения с помощью СКР-лидара ведутся путем усреднения сигналов по большому числу лазерных вспышек, то для зондирующего излучения твердотельных лазеров следует задаваться гауссовым угловым распределением интенсивности. Это позволяет рассчитать величину принимаемого приемной антенной светового потока и оптимизировать согласование всех оптических блоков лидара.

Прототип авиационного лидара с ультраспектральной селекцией

В ИЛФ НПК “ГОИ им. С.И. Вавилова” разработан и изготовлен СКР-лидар, предназначенный для непрерывного аэропоиска, идентификации и измерения мощности и поля концентрации утечек газов на трансконтинентальных нефте- и газопроводах (рис. 3). В нем ультраспектральное разрешение достигнуто за счет лазерного зондирования и регистрации приемных сигналов в “солнечно-слепой” области длин волн, где фоновые помехи на фотоприемное устройство лидара практически сведены к нулю. По реализованному спектральному разрешению ($\lambda/\Delta\lambda \gg 1000$) данный авиационный лидар превосходит известные аналоги почти на два порядка. Его отличают повышенные чувствительность и информативность в сочетании с широким диапазоном диагностируемых антропогенных выбросов. В разработ-

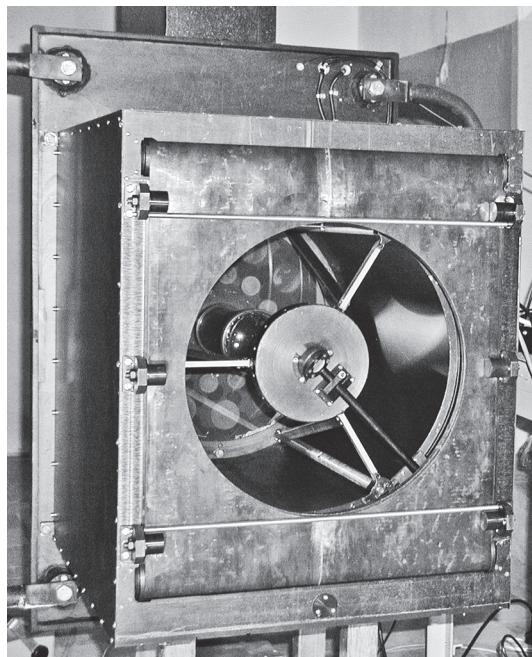


Рис. 3. Бортовой лидар для аэропоиска утечек на газопроводе.

ке лидара использованы новейшие достижения и технологии в области твердотельных лазеров с диодной накачкой [22–24], высокопрецизионной ультрафиолетовой оптики, фотоприемных устройств [25], а также в области фonoцелевых моделей [26], автоматизированных средств регистрации и обработки сигналов в гигагерцовом диапазоне частот [27]. Существующие в мире аналоги рассчитаны на обнаружение лишь ограниченного набора веществ и не обеспечивают измерений распределения поля концентраций аномальных примесей в окружающей среде с уровнем ниже 10^{13} см^{-3} . Решения, заложенные в данном приборе, позволили реализовать чувствительность измерения концентрации на уровне существенно ниже ПДК практически для любой вредной примеси в атмосфере.

Технические характеристики созданного прототипа авиационного СКР-лидара

Высота полета, м	100–1000
Спектральное разрешение ($\lambda/\Delta\lambda$)	10 000
Пространственное разрешение, м	0,3–3
Напряжение питания, В	27
Мощность электропитания кВт	0,7
Габаритные размеры, мм	1200×660×1120
Масса, кг	65

Бортовой лидар построен по модульному принципу и содержит следующие основные компоненты:

- твердотельный лазер с диодной накачкой и преобразователем гармоник,
- телеобъектив,
- полихроматор с отрезающим фильтром,
- детекторы,
- дальномер и блок контроля зондирующего пучка,
- ПК с специализированным программным обеспечением.

Моностатическая оптическая система экспериментального образца построена по схеме Кассегrena. Лазерный пучок совмещается системой поворотных зеркал с осью приемного телеобъектива и направляется в обследуемую область атмосферы. Рассеянное назад рамановское излучение попадает в ФПУ, состоящее из телеобъектива, полихроматора и детекторов. Входной телеобъектив построен на основе зеркальной оптики, что позволило иметь входной зрачок крупного размера (350 мм). Зондирование осуществляется на длине волны $\lambda = 261,7 \text{ нм}$ малогабаритным твердотельным лазером с диодной накачкой и частотным преобразованием гармоник.

Активной средой лазера является кристалл YLF:Nd. Накачка двух кристаллов осуществляется лазерными диодными линейками импульсной мощностью 100 Вт каждая, по 8 линеек на каждый активный элемент. Для модуляции добротности резонатора используется электрооптический затвор. Высоковольтный блок управления модулятора располагается в отдельном отсеке лазерной головки.

На длине волны $\lambda = 1047 \text{ нм}$ лазер генерирует импульсы с энергией 50 мДж, длительностью 6 нс и темпом следования 100 с^{-1} . Фундаментальная частота ($\lambda = 1047 \text{ нм}$) удваивается в нелинейном кристалле КТР с эффективностью преобразования 50%. Далее излучение с $\lambda = 523,5 \text{ нм}$ преобразуется по частоте в кристалле ВВО. Энергия излучения на $\lambda = 261,7 \text{ нм}$ номинально составляет 6 мДж, в форсированном режиме достигает 10 мДж. Реализованный в лазере режим TEM₀₀ способствует длительной, безотказной работе нелинейного кристалла ВВО.

Лазер не имеет жидкостного охлаждения. Термостабилизация диодных линеек и активного элемента осуществляется термоэлектрическими элементами Пельтье. Нелинейные кристаллы поддерживаются при температуре около 50 °C специальными нагревательными элементами. В качестве радиатора используется корпус лазера с ребрением (рис. 4). Принудительный обдув радиатора осуществляется тремя вентиляторами.



Рис. 4. Твердотельный лазер с диодной на-
качкой – источник зондирования.

Корпус лазера выполнен герметичным и заполнен сухим воздухом. Температурный диапазон работы лазера от минус 10° до плюс 35 °С, влажность до 100%. Блок управления излучателем располагается отдельно. Питание лазера осуществляется от бортовой сети постоянного тока напряжением 27 В ± 10%. Максимальная потребляемая мощность 350 Вт.

Технические характеристики лазера

Длина волны, нм	0,262
Энергия в импульсе, мДж	6
Длительность импульса (FWHM), нс	6
Темп следования импульсов, с ⁻¹	100
Расходимость, мрад	1,5
Габаритные размеры лазерной головки, мм	400×182×142

Поворотные зеркала, выводящие излучение в атмосферу, выполнены с диэлектрическими покрытиями, селективно отражающими лишь на $\lambda = 261,7$ нм. Зеркала Кассегрен-телеобъектива выполнены облегченными из ситалла СО 115М с УФ диэлектрическими покрытиями. Относительное отверстие объектива 1:3, световой диаметр 350 мм, мгновенное поле зрения 1,5 мрад.

Спектрометрический канал в данном лидаре представляет собой двойной полихроматор со сложением дисперсий и тремя детекторами для регистрации в атмосфере азота, метана и сероводорода. Двойной полихроматор работает в диапазоне 264–294 нм и содержит фильтр, отрезающий излучение с длиной волны короче 266 нм; две широкоапертурные стигматические голограммные решетки 2-го типа и три щели: входную, промежуточную и выходную. Отрезающий фильтр (фирмы Barr Associate Inc., США) служит для защиты приемного канала от рассеянного лазерного излучения. Каждая решетка выполнена с пространственной частотой $N = 3600 \text{ мм}^{-1}$, радиус $R = 500$ мм и для длин волн около 280 нм имеет разрешающую силу на уровне 450 000 и спектральный коэффициент отражения 60%.

Использование в приемном канале голограммных оптических элементов (рис. 5) позволило не только снизить шумовые характеристики в сравнении с нарезными решетками, обладающими заметным светорассеянием, но и работать с широкой апертурой, поскольку в отличие от нарезных они свободны от сферической aberrации и астигматизма [28].

Далее приведены соотношения, связывающие основные параметры дифракционных решеток.

Углы падения ψ и дифракции φ

$$\sin\psi + \sin\varphi = k\lambda N, \quad (1)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$ – порядок спектра, N – количество штрихов решетки на 1 мм;



Рис. 5. Широкоапертурная вогнутая голо-
граммная решетка.

угловая дисперсия

$$d\phi/d\lambda = k/(b \cos\phi), \quad (2)$$

линейная дисперсия

$$dl/d\lambda = fd\phi/d\lambda, \quad (3)$$

где f – фокусное расстояние;

пределальная разрешающая способность

$$\lambda/\Delta\lambda = Nb/\lambda = h/\lambda, \quad (4)$$

где b – период решетки, h – ширина заштрихованной части решетки. Таким образом, разрешающая сила пропорциональна количеству штрихов на всей площади дифракционной решетки.

Полихроматор работает в диапазоне спектра 264–294 нм и собран на основе двух вогнутых голограммных решеток с размером заштрихованной части 125 мм ($N = 3600 \text{ mm}^{-1}$), каждая из которых имеет разрешающую силу на уровне 450 000 для длин волн около 280 нм и спектральный коэффициент отражения 60%. Суммарная обратная линейная дисперсия вогнутой дифракционной решетки для двойного полихроматора получена равной $d\lambda/dl = 0,224 \text{ nm/mm}$. Такое ультраспектральное разрешение позволяет уверенно разделить линии метана (283,31 и 284,42 нм), азота (278,69 нм) и сероводорода (280,89 нм). В частности, при разнице длин волн 4,62 нм у молекул CH_4 и N_2 линейное расстояние в полихроматоре составляло 20,6 мм.

Параметры ФЭУ модели R6350 (фирма Hamamatsu, Япония), выбранного в качестве фотоприемников

тип фотокатода	сурьмяно-цезиевый
размеры фотокатода, мм	4×13
область спектральной чувствительности, нм	180–630
спектральная чувствительность фотокатода $s_{K,\lambda}$, А/Вт	$4,8 \times 10^{-2}$
максимум спектральной чувствительности, нм	340
анодный темновой ток $I_{T,A}$, А	$2,0 \times 10^{-11}$
коэффициент усиления M не менее	$4,0 \times 10^7$
темновой ток фотокатода $I_{T,K} = I_{T,A}/M$, А	$5,0 \times 10^{-19}$
пороговая чувствительность $F_{\text{пор}} = I_{T,K}/s_{K,\lambda}$ (с/ш = 1), Вт	$1,0 \times 10^{-17}$
квантовый выход η на $\lambda = 280$ нм	0,20.

Приемный канал в лидаре работает с пороговым уровнем сигналов на входном зрачке объектива в несколько десятков фотонов. Счет фотонов осуществлялся в режиме стробирования сигнала и синхронного накопления зарядов у

детекторов. В таком режиме критерием их качества становилось статистическое соотношение сигнал/шум, однозначно определяющее вероятность обнаружения СКР сигнала и точность его измерения.

Сигнал обратного рассеяния, принятый ФЭУ и прошедший через импульсный усилитель, стробируется по дальности около момента времени $2L/c$ с шириной строба $t_{\text{стр}}$. Импульс строба задается генератором, запускаемым от старто-вого (лазерного) импульса, и сдвигается цепью задержки до совмещения его с моментом прихода рассеянного сигнала $2L/c$. Таким образом, стробирование позволяло регистрировать только те фотоны, которые прошли внутри строба, и эффективно подавлять шумы вне временного отрезка $t_{\text{стр}} = 0,6\text{--}3,0 \text{ мкс}$ при $L = 100\text{--}500 \text{ м}$.

Минимизация времени получения искомой информации, как правило, требует представлять результат в цифровом виде. В лидаре фотоприемники в приемном канале действуют в субгибагерцовом диапазоне частот. Во время работы использовались системы сбора регистрируемых данных на основе высокоскоростной шины передачи данных PXI и платформы Compact DAQ от компании National Instruments, позволяющие проводить plug-and-play USB-подключения для проведения измерений непосредственно в полевых условиях.

Разработанный лидар был установлен на борту вертолета МИ-8, испытан в условиях реальной трассы газопровода и передан в 2006 году дочернему предприятию ОАО “Газпром”. В процессе проведения инспекции обследуемой трассы аппаратура позволила не только обнаруживать утечки метана, но и получать пространственное распределение его концентраций в зоне очаговых утечек (рис. 6). В тестовых измерениях на высоте полета от 100 до 450 м были установлены данные по чувствительности лидара к метану (6 ppm) и сероводороду (2 ppm).

В режиме накопления аппаратура вполне обеспечивает измерения концентраций веществ на уровне, близком к фоновым значениям. Достигнутый практически нулевой уровень фоновых помех в дальнейшем позволит осуществлять сбор информации на сильно наклонных приземных трассах при широкоформатном сканировании и зондировании.

При эксплуатации бортового лидара большое значение имеет синхронизация работы всех его компонентов. Привязка координат местности к результатам аэропоиска утечек газа производилась посредством спутниковой навигационной

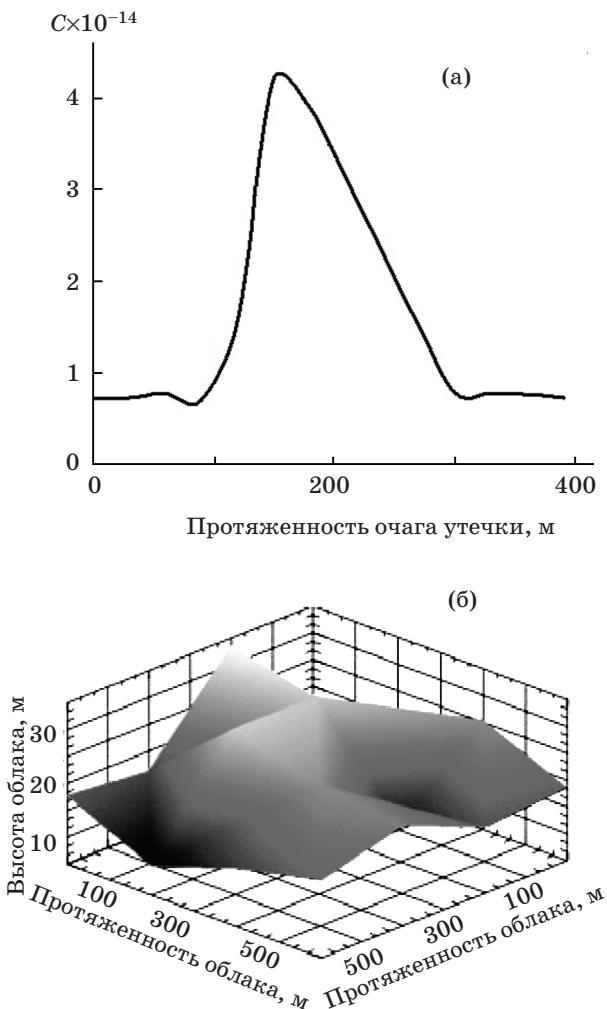


Рис. 6. Распределение концентрации метана C в зоне утечки при однократном (а) и много-кратном (б) облете.

системы GPS, синхронизированной по мировому времени с блоками регистрации, обработки и записи информации. Синхронизация всех компонентов лидара реализуется на основе импульса, подаваемого от специальной платы GPS-приемника на внутренние подсистемы лидара. При этом любой фиксируемый сигнал СКР снабжается временной меткой, а непрерывная запись и архивирование получаемой информации осуществляется на встроенном жестком диске.

Заключение

Коллективом Института лазерной физики развиты уникальная лазерно-оптическая элементная база, новейшая технология УФ высок

копрецизионной и дисперсионной оптики, созданы и внедрены на различных предприятиях серии малогабаритных твердотельных лазеров с диодной накачкой, используются новейшие достижения в области фотоприемных устройств, фонокелевых моделей, автоматизированных средств регистрации и обработки сигналов в гигагерцовом диапазоне частот. Накопленный научно-технический задел и практический опыт в разработках лазерных информационных комплексов явился основой для развития и реализации новой технологии создания многофункциональных авиационных лидаров.

Технические характеристики созданного ультраспектрального рамановского лидара отличаются универсальностью и широким диапазоном в регистрации и идентификации комплекса веществ, составляющих биосферу Земли, информативны по программному обеспечению и по фонокелевой обстановке, а также обладают рядом существенных достоинств по стоимости и сервисному обслуживанию. Модульная конструкция обеспечивает максимум надежности и ремонтопригодности в полевых условиях. Летные натурные испытания рамановского лидара показали, что в режиме накопления аппаратура вполне обеспечивает измерения концентраций веществ на уровне, близком к фоновым значениям.

В СКР-лидерах с многоэлементными приемниками заложены большие возможности для развития и совершенствования диагностической аппаратуры экологического назначения. Использование лидаров на основе ультраспектральных приборов для решения задач экологии, исследований опасных газов техногенного происхождения, появляющихся в атмосфере при уничтожении отходов, мусора, отравляющих и взрывоопасных веществ, поисков произрастания наркотических растений – это далеко не полный охват возможных применений подобной аппаратуры.

Авиационный лидар с ультраспектральным разрешением может найти широкое применение не только при оперативном контроле состояния приземной атмосферы, экологической безопасности среды, но и для проведения широкого круга исследований в интересах физики и химии атмосферы, геофизики и геологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вернадский В.И. Химическое строение биосфера Земли и ее окружения. М.: Наука, 1965. 374 с.

2. Клюев В.В., Ковалев А.В., Щербаков А.Г. и др. Экологическая диагностика / Под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2000. 496 с.
3. Межерис Р.Н. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
4. Ray M.D., Sedlacek A.J., Wu. M.Ultraviolet mini Raman lidar for stand – off, in situ identification of chemical surface contaminants // Rev. 5. Sci. Instrum. 2000. V. 71. № 9. P. 3485–3489.
5. Uchino O., Tokunaga M., Malda M. et. al. Differential absorption lidar measurement of tropospheric ozone with excimer – Raman hybrid laser // Opt. Lett. 1983. V. 8. № 7. P. 347–349.
6. Post M.J. Aerosol backscattering profiles at CO wave-length: the NOAA data base // Appl. Opt. 1984. V. 23. № 15. P. 2507–2509.
7. Сущинский М.М. Спектры комбинационного рассеяния молекул и кристаллов. М.: Наука, 1969. 516 с.
8. Burgio L. Theodoraki K., Clark R.J.H. Raman microscopy of Greek icons: identification of unusual pigments // Spectrochimica Acta. Part A. 2003. V. 59. P. 2371–2389.
9. Bicchieri M., Nardone M., Sodo A. Applications of raman spectroscopy to library heritage // Proc. of the conference “The Chemistry for the Cultural Heritage”. Urbino, ITALIE (04/10/2000) 2001. V. 91. № 11–12. P. 693–700.
10. Kato S. et al. A comparison of the aerosol optical thickness derived from ground-based and airborne measurements // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. № D11. P. 14701–14717.
11. Turner D.D., Feltz W.F., Ferrare R.A. Continuous water vapor profiles from operational ground-based active and passive remote sensors // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2000. V. 81. № 8. P. 1301–1317.
12. Аршинов Ю.Ф., Бобровников С.М., Сериков И.Б., Шелефонюк Д.И., Шумской В.К., Базылев П.В., Луговой В.А., Столяров Н.Н. Калибровка КР-лидара газоанализатора выбросов в атмосферу из труб предприятий с помощью удаленной газовой кюветы // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 3. С. 353–359.
13. McGee T.J. et al. An improved stratospheric ozone lidar // Opt. Eng. 1995. V. 34. № 9. P. 1421–1430.
14. McGee T.J. et al. AROTEL: an airborne ozone, aerosol and temperature lidar // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № 21. P. 7937–7944.
15. Scott S.G. et al. The meteorological measurement system on the NASA ER-2 aircraft // J. Atmos. Oceanic Technol. 1990. V. 7. № 4. P. 525–540.
16. Mayor S.D., Spuler S.M. Raman-shifted eye-safe aerosol lidar // Appl. Opt. 2004. V. 43. № 19. P. 3915–3924.
17. Жевлаков А.П., Лещенко Д.О., Пакконен С.А., Сидоренко В.М. Исследование методики использования эксимерного лазера для измерения толщины пленки нефтепродукта на поверхности воды // Океанология. 1993. Т. 33. № 3. С. 452–455.
18. Жевлаков А.П., Лещенко Д.О., Пакконен С.А., Сидоренко В.М. Дистанционное измерение толщины пленки нефтепродуктов на поверхности воды с использованием эксимерного лазера // Изв. РАН. Сер. Физическая. 1994. Т. 58. № 2. С. 175–179.
19. Жевлаков А.П., Смирнов В.А., Багров И.В., Тульский С.А., Высотина Н.В. Аномалии во флуоресценции нефтепродуктов при возбуждении лазерным излучением // Оptический журнал. 1999. Т. 66. № 5. С. 44–49.
20. Крушинский Л.Л., Шорыгин П.П. К теории интенсивностей линий в спектрах рассеяния // Опт. и спектр. 1961. Т. 11. В. 1. С. 24–34.
21. Шорыгин П.П. Комбинационное рассеяние света вблизи и вдали от резонанса // УФН. 1973. Т. 109. № 2. С. 293–332.
22. Семенков В.П., Мак А.А., Новиков Г.Е., Орлов О.А., Халеев М.М., Устюгов В.И., Чешев Е.А., Котляревский А.Н. Твердотельный лазер с накачкой лазерными диодами // Патент РФ № 21005339. 1998.
23. Holleman G., Voelckel H., Khaleev M.M., Mak A.A., Michalilov A.V., Novikov G.E., Orlov O.A., Ustyugov V.I. Arrangement for Combining and Shaping the Radiation of a Plurality of Laser Diode Lines // USA Patent № 5,877,898. 1999.
24. Мак А.А., Малинин Б.Г., Митъкин В.М., Панков В.Г., Серебряков В.А., Устюгов В.И. Модуль твердотельного пластинчатого лазера с диодной накачкой // Патент РФ № 2200361. 2003.
25. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Челибанов В.П. Приемники излучения. СПб.: Изд. “Папирус”, 2003. 527 с.
26. Abakumov A.S., Gavrilin E.A., Naumova N.N., Petrov S.B., Smirnov A.P., Kiselev M.B. The program complex for computation of spectroscopic characteristics of atomic and molecular gases in UV, visible and IR spectral ranges for a wide range of temperatures and pressures // J. of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2004. V. 84. P. 215–222.
27. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1973. 312 с.