

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
Высшего профессионального образования  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)

*На правах рукописи*

Кащеев Сергей Васильевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СПОНТАННОГО  
КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ В БОРТОВОМ ЛИДАРЕ С  
УЛЬТРАСПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Специальность: 05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы и  
комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2010

**Работа выполнена** в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)

**Научный руководитель:**

Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор

Бузников Анатолий Алексеевич

**Консультант:**

Кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник ВАК

Жевлаков Александр Павлович

**Официальные оппоненты:**

Храмов Валерий Юрьевич, доктор технических наук, профессор  
Филатов Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И.Менделеева (ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева»)

Защита состоится 27 декабря 2010 г. в 15.30 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.08 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

Автореферат разослан 24 ноября 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите  
докторских и кандидатских диссертаций,  
кандидат технических наук, доцент

Смирнов Евгений Андреевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Лидарная техника относится к одному из приоритетных и стратегических направлений оптико-электронного приборостроения. Это обусловлено тем, что сенсоры, основанные на дистанционном лазерном зондировании, позволяют проводить детальный анализ исследуемых объектов и компонентов окружающей среды по их спектральным характеристикам в условиях существенно ниже предельного уровня пространственного разрешения наблюдательных систем. Номенклатура задач, при решении которых используется лидарная техника и доставляемые с ее помощью информационные материалы, непрерывно расширяется.

Лазерное зондирование - наиболее современный метод дистанционного обследования Земли, позволяющий определять параметры составляющих атмосферы и гидросферы таких, как загрязнение окружающей среды выбросами химических предприятий, выбросы углеводородного сырья и топлив на предприятиях ТЭК и магистральных нефте-, продукто-, газопроводах, которые дистанционно в принципе не могут быть измерены другими методами. До последнего времени практически полностью отсутствовали разработки авиационных лидарных систем, обладающих экстремально высокой чувствительностью и избирательностью при синхронном поиске широкой гаммы химических веществ и соединений, направленные на экспресс-оценку содержания загрязняющих веществ в биосфере. Это было связано с отсутствием должных исследований методов и технологий, обеспечивающих соответствующие уровни спектрального разрешения, помехозащищенности, фоновых засветок, а также режимов регистрации и обработки приемных сигналов.

Данная работа посвящена исследованию метода и техники формирования ранее недостижимых уровней чувствительности, спектральной селекции приемных сигналов в авиационном лидаре путем значительного снижения уровня фоновых засветок, достижения ультраспектрального разрешения измерений и создания на этой основе аппаратно-программного комплекса для экспресс-оценки степени загрязнения биосферы техногенными выбросами, что позволит на ранних стадиях обнаруживать утечки загрязняющих веществ на предприятиях и снизить негативную нагрузку на экологию.

**Целью диссертационной работы** является исследование и использование метода спонтанного комбинационного рассеяния (Рамановского рассеяния) для создания аппаратуры, позволяющей дистанционно обнаруживать и количественно оценивать содержание загрязняющих компонентов в биосфере, используя один источник зондирующего излучения для обнаружения широкого спектра примесей.

**Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующих задач:**

- Исследование и анализ состояния существующих лидарных источников зондирующего излучения для дистанционного зондирования.

- Исследование влияния зондирующего излучения в УФ-области спектра на вещества – потенциальные загрязнители биосферы.
- Исследование индикаторных веществ для использования их в качестве реперов при дистанционном поиске.
- Исследование информативных спектров рассеяния веществ для оценки состояния среды.
- Разработка метода дистанционной экспресс-оценки загрязнения биосферы техногенными выбросами.
- Разработка аппаратно-программного комплекса для экспресс-оценки степени загрязнения биосферы техногенными выбросами.

**Методы исследования и аппаратура.** В работе использовался метод спектрального анализа состава газов. В качестве источника возбуждающего излучения использовался Nd:YLF твердотельный лазер с диодной накачкой, излучающий на трех длинах волн 1.047, 0.523, 0.262 мкм, разработанный специально для решения задач исследования. Монохроматор МДР-12 - для изучения спектров рассеяния исследуемых веществ и настройки функциональных узлов лидара. Экспериментальные данные обрабатывались статистическими методами. Для первоначальной калибровки смесей применялся атомно-абсорбционный метод определения содержания веществ. Методы регрессионного анализа применялись при установлении математических зависимостей изменений исследуемых параметров от изменений концентраций тяжелых металлов. В процессе исследований был создан мобильный полихроматор, обладающий значительно более высоким разрешением, нежели известные аналоги. Калибровки высокоразрешающего полихроматора проводилась с помощью образцовых газоразрядных ламп, спектр излучения которых предварительно был определен на монохроматоре Jobin Yvon HR 1000. Для предварительной фиксации сигналов с ФЭУ полихроматора использовался цифровой осциллограф Tektronix TDS5054, позволяющий сохранять осциллограммы в виде массива данных для дальнейшей их обработки на ПК с помощью статистических методов. Для упрощения фиксации сигналов, их обработки и визуализации использовался аппаратно-программный комплекс, созданный на основе компонентов National Instruments и программного пакета LabVIEW.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

- Создана база данных спектров спонтанного комбинационного рассеяния основных загрязняющих атмосферу веществ в УФ-диапазоне, положенная в основу разработки лидарной системы с ультраспектральным разрешением.
- Использование для дистанционного зондирования «солнечно-слепой» области спектра для повышения соотношения сигнал/шум при малой мощности зондирующего лазера
- Реализация ультраспектрального разрешения и увеличение отношения сигнал/шум более чем на порядок величины достигнуты на основе использованием ультрафиолетовых широкоапертурных голограммных решеток в сочетании с атомарно-гладкими зеркалами входного телеобъектива.

- Регистрация и обработка приемных сигналов в субгигагерцовом диапазоне частот обеспечивает повышение чувствительности дистанционных измерений концентраций малых газовых примесей в приземных слоях атмосферы до единиц ppm.

**Научная новизна.** Впервые создана база данных (комбинационного рассеяния) КР-сдвигов малых газовых компонентов в УФ-области спектра. Полученное в настоящей работе существенное (на два порядка) превышение спектрального разрешения по сравнению с аналогами, сочетание высокого разрешения с высокой чувствительностью измерения концентраций химических веществ и соединений позволяют повысить обнаружительную способность и селективность авиационных лидаров.

Впервые создан УФ-лидар с ультраспектральным разрешением, позволяющий дистанционно и бесконтактно оценивать химический состав атмосферы и составлять экологическую карту местности с высокой скоростью и точностью, ранее доступной лишь для контактных абсорбционных методов.

Разработан аппаратно-программный комплекс, реализующий на практике метод дистанционной количественной экспресс-оценки атмосферных загрязнений и позволяющий оперативно оценить их уровень с точностью до единиц ppm.

**Теоретическая и практическая значимость результатов работы состоит в том, что:**

- Составлена база данных загрязняющих веществ, содержащая спектры их комбинационного рассеяния, сечения рассеяния и минимально определяемые концентрации.
- Реализован малогабаритный ультрафиолетовый лазерный источник излучения с воздушным охлаждением, пригодный для использования в лидарных системах с ультраспектральным разрешением.
- Реализован малогабаритный полихроматор малой массы для использования в портативных системах дистанционного контроля биосферы, обеспечивающий разрешение  $\lambda/\Delta\lambda \gg 1000$ .
- Теоретически и экспериментально исследована возможность создания атомарногладких поверхностей зеркал сотовой структуры для повышения чувствительности прибора и создан приемный телескоп на основе зеркал с атомарно-гладкими поверхностями.
- Создан аппаратно-программный комплекс для регистрации, оцифровки, обработки, записи и визуализации сигналов в режиме реального времени.

#### **Реализация и внедрение результатов исследований:**

Теоретические положения, методики расчета и результаты исследований диссертации использованы в 3 НИР, выполненных в течение 2006-2009 гг.:

- «Исследование и разработка фундаментальных основ и новых методологий дистанционного зондирования природной среды в оптическом и радиодиапазонах электромагнитного спектра» ФИЕТ/КЭОП-35 2006-2009 г.

- «Разработка теоретических основ физики и технологии создания систем квантовой и оптической электроники» КЭОП-40 2009-2010 г.
- НИОКР «Разработка экспериментальной установки для аэропоиска утечек газа» - Институт лазерной физики ФГУП «НПК «ГОИ им. С.И.Вавилова». 2006-2008 г.

**Результаты диссертационной работы используются в организациях:**

- Открытое акционерное общество «ГАЗПРОМ».
- Закрытое акционерное общество «Лазеры и оптические системы».
- СПбГЭТУ «ЛЭТИ» - в дисциплинах «Оптико-электронные системы дистанционного зондирования», «Расчет и конструирование лазерных и оптико-электронных систем».
- Институт лазерной физики ФГУП «НПК «ГОИ им. С.И.Вавилова».

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и симпозиумах:

- Международная конференция «Laser Optics – 2006», 23-27.06.2006, г. Санкт-Петербург.
- XI Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика – 2008», 22-24.10. 2008, г. Санкт-Петербург.
- Международная конференция «Laser Optics – 2008», 23.06 – 27.06. 2008, г. Санкт-Петербург.
- Выставка «LASER - 2009», 15-16.06.2009, г. Мюнхен, Германия
- 62-е чтения им. академика Д.С. Рождественского ФГУП «НПК «ГОИ им. С.И.Вавилова» 15.12.2009, г. Санкт-Петербург.
- IV Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 26-29 .04.2010. г.Саров
- 60-ая, 61-ая, 62-ая научно-технические конференции профессорско-преподавательского состава университета СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
- XII Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика – 2010», 20-22.10.2008, г. Санкт-Петербург.

**Публикации.** Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 4 работах из них: 3 в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 9 докладов, получивших одобрение на 9 международных, всероссийских, и межвузовских научно-практических конференциях

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав с выводами, заключения и практических рекомендаций. Она изложена на 122 страницах машинописного текста, включает 24 рисунка, 8 таблиц, 5 приложений и содержит

список литературы из 82 наименований, среди которых 45 отечественных и 37 иностранных авторов.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** кратко обосновывается актуальность темы диссертационной работы, излагаются цель и задачи исследования и формулируются положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** носит обзорный характер. Кратко рассмотрены основные современные методы, применяемые при оценке экологического состояния биосферы по оптическим характеристикам и дан критический анализ этих методов. Отмечено, что основным недостатком абсолютного большинства методов является качественный характер оценки состояния биосферы, в то время как основной интерес представляет количественная оценка загрязнения, представляющая собой более сложную задачу. Рассмотрены физические аспекты дистанционного зондирования состояния биосферы и приведен сравнительный анализ основных приборов для спектральных измерений в полевых условиях.

В общем случае, условия распространения оптического излучения оказывают большое влияние на возможность использования лазеров в различных системах, поскольку при прохождении лазерного излучения через атмосферу происходит его поглощение, рассеивание, возникает рефракция, а также нарушаются пространственная и частично временная когерентность излучаемых лазером колебаний.

Ослабление оптического излучения в атмосфере подчиняется закону Бугера-Ламберта-Бэра:

$$P = P_0 e^{-\alpha L}, \quad (1)$$

Где  $P$  и  $P_0$  – мощности пришедшего и зондирующего атмосферу сигналов соответственно;  $\alpha$  – показатель ослабления;  $L$  – длина пути излучения. Коэффициент пропускания атмосферы  $e^{-\alpha L}$  зависит от объемного показателя ослабления атмосферы  $\alpha$ , характеризующего, во сколько раз уменьшается поток излучения на единичном пути в направлении распространения. Причем

$$\alpha = \sigma_{sa} + \sigma_{sm} + \sigma_a, \quad (2)$$

где каждое из слагаемых определяется, соответственно, аэрозольным рассеянием, молекулярным рассеянием и поглощением.

В общем случае любая модель лидара строится на основании уравнения оптической локации или лидарного уравнения, связывающего в себе пространственные изменения оптических параметров атмосферы на трассе зондирования и мощность рассеянного обратно излучения; уравнение в случае однократного рассеяния имеет следующий вид:

$$P_r(\lambda, R) = \frac{1}{2} G(R) P_0 c \tau_p \beta_\pi(\lambda, R) A_r T^2(\lambda, R) \xi_0(\lambda) R^{-2}, \quad (3)$$

где  $P_0$  – мощность импульса излучателя;  $\tau_p$  – длительность импульса;  $c$  – скорость света;  $\lambda$  – длина волны;  $R$  – текущая дальность;  $A_r$  – площадь входного зрачка;  $\beta_\pi = \sigma \cdot b$  – объемный коэффициент обратного рассеяния;  $\sigma$  – объемный коэффициент рассеяния;  $b = \beta_\pi / \sigma$  – лидарное отношение, или модуль вектора индикатрисы рассеяния для угла  $\pi$ ;  $\alpha$  – объемный показатель ослабления;  $\xi_0(\lambda)$  – пропускание приемной оптической системы;  $G(R)$  – геометрический фактор лидара, характеризуемый интегралом перекрытия зондирующего луча и поля зрения приемника ( $G(R) = 1$  при полном перекрытии).

$$T(\lambda, R) = \exp\left[-\int_0^R \alpha(\lambda, r) dr\right], \quad (4)$$

где  $T(\lambda, R)$  – коэффициент пропускания, или прозрачность атмосферы на длине волны  $\lambda$ .

В случае, если поле зрения приемной системы лидара соответствует поперечному сечению зондирующего луча на объекте наблюдения или перекрывает это сечение, то используемая в работе оценка мощности принимаемого лидарного эхосигнала согласно формуле 1 для однородной непоглощающей атмосферы может быть представлена в виде:

$$P_r(R, \lambda) = G(R) \cdot (P_0 / A_{\text{эо:а}}) \cdot (A_{\text{эо:а}} \cdot \tilde{n} \cdot \tau_\delta) \cdot \beta(R) \cdot (A_r / R^2) \cdot \xi_0(\lambda) \cdot \exp\left[-2 \int_0^R \alpha(r) dr\right] \quad (5)$$

где  $G(R)$  – перекрытие пучка излучения, полем зрения приемника,  $P_0 / A_{\text{луча}}$  – плотность мощности на объекте,  $A_{\text{эо:а}} \cdot \tilde{n} \cdot \tau_\delta$  – зондируемый объем,  $\beta_\pi(R)$  – коэффициент обратного рассеяния,  $A_{\text{эо:а}} \cdot \tilde{n} \cdot \tau_\delta \times \beta(R)$  – сечение обратного рассеяния,  $(A_r / R^2)$  – телесный угол приема,  $\xi_0(\lambda)$  – эффективность оптической системы,  $\exp\left[-2 \int_0^R \alpha(r) dr\right]$  – ослабление излучения атмосферой на двойном пути.

Среди активных дистанционных методов измерений содержания газообразных и конденсированных веществ в окружающей среде, в основном, используются метод дифференциального поглощения (ДП) и метод спонтанного комбинационного рассеяния (СКР), за рубежом называемый рамановским и флюоресценция. Однако, широкополосная природа молекулярной флюоресценции является причиной низкой величины отношения сигнала к шуму; при этом основной вклад в шум дает фоновое излучение.

Комбинационное рассеяние излучения газами, жидкостями и твердыми телами является прямым источником информации о химическом составе различных сред. При проведении спектрального анализа рассеянного на частицах излучения с волновым числом  $\nu_0 = 1/\lambda_0$  наблюдаются серии боковых (стоксовых) частот  $\nu_c$ , сдвинутые на величины, равные частотам колебательно – вращательных переходов облучаемых молекул  $\nu_{кв}$ .

$$\nu_c = \nu_0 \pm \nu_{кв} \quad (6)$$



В сравнении с ДП метод СКР обладает несколькими достоинствами:

- только рамановский метод позволяет при зондировании одним лазером одновременно регистрировать широкую гамму химических веществ без изменения состава и режима работы аппаратуры. Отсутствие переналаживания спектров СКР в широком диапазоне длин волн открывает возможности селекции антропогенных выбросов на фоне Земли при зондировании с борта летательных аппаратов;

- метод дифференциального поглощения (ДП) пригоден для регистрации лишь тех веществ, линии поглощения которых совпадают с длиной волны зондирующего лазера. При этом для идентификации каждого из веществ требуется набор лазеров или лазер с перестройкой в спектральном диапазоне 2,5 – 15 мкм, работающий одновременно на двух близкорасположенных длинах волн. Кроме того, широкие полосы поглощения атмосферными парами воды и углекислого газа не позволяют обнаруживать компоненты, имеющие собственные полосы поглощения в этих же спектральных интервалах;

- чрезвычайно высокая чувствительность к спектральным отличительным признакам различных покрытий и материалов, поэтому метод спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) особенно эффективен при обнаружении малоконтрастных объектов. Метод СКР можно применять как в ночных, так и дневных условиях из-за отсутствия солнечных помех при использовании ультрафиолетовой области спектра (короче 0,3 мкм).

Лидарный метод комбинационного рассеяния широко используется за рубежом. В главе 1 диссертации приведены в качестве аналогов примеры авиационных рамановских лидаров, выпускаемых в стране и за рубежом. Анализируя современное состояние авиационных лидаров можно отметить три достаточно четко выраженных направления их развития:

- новейшие технологии в лазерной (малогабаритные твердотельные лазеры (ТТЛ) с диодной накачкой, оборудованные преобразователями гармоник), оптической и оптико-электронной элементной базах (высококачественные зеркала с сотовой структурой, высокоскоростные приемники и блоки обработки сигналов), позволяющие селектировать и распознавать объекты окружающей среды с высоким спектральным и пространственным разрешением;
- лазерное зондирование на длинах волн, безопасных для органов зрения и эффективных с точки зрения высокой помехоустойчивости и минимизации фоновых засветок;
- техника регистрации, считывания и обработки сверхмалых приемных сигналов, обеспечивающая оптимальное отношение «сигнал/шум», экстремально высокую чувствительность (обнаружительную способность) и достоверность информации.

На основании проведенного обзора открытых источников информации сделано заключение, что до последнего времени разработки лидарных систем, обладающих экстремально высокими спектральным разрешением и селективной способностью, практически отсутствовали.

**Во второй главе** приводятся результаты экспериментального исследования спектров комбинационного рассеяния малых газовых компонент в УФ-области спектра, являющихся основными загрязнителями атмосферы.

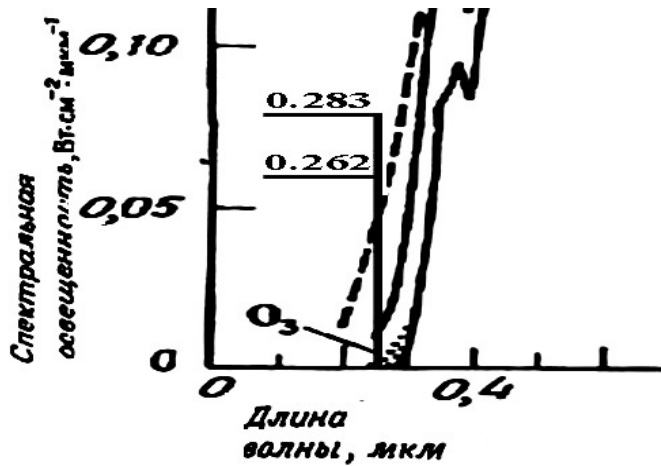
Экспериментально было установлено, что комбинационные спектры веществ, входящих в группу вероятных загрязнений атмосферы выбросами промышленных предприятий, находятся чрезвычайно близко друг от друга, в некоторых случаях разница между характеристическими полосами может составлять 1-2 нм. Работая в УФ-области спектра можно обнаружить такие вещества как  $\text{CH}_4$  (0,2833 0,2844 мкм)  $\text{N}_2$  (0,279 мкм)  $\text{H}_2\text{S}$  (0,281 мкм), обладающие близко расположенными характеристическими линиями, что говорит о необходимости применения высококлассного полихроматора с ультраспектральным разрешением в спектральном тракте проектируемого прибора.

Хотя молекулярные колебания имеют ширину спектральной линии не более  $1 \text{ см}^{-1}$ , спектры рамановского рассеяния различных молекул, могут располагаться близко друг к другу. Поэтому использование рамановского метода для селекции набора атмосферных примесей требует высокого спектрального разрешения, чтобы исключить перекрытие спектральных линий СКР при существенной разнице концентраций соответствующих молекул атмосферных газов. По селективной способности современные лидары, как и спектрометры, делятся на многоспектральные ( $\lambda/\Delta\lambda \geq 10$ ), гиперспектральные ( $\lambda/\Delta\lambda \geq 100$ ) и ультраспектральные ( $\lambda/\Delta\lambda \geq 1000$ ). Поэтому для практической реализации метода необходимо ориентироваться на создание СКР-лидара с ультраспектральным разрешением.

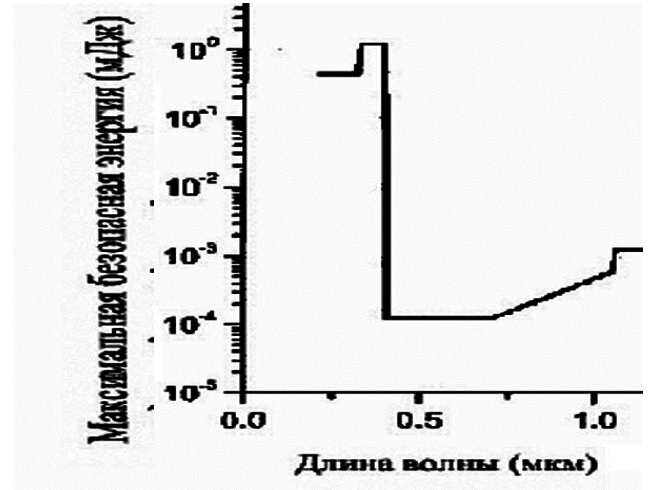
Улучшение инструментальной точности и массо-габаритных характеристик в оптико-электронных комплексах, связано с уменьшением длины волны излучения. В том числе и поэтому была выбрана УФ-область спектра для зондирования. Наиболее мощными источниками УФ когерентного излучения традиционно являлись электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов. Однако, современные Nd:YLF ТТЛ с преобразователями гармоник обеспечивают подходящую длину волны, достаточную частоту, энергию и длительность импульса (менее 10 нс) для обеспечения высокого пространственного разрешения при малых габаритах и энергопотреблении.

Применение УФ-средств подсветки и приема в лидаре позволили увеличить чувствительность и точность обнаружения химических веществ и физических объектов, т.к. при этом отсутствует фоновая солнечная засветка, благодаря экранирующему действию озонового слоя (рисунок 1,а).

Повышение чувствительности 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 безопасного воздействия на органы зрения людей, попавших в область его распространения. С этих позиций выбор УФ-области спектра для зондирования является существенно менее опасным, чем в диапазоне 0.4 – 1.0 мкм (рисунок 1, б).



а)



б)

Рисунок.1 а) Спектральная освещенность прямой солнечной в диапазоне 0-0,6 мкм б) Диаграмма безопасного для глаз уровня энергии лазерного излучения

В УФ области спектра метод СКР имеет наибольшие чувствительность и быстродействие. Для работы в приземном слое атмосферы наиболее приемлем диапазон  $\lambda = 0,25 \div 0,32$  мкм. В этом, «солнечно-слепом» диапазоне существенно повышается чувствительность лидара из-за предрезонансного усиления сигнала СКР, в частности, для основных загрязнителей атмосферы ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$  и ароматических углеводородов), полосы поглощения которых лежат в данной области спектра.

Для приборов, измеряющих слабые сигналы, необходима эффективная борьба с фоновыми засветками. Наиболее радикальным средством борьбы с рассеянным светом является применение двойных и даже тройных монохроматоров с оптикой высокого качества.

Сигналы от рассеянного назад атмосферными компонентами излучения относительно слабы во всем спектральном диапазоне чувствительности метода. Поэтому в качестве приемников излучения целесообразнее применять ФЭУ, т.к. они, по сравнению с ПЗС модулями обладают более высокой чувствительностью и быстродействием, что необходимо для регистрации наносекундных сигналов.

**Третья глава** посвящена исследованию характеристик функциональных компонентов авиационного СКР лидара.

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

- Малогабаритный твердотельный лазер (ТТЛ) с диодной накачкой и преобразователем гармоник
- Телеобъектив
- Полихроматор с отрезающим фильтром
- Детекторы
- Дальномер и блок контроля зондирующего пучка
- Промышленный ПК с специализированным программным обеспечением

Разработанный лидар представляет собой моностатическую систему. Оптико-механический тракт построен по схеме Кассегрена. Зондирование осуществляется на длине волны  $\lambda=0,262$  мкм малогабаритным ТТЛ с диодной накачкой и преобразователями гармоник. Лазерный пучок совмещен системой поворотных зеркал с осью приемного телеобъектива и направляется в обследуемую область атмосферы. Рассеянное назад рамановское излучение (эхо-сигнал) попадает в фотоприемное устройство, состоящее из телеобъектива, полихроматора и детекторов.

Энергия импульса основной гармоники Nd:YLF ТТЛ составляет 50 мДж, длительность 6 нс и частота 100 Гц. Далее фундаментальная частота последовательно удваивается кристаллах КТР и ВВО. Энергия излучения на  $\lambda=0,262$  мкм номинально составляет 6 мДж, в форсированном режиме - 10 мДж. Выходной пучок несет гауссово распределение интенсивности.

Лазер не имеет жидкостного охлаждения. Термостабилизация диодных линеек и активного элемента осуществляется термоэлектрическими элементами Пельтье.

Зеркала Кассегрен-объектива 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 лидаре состоит из двойного полихроматора со сложением дисперсий и трех детекторов для регистрации в атмосфере молекул  $N_2$  (в качестве репера),  $CH_4$  и  $SO_2$ . Полихроматор содержит фильтр, отрезающий излучение с длиной волны короче 0,266 мкм (фирмы Barr Associate Inc., USA), широкоапертурные стигматические голограммные решетки 2-го типа с пространственной частотой  $N=3600 \text{ мм}^{-1}$ , радиусом  $R=500$  мм.

Краткие технические характеристики лидара представлены в таблице 1.

Использование в приемном канале голограммных оптических элементов позволило снизить шумовые характеристики в сравнении с нарезными решетками, и работать с широкой апертурой, поскольку в отличие от нарезных голограммные свободны от сферической аберрации и астигматизма.

Предельная разрешающая способность дифракционной решетки определяется соотношением

$$\lambda/\Delta\lambda = N \cdot b/\lambda = h/\lambda, \quad (7)$$

здесь  $N$  – количество штрихов на 1 мм,  $b$  – период решетки,  $h$  – ширина заштрихованной части решетки.

Полихроматор работает в диапазоне 0,264÷0,294 мкм, в первом порядке дифракции и собран на основе двух вогнутых голограммных решеток с размером

заштрихованной части  $h=125$  мм ( $N=3600$  мм<sup>-1</sup>), 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 полихроматора получена равной  $d\lambda/dl = 0,224$  нм/мм. Такое ультраспектральное разрешение позволяет уверенно разделить линии CH<sub>4</sub> (0,2833; 0,2844 мкм), N<sub>2</sub> (0,2786 мкм) и SO<sub>2</sub> (0,2809 мкм).

ФЭУ Hamamatsu R6350, обладают чрезвычайно слабым темновым анодным током (0,02 нА), большим коэффициентом усиления (более  $4 \cdot 10^7$ ) и 20%- ным квантовым выходом на  $\lambda = 0,280$  мкм.

Приемный канал работает с пороговым уровнем эхо-сигналов на входном зрачке в несколько десятков фотонов. В таком режиме критерием качества приемного канала соотношение сигнал/шум, определяющее вероятность обнаружения СКР-сигнала и точность измерения его величины.

Сигнал обратного рассеяния, принятый ФЭУ стробируется по дальности около момента времени  $2L/c$  с шириной строба  $t_{cmp}$ . Импульс строба задается генератором, запускаемым от стартового (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  $t_{стр} = 0,6 \div 3,0$  мкс при  $L = 100 \div 500$  м соответственно.

Таблица.1 Основные характеристики лидара.

Высота полета, км	0,1-1	Спектральное разрешение ( $\lambda/\Delta\lambda$ )	>1 000
Спектральный диапазон, мкм	264 – 294	Количество одновременно регистрируемых спектров	3
Поле обзора	0,16°	Частота, Гц	100
Световой диаметр, мм	355	Габариты, мм	1200×660×1120
Относительное отверстие	1/3	Масса, кг	65

Современный экспресс-анализ требует представлять результат в цифровом виде. Для этого используется система сбора данных на основе высокоскоростной шины передачи данных *PXI* и платформы *Compact DAQ* от компании *National Instruments (NI)*, позволяющие проводить *plug-and-play* подключения для проведения измерений в полевых условиях.

Важным аспектом применения разработанного комплекса в режиме реального времени и проведения экспериментов является необходимость полной автоматизации исследований. Решение проблемы полной автоматизации описанного выше комплекса было одной из приоритетных задач автора Т.к. процесс СКР очень короткоживущий процесс, обладающий невысоким сечением рассеяния, то для корректного приема сигналов необходимо применение электронного оборудования, работающего в субгигагерцовом или более диапазоне частот. В разработанном приборе применена современная промышленная платформа *NI*, оснащенная высокопроизводительным процессором и модулями сбора и оцифровки информации. Для автоматизации всего комплекса и вычисления значений концентрации, мной разработано

специализированное программное обеспечение (ПО) на основе графического программного пакета LabView блок-схема работы которой представлена на рисунке 2, а.

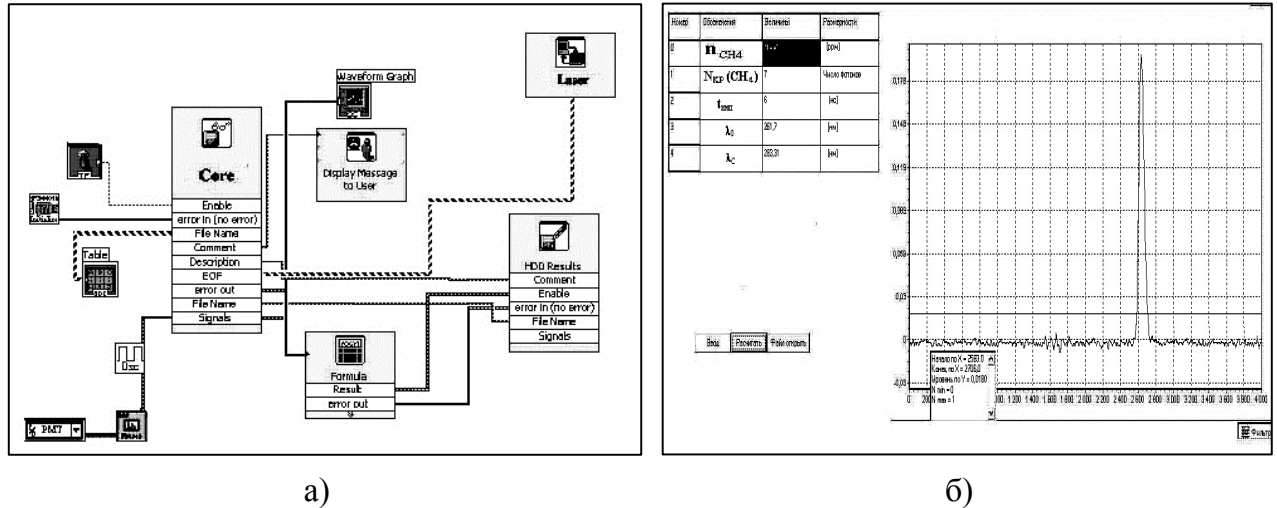


Рисунок 2 а) Блок-схема программно-аппаратного комплекса фиксации, обработки, записи и визуализации сигналов; б) Внешний вид типичного эхо-сигнала в окне программы расчета концентрации

Программно-аппаратный комплекс позволяет подключать модули системы фиксации лабораторных исследований LabView 7.0, библиотеки MathCad и конвертер сигналов для удаленного управления работой лазера через блок питания посредством шины RS-232. Предусмотрена возможность подключения к компьютеру GPS-навигатора для привязки данных сканирования к конкретным точкам на электронной загружаемой карте.

Обработка ведется в режиме реального времени, посредством отдельного программного приложения (рисунок 3, б).

Методика обработки информации, поступающей с фотоприемного устройства, основана на использовании лидарного уравнения (5). Основным расчетным параметром является концентрация искомого загрязнителя в атмосфере, определяемая по следующей формуле:

$$N = \frac{r^2}{2\Delta\sigma RVQ_x \exp(-2\tau_a)}, \quad (8)$$

где  $r$  – протяженность объекта;  $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$  – дифференциальное сечение поглощения газа ( $\text{см}^2$ ) для длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ;  $R$  – расстояние до объекта;  $V$  – системный параметр лидара, определяющийся по формуле:

$$V = P_s / P_t, \quad (9)$$

где  $P_s$  и  $P_t$  – мощность эхо-сигнала и пороговая мощность в отсутствие фоновых помех в условиях опорной атмосферы;  $Q_x$  – параметр, описывающий эффективность обратного рассеяния объекта по отношению к обратному рассеянию опорной молекулярной атмосферы на опорной длине волны:

$$Q_x(\lambda, \lambda_0) = \beta_\pi(\lambda) / \beta_\pi(\lambda_0) \quad (10)$$

$V$ -параметр является очень удобным для обоснованной количественной оценки потенциальных возможностей лидара.

Таким образом, зондирующий лазер с высокой энергией импульса излучения и фотодетектор с высокой обнаружительной способностью обеспечивает требования детектирования малых утечек газа на расстояниях в сотни метров.

Авиационный полихроматор с ультраспектральным разрешением  $\lambda/\Delta\lambda \gg 1000$ , позволил разделить близкостоящие спектральные полосы рассеянного излучения и обеспечил возможность идентификации целого спектра химических веществ, входящих в состав загрязнений.

**В четвертой главе** приведены методика подготовки и проведения натурных испытаний ультраспектрального лидара для аэропоиска утечек на магистральных газопроводах. Сформулирован разработанный метод дистанционной экспресс-оценки загрязнения биосферы техногенными примесями, позволяющий количественно оценить уровень загрязнения по рассеянному излучению.

Разработанный СКР лидар был установлен на борту вертолета МИ-8, испытан в условиях реальной трассы газопровода и после испытаний передан 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 т.ч. 3D – представление, в зоне очаговых утечек (рисунок 3). В тестовых измерениях на высотах от 100 до 450 м были установлены данные по чувствительности лидара к  $\text{CH}_4$  6 ppm и  $\text{SO}_2$  2 ppm. В режиме накопления аппаратура обеспечивает измерения концентраций веществ на уровне, близком к фоновым значениям.

Картирование местности с результатами аэропоиска утечек газа производилась спутниковой навигационной системой (GPS), синхронизированной по мировому времени с блоками регистрации, обработки и записи информации.

Полет на вертолете с установленным на нем СКР лидаром осуществлялся над магистральным газопроводом. Во время полета зондирующий лазер должен работать с частотой 15-100 Гц. При попадании облака углеводородного сырья в поле излучения лазера происходит поглощение света с последующим переизлучением последнего с Рамановским сдвигом частоты.

Эхо-сигнал попадает в приемный телескоп, затем в полихроматор, настроенный на заданные спектральные линии, и попадая на ФЭУ, преобразуется в электрический выходной сигнал лидара. Сигнал с ФЭУ подается на специальную плату преобразования с АЦП и обрабатывается специальным программным обеспечением.

Основным этапом испытаний был облет на вертолете МИ-8, с установленным на нем лидаром. площадки, принадлежащий подразделению «ГазпромАвиа». Для калибровки и окончательной настройки лидара была организована утечка метана на компрессорной станции с откалиброванным расходом и скоростью истечения. По этому факелу была проведена калибровка всех систем прибора. Далее был произведен облет участка трассы со специально организованными утечками, не подвергавшимся

какой-либо калибровке, с расходом от 0,1 до 15 м<sup>3</sup>/час (данные вычислены нами по полученным результатам). Составлены карты распределения метана в атмосфере (см. рис 3) Минимальная определенная концентрация CH<sub>4</sub> во время летных экспериментов составила 4 ppm, H<sub>2</sub>S – 2 ppm.

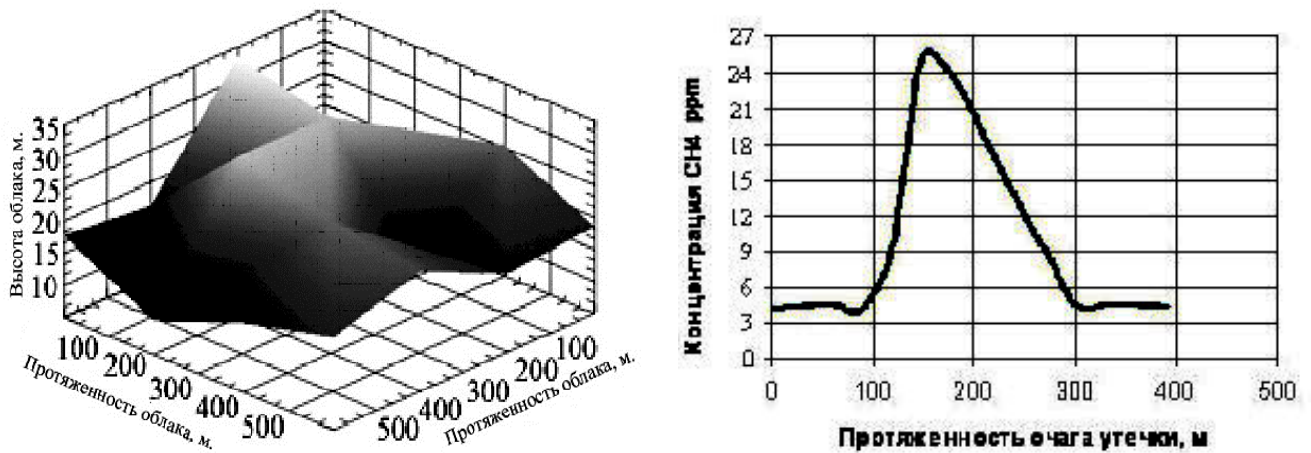


Рисунок 3 Распределение облака метана в пространстве и его концентрация в отдельно взятых точках

Результаты полетов показали надежную работу всех компонентов рамановского лидара и подтвердили, что технические требования, заложенные при его разработке успешно выполнены. По окончании летных испытаний подписан протокол испытаний, подтвердивший достоверность теоретических и экспериментальных исследований СКР-лидара с ультраспектральным разрешением и его реализации по всем техническим характеристикам.

### В заключении приведены основные результаты и выводы.

1. Создана база данных спектров спонтанного комбинационного рассеяния основных загрязняющих атмосферу веществ в УФ-диапазоне, положенная в основу разработки лидарной системы с ультраспектральным разрешением.
2. Проведены исследования компонентной базы СКР-лидара с использованием новейших достижений и технологий в области твердотельных лазеров с диодной накачкой, высокопрецизионной и дисперсионной ультрафиолетовой оптики, фотоприемных устройств, а также в области автоматизированных средств регистрации и обработки сигналов в гигагерцовом диапазоне частот. Практическое использование этих технологий позволило снизить фоновые засветки в СКР лидаре практически до нуля и реализовать экстремально высокую чувствительность дистанционных измерений.
3. Разработан и оптимизирован по техническим характеристикам УФ ТТЛ с диодной накачкой для дистанционного зондирования приземных слоев атмосферы. Установлено, что дистанционное зондирование лазерным пучком в области спектра, соответствующей экранированию озоновым слоем атмосферы, отличается высокой надежностью и эффективностью в процессах селекции и распознавании широкой гаммы атмосферных примесей.



4. Продемонстрированы достоинства практического использования метода СКР для лидарных исследований антропогенных выбросов в атмосферу с борта летательных аппаратов для регистрации пространственных распределений концентраций загрязняющих компонентов.
5. Развита методика и средства регистрации и обработки сигналов в гигагерцовом диапазоне частот в режиме счета фотонов. Такой режим позволяет оперативно проводить обнаружение и экспресс-анализ вредных газовых примесей в атмосфере с уровнем концентраций, близким к фоновым значениям.
6. Реализован авиационный лидар с ультраспектральным разрешением, превышающим на два порядка аналоги (ДЛС-Пергам), отличающийся универсальностью и широким диапазоном в регистрации и распознавании комплекса веществ, составляющих земную биосферу.

Полученные экспериментальные результаты по обнаружению малых концентраций утечек газа на реальном газопроводе позволяют сделать вывод о возможности многофункционального использования СКР лидара для экологического мониторинга окружающей среды, предупреждения аварийных ситуаций на магистральных газопроводах, станциях и предприятиях химической промышленности.

#### **Публикации по теме диссертации.**

##### В изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Alimov S. V.; Kascheev S. V.; Kosachev D. V.; Petrov S. B.; Zhevlakov A. P. Multifunctional lidar for needs of oil-and-gas pipes [Текст]/ S. V. Alimov; S. V. Kascheev; D. V. Kosachev; S. B. Petrov; A. P. Zhevlakov // Proceedings SPIE 2007г. Vol.6610. P.6610B-1 – 6610BB-5

2. Алимов С.В., Данилов О.Б., Жевлаков А.П., Кашеев С.В., Косачев Д.В., Мак Ан.А., Петров С.Б., Устюгов В.И. Авиационный рамановский лидар с ультраспектральным разрешением [Текст] / С.В. Алимов, О.Б. Данилов, А.П. Жевлаков, С.В. Кашеев, Д.В. Косачев, Ан.А. Мак, С.Б. Петров, В.И. Устюгов // Оптический журнал. -2009 г. Т. 76, вып. 4.- С.41-52

3. Гаврилов Е.В., Жевлаков А.П., Кашеев С.В., Куянпаа В., Савинайнен Т. Трансформация пространственных характеристик излучения эксимерного лазера [Текст] / Е.В. Гаврилов, А.П. Жевлаков, С.В. Кашеев, В. Куянпаа, Т. Савинайнен // Оптика и спектроскопия. -2011 г. Т.110, №1, С.149-153

##### Другие статьи и доклады:

4. Кашеев С.В., Бузников А.А. Жевлаков А.П. Ультраспектральная селективность в авиационном СКР-лидаре» [Текст]/ С.В. Кашеев, А.А. Бузников, А.П. Жевлаков // XI Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика – 2008», г. Санкт-Петербург. Материалы конференции С. 287-289

5. Kascheev S. V., Kosachev D. V., Mak An.A., Zhevlaikov A. P. Ultraspectral resolution in scanning Raman-lidar [Текст] / S.V. Kascheev, D. V. Kosachev, An.A. Mak, A. P. Zhevlaikov // Международная конференция «Laser Optics – 2008», г.Санкт-Петербург.

6. Жевлаков А.П., Кашеев С.В. Лидары с высоким спектральным разрешением [Текст] / А.П. Жевлаков, С.В. Кашеев //62-е чтения им. академика Д.С. Рождественского ФГУП «НПК «ГОИ им. С.И.Вавилова» г.Санкт-Петербург Сборник докладов

7. Кашеев С.В., Жевлаков А.П. Авиационный лидар с экстремально высокой чувствительностью и избирательностью для систем инструментальной разведки [Текст] / С.В. Кашеев, А.П. Жевлаков // IV Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г.Саров Сборник докладов С.42-44

8. Кашеев С.В., Бузников А.А., Жевлаков А.П. Информационные возможности авиационного лидара с ультраспектральным разрешением для дистанционной оценки состояния газопроводов и объектов природной среды [Текст] / С.В. Кашеев, А.А. Бузников, А.П. Жевлаков // XII Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика – 2010», г. Санкт-Петербург. Материалы конференции С.299-300