

Поляризационные голографические методы лидарного контроля за состоянием атмосферы

В.П. Титарь, О.В. Шпаченко
Харьковский национальный университет
61077, Украина, Харьков, пл. Свободы, 4

Содержание

1. Введение	111
2. Лидарный газоанализ атмосферы	111
3. Лидарный контроль за состоянием атмосферного аэрозоля	113
4. Принцип работы и техническое описание комплексного газоаэрозольного поляризационного голографического лидара	114
5. Заключение	116

Abstract

A brief survey is presented of the available techniques of remote environmental control over the air space condition. The paper demonstrates that the most acceptable method for operative gas composition monitoring in the near-earth atmospheric layers is one of spontaneous combination scattering (SCS), while the traditional aerosol component lidar analytic techniques are largely erroneous. A conclusion is made about the lidar holographic techniques. A scheme is proposed of a gas-aerosol polarization holographic lidar, in which the air gas composition is controlled, using the *SCS* method, while aerosols are studied by analyzing the aerosol particle registered polarization holograms in atmospheric cross-sections along the probing path.

1. Введение

В настоящее время одной из важнейших задач, стоящих перед человечеством, является поддержание чистоты окружающей среды на уровне, достаточно высоком для безболезненного существования на Земле различных видов живых существ и, в первую очередь, самого человека. В связи с этим особую актуальность приобретает создание современных средств экологического мониторинга, позволяющих вести постоянный контроль за состоянием воздушного и водного бассейнов нашей планеты. При этом, по понятным причинам, контроль за состоянием атмосферы предпочтительнее вести с помощью дистанционных методов, которые дают возможность производить оперативный анализ примесей, распределенных по достаточно большому объему атмосферного воздуха. Этим требованиям отвечают лидарные методы зондирования, основанные на различных физических эффектах взаимодействия лазерного излучения с атмосферой. В

то же время, интерпретация данных, полученных при лазерном зондировании аэрозолей, сопряжена с рядом принципиальных трудностей, разрешению которых будет способствовать внедрение в лидарные технологии поляризационных голографических методов. Кроме того, применение голографических методов обработки данных повысит наглядность и информативность лидарных средств контроля за состоянием атмосферы, что позволит с большей точностью выявлять источники загрязнений и более подробно исследовать динамику идущих в приземной атмосфере процессов.

2. Лидарный газоанализ атмосферы

Лидарные методы зондирования относятся к так называемым активным методам контроля загрязнения окружающей среды, поскольку они основаны на взаимодействии лазерного излучения с различными компонентами атмосферного воздуха. При

лазерном зондировании в основном используются следующие эффекты взаимодействия световой волны со средой: аэрозольное и молекулярное рассеяние, спонтанное комбинационное (рамановское) рассеяние, а также резонансное поглощение. Как правило, в создаваемых для контроля атмосферы установках используется какой-либо один из перечисленных выше эффектов, выбор которого зависит от поставленной задачи. Так, например, метод резонансного поглощения, основанный на поглощении световой энергии молекулами при совпадении частоты излучения лазера с частотой электронного или колебательно-вращательного перехода, позволяет определять с высокой точностью среднюю концентрацию исследуемого газа вдоль выбранной трассы. Однако несмотря на то, что существующие в настоящее время лазерные газоанализаторы дифференциального поглощения (в частности, "ТРАЛ-3" и "ТРАЛ-3М"[1]) позволяют определять некоторые газы при минимальной концентрации порядка нескольких молекул на миллион посторонних, данный метод не лишен недостатков. Прежде всего следует отметить необходимость точной настройки применяемых лазеров на какую-либо определенную частоту, причем лазеры должны обладать хорошей спектральной стабильностью. Во-вторых, для учета влияния на результаты измерений аэрозольного и молекулярного рассеяния и поглощения посторонними веществами, возникает необходимость использования второго лазера, работающего на частоте, немного отличающейся от частоты поглощения молекулами исследуемого газа. В-третьих, высокая чувствительность этого метода достигается прежде всего за счет работы в режиме временного накопления. Кроме того, если приемник располагается рядом с излучателем, то на другом конце трассы зондирования должен находиться какой-либо отражатель (зеркало, уголкового отражатель или топографический объект). В случае лидарного метода в качестве отражателя используется атмосферный аэрозоль, который рассматривается как распределенный в атмосфере рефлектор. Это позволяет получать профили концентраций загрязняющих газов с пространственным разрешением от 200 до 500 м, однако чувствительность метода при этом заметно снижается [2, 3]. Лидарный метод дифференциального поглощения эффективен для измерения концентраций компонентов, имеющих узкие пики поглощения в УФ и видимом диапазонах, на которые не накладываются элементы спектров других (мешающих) компонентов. В основном он применяется для контроля за состоянием озонного слоя на высотах до 30 км с минимальным пространственным разрешением до 500 м [4, 5]. Что касается исследования нижних слоев атмосферы, то спроектированный авторами [6] лидар дифференциального поглощения должен позволить проводить измерения концентраций z , NO ,

NO_2 и NO_3 за время около 10 мин на трассе длиной до 1 км с разрешением по дальности 50 м. Такое не очень высокое пространственное и временное разрешение и при этом — некоторый проигрыш в чувствительности делают лидарный метод дифференциального поглощения менее популярным, чем интегральный метод дифференциального поглощения (определение средних концентраций вдоль трассы), который применяется на приземных трассах в тех случаях, когда необходимо обнаружить очень малые концентрации исследуемого газа, но при этом нет необходимости определять локализацию источников загрязнения.

В отличие от метода дифференциального поглощения, метод спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) обладает несколько меньшей чувствительностью и дальностью (до 2 км), однако он позволяет получать практически мгновенное распределение загрязнителей вдоль трассы с высоким пространственным разрешением (порядка одного метра) [3,7]. К преимуществам метода СКР следует отнести и тот факт, что здесь отпадает необходимость зондирования на двух частотах и не требуется лазера с определенной или перестраиваемой частотой излучения. Определение химического состава атмосферы методом СКР основано на анализе спектра рассеянного назад излучения, в котором кроме линий, характеризующих падающий свет, наблюдаются добавочные линии — спутники. Различие в частотах возбуждающей первичной линии и линий каждого из спутников является характеристикой рассеивающего вещества и равно частотам собственных колебаний его молекул. Поэтому, в отличие от метода дифференциального поглощения, список определяемых методом СКР газов конструктивно ничем не ограничен.

Поскольку поперечные сечения комбинационного рассеяния пропорциональны четвертой степени частоты возбуждающего излучения [7], то для увеличения дальности зондирования в СКР-лидарах — предпочтительнее использование лазеров, генерирующих в ультрафиолетовой области спектра. Кроме того, использование длин волн менее 270,0 нм позволяет игнорировать фоновое излучение, связанное со светимостью неба, и проводить круглосуточные измерения газовых загрязнений.

Проведение измерений на частоте излучения лазера дает возможность получить с помощью СКР-лидара информацию об аэрозольном и молекулярном (рэлеевском) рассеянии в исследуемой области атмосферы. Рэлеевское рассеяние применяется для исследования турбулентности атмосферы, флуктуаций плотности в диффузионных пламенах и определения видов молекул в турбулентном потоке [8]. Контур линии рэлеевского рассеяния содержит также информацию о температуре (вследствие эффекта Доплера) [8-10]. Аэрозольное рассеяние может быть использовано для определения

размеров, концентраций и скоростей частиц. Таким образом, СКР-лидар позволяет получить больше разнообразной информации о состоянии атмосферного воздуха, чем устройства, основанные на методе дифференциального поглощения.

Важным преимуществом метода СКР является и то, что абсолютную концентрацию газовых компонент можно определить путем сравнения интенсивности спутников исследуемых загрязнителей с интенсивностью спутника, обусловленного одним из основных атмосферных газов — азотом или кислородом, концентрация которых в приземной области атмосферы является известной. При этом из уравнения лазерной локации для СКР исключаются сложные атмосферные и инструментальные параметры, и концентрация интересующего нас газа ($N(z)$) может быть вычислена по формуле [7]:

$$N_{СКР}(z) = M \frac{P_i(z, \lambda)}{P_{N_2}(z, \lambda_{N_2})} - \frac{\sigma_{N_2}^{СКР}}{\sigma_i^{СКР}} N_{N_2}(z), \quad (1)$$

где M — аппаратная константа, определяемая различиями в коэффициентах пропускания оптики и чувствительности фотоприемника для длин волн спутников λ_i и λ_{N_2} ; $P_i(z, \lambda_i)$ и $P_{N_2}(z, \lambda_{N_2})$ — число зарегистрированных фотоэлектронов при на молекулах исследуемого газа и молекулах атмосферного азота соответственно; $\sigma_i^{СКР}$; $\sigma_{N_2}^{СКР}$ — обратные поперечные сечения СКР исследуемого газа и азота; $N_{N_2}(z)$ — концентрация азота.

Перечисленные преимущества метода спонтанного комбинационного рассеяния делают его наиболее приемлемым для создания комплексного газо-аэрозольного лидара, предназначенного для экологического мониторинга приземного слоя атмосферы.

3. Лидарный контроль за состоянием атмосферного аэрозоля

В отличие от , при аэрозольном рассеянии не существует способа исключения "лишних" атмосферных параметров из уравнения лазерного зондирования, которое в случае моностатического лидара и однократного рассеяния фотона на аэрозольной частице имеет вид [11]:

$$P(z) = \eta P_0 \frac{c\tau_u}{2} \frac{S_0}{z^2} G(z) \sigma_a(z) T^2(z), \quad (2)$$

где P — мощность, принимаемая от всего освещенного объема; z — расстояние, с которого излучение принимается в момент времени t ; η — суммарный коэффициент пропускания приемной оптической системы; P_0 — пиковое значение временного распределения мощности излучения; c — скорость света; τ_u — длительность зондирующего импульса (обычно

$\tau_u \approx 10 - 20$ нс); S_0 — площадь приемной апертуры; $G(z)$ — геометрическая функция лидара, полностью определяемая параметрами приемопередающей оптической системы лидара; $\sigma_a(z)$ — коэффициент обратного рассеяния среды; $T(z) = \exp \left[- \int_0^z \alpha(z') dz' \right]$ — прозрачность участка среды $[0, z]$ на длине волны лазера; α — коэффициент ослабления.

Уравнение (2) недоопределено, поскольку содержит две неизвестные функции — $\sigma_a(z)$ и $T(z)$. Поэтому решение данного уравнения становится возможным лишь при введении некоторой априорной информации об исследуемом аэрозоле, а также при расширении измерительной информации.

Известно, что коэффициент обратного рассеяния зависит не только от показателя преломления аэрозольного вещества m и функции распределения аэрозольных частиц по размерам $f(a)$, но и от длины волны λ зондирующего излучения [11]:

$$\sigma_a(\lambda) = N_a \int_0^\infty \pi a^2 K_p(a, m, \lambda) f(a) da, \quad (3)$$

где N_a — число частиц в единице объема; $K_p(a, m, \lambda)$ — фактор эффективности рассеяния излучения на частице радиуса a .

Применяя зондирование на нескольких частотах и определяя характер зависимости σ_a от λ , можно в принципе определить и параметры микроструктуры аэрозоля m и $f(a)$ при условии, что аэрозоль состоит из изотропных диэлектрических сфер. Предположение о сферичности и изотропности является приемлемым для "влажных" частиц дымки, тумана, облачных и малых дождевых капель, однако не выполняется для пылевых структур, ядер конденсации и промышленного аэрозоля, к которым теория Ми, строго говоря, неприменима. Для несферических частиц интерпретация оптических измерений в атмосфере требует введения дополнительных допущений, основанных на информации о параметрах формы рассеивающих частиц [12, 13].

Наиболее полную информацию о том, насколько форма аэрозольных частиц отличается от сферической, можно получить из поляризационных измерений, поскольку поляризационные свойства рассеянных электромагнитных волн более существенно зависят от формы тел рассеяния, чем их энергетические характеристики. В [11] показано, что на основе анализа поляризационных характеристик эхосигнала возможно качественное распознавание аэрозолей различного типа без непосредственного решения обратных задач атмосферной оптики. Информативными характеристиками, позволяющими различать аэрозоли со сферическими и несферическими частицами, являются: начальное значение деполяризации на границе облака; средний градиент деполяризации на участке от границы облака до максимальной глубины измерения эхосигна-

ла; сдвиг во времени между максимумами поляризованного и деполаризованного компонентов эхосигнала. Проведенные эксперименты [11] показали, что совместный анализ перечисленных выше поляризационных параметров эхосигнала позволяет отличить индустриальный аэрозоль от естественного (фонового), в то время как энергетические параметры рассеянного назад излучения у этих аэрозолей не имеют различий при примерно равных концентрациях.

Следует отметить, что даже такое, сугубо качественное, выявление аэрозоля, содержащего несферические частицы, является важным и для решения вопроса о применимости к исследуемому аэрозолю теории многочастотного зондирования. К сожалению, многочастотное зондирование для несферических частиц индустриального аэрозоля оказывается малоэффективным. Определенного рода допущения, которые приходится применять в этом случае, дают весьма существенные погрешности при попытках определить таким образом счетную, а затем и массовую концентрацию исследуемого аэрозоля. В этой ситуации поляризационная лидарная голография является единственным методом, который позволяет получать как распределение частиц по размерам (независимо от их формы), так и их счетную концентрацию.

4. Принцип работы и техническое описание комплексного газоаэрозольного поляризационного голографического лидара

Предлагаемый лидарный комплекс, принципиальная блок-схема которого представлена на рис. 1, обеспечивает комплексное исследование как газовых, так и аэрозольных загрязнителей нижних слоев атмосферы путем сочетания метода спонтанного комбинационного рассеяния с поляризационным голографическим зондированием. Поскольку в СКР-методе зондирование предпочтительнее вести в УФ-диапазоне, а регистрацию и обработку голограмм — в видимой области спектра, излучение импульсного неодимового лазера 1 с длиной волны $\lambda_0 = 1060$ нм подается на удвоитель частоты 2. После прохождения удвоителя частоты 2 излучение с длиной волны $\lambda_1 = 530$ нм делится полупрозрачным зеркалом 3 на два пучка, один из которых вновь подается на удвоитель частоты 4. Импульсы, имеющие после удвоителя частоты 4 длину волны $\lambda_2 = 265$ нм, попадают через отражательный интерференционный фильтр 5 на коллиматор 7 и используются для газоанализа атмосферы методом . Излучение с длиной волны $\lambda_1 = 530$, отраженное

от полупрозрачного зеркала 3, отражается от поворотных зеркал 6 и 6', направляется в коллиматор 7 при помощи отражательного интерференционного фильтра 5 и используется для поляризационного голографического зондирования аэрозоля.

Свет, рассеянный назад исследуемым объемом атмосферного воздуха, попадает в приемный телескоп 8, проходит через диафрагму 9, согласующий объектив 10 и делится на два пучка отражательным интерференционным фильтром 11. Часть света с длиной волны $\lambda_1 = 530$, отраженная интерференционным фильтром 11, используется для формирования поляризационных голограмм, а прошедший через поляризационный фильтр 11 свет всех остальных длин волн с помощью собирающего объектива 12 подается на двойной монохроматор 13. Двойная монохроматизация позволяет избавиться от паразитного света, а изображение исследуемого участка спектра попадает на матрицу световодов 14, которая дает возможность "настраиваться" на выделение линий — спутников различных загрязняющих газов. С матрицы световодов 14 анализируемая часть спектра попадает на ПЗС-матрицу 15 и далее поступает в ЭВМ 16 для регистрации и обработки. Результаты обработки полученного спектра отображаются на дисплее 17 и могут быть распечатаны на принтере 18.

Использование световодов и охлаждаемой ПЗС-матрицы позволяет производить одновременное измерение интенсивности сразу многих спектральных компонент [14], что в сочетании с техникой стробирования дает возможность получать мгновенные значения концентрации различных газов вдоль трассы зондирования. Меняя направление зондирования, можно определить трехмерные профили распределения интересующих нас газов в исследуемом объеме атмосферы.

Переходя к описанию аэрозольного канала в рассматриваемом лидарном комплексе, заметим, что, в отличие от , голографические методы в силу ряда объективных причин еще не нашли достаточно широкого распространения в лидарных исследованиях. Дело в том, что традиционными методами можно регистрировать голограммы объектов, находящихся на расстояниях не более 5–10 м, что обусловлено ограниченной длиной когерентности импульсного лазерного излучения. Кроме того, существенной помехой при формировании голограмм в условиях реальной атмосферы является ее турбулентность. Поэтому для целей голографического лидарного зондирования в лаборатории радио- и оптической голографии Харьковского национального университета был разработан ряд методов, позволяющих преодолеть указанные трудности.

Методом, позволяющим получать голограммы на расстояниях, превышающих длину когерентности используемого лазера, является применение в качестве опорного пучка части рассеянного назад

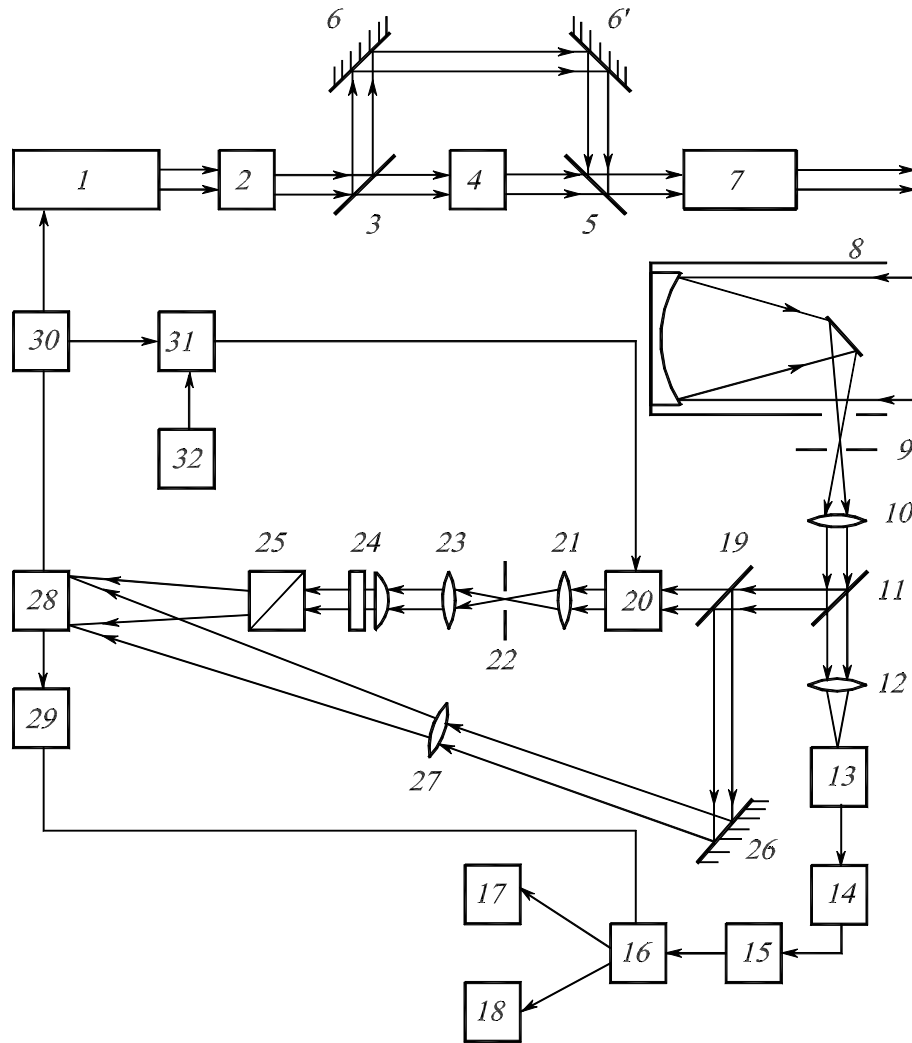


Рис. 1. Принципиальная блок-схема комплексного газоаэрозольного поляризационного голографического лидара.

излучения. Один из вариантов его технической реализации приведен в [15], где для зондирования используется кругопolarизованный свет, а принятое излучение раскладывается на два пучка с помощью двоякопреломляющей поляризационной призмы. Так как лучи, вышедшие из поляризационной призмы, поляризованы в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, один из них пропускают через полуволновое устройство, поворачивающее плоскость поляризации на $\pi/2$. После этого один из лучей используется в качестве объектного сигнала, а второй – после пространственной фильтрации для формирования опорных колебаний.

В лидаре, представленном на рис. 1, выделенное с помощью отражательного интерференционного фильтра 11 излучение с длиной волны $\lambda_1 = 530$ нм сразу же направляется в два канала – объектный и опорный – при помощи полупрозрачного зеркала 19. В опорном канале излучение усиливается оптическим квантовым усилителем (ОКУ) 20 и фокусируется объективом 21 в плоскость диафраг-

мы 22, с помощью которой производится необходимая пространственная фильтрация опорных колебаний [16].

Запуск оптического квантового усилителя 20 осуществляется блоком питания 31 при помощи импульсов, поступающих с выхода синхронизатора 30, которые задерживают относительно зондирующих импульсов на величину запаздывания сигналов, рассеянных на аэрозоле. В блоке управления 32 вырабатывается управляющее напряжение, с помощью которого регулируют коэффициент усиления ОКУ, поддерживая необходимое соотношение мощностей опорного и объектного сигналов в плоскости формирования голограммы.

Как было указано выше, поляризация рассеянного назад излучения является важным информативным параметром, знание которого обеспечивает правильность классификации аэрозольной компоненты атмосферных загрязнений. Поэтому предлагаемая схема голографической лидарной установки содержит элементы, позволяющие получать по-

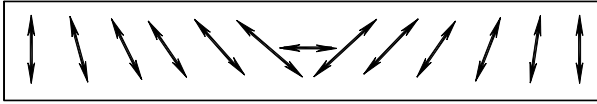


Рис. 2. Распределение состояния поляризации в опорном пучке.

поляризационные голограммы зондируемого объема воздуха. Для этой цели опорный пучок с помощью согласующего объектива 23 подается на скрещенные цилиндрические линзы 24, формирующие пучок с прямоугольным сечением, после чего направляется на поляризационную призму 25. Поляризационная призма представляет собой перегородженную по диагонали стеклянную кювету, одна часть которой заполнена гиротропной жидкостью, а вторая — глицерином. Поляризационная призма 25 создает на выходе опорный пучок, содержащий набор линейно поляризованных компонент с непрерывно меняющимся в плоскости формирования голограмм азимутотом [17,18] (см. рис. 2).

Объектный сигнал направляется полупрозрачным зеркалом 19 на отражатель 26, проходит через объектив 27 и поступает на вход блока формирования голограмм 28, где интерферирует с опорными колебаниями. Запуск блока формирования голограмм 28 осуществляется от синхронизатора 30. Поскольку поляризация опорных колебаний различна, то интерференция будет происходить только в тех областях плоскости формирования голограмм, где поляризации опорного и объектного сигналов совпадут.

Так как при отражении от жидкокапельного аэрозоля состояние поляризации не меняется, а при отражении от твердых частиц происходит деполяризация, то изображения качественно различных аэрозольных частиц формируются на пространственно разнесенных участках голограммы. Это дает возможность с помощью блока восстановления изображений 29 и ЭВМ 16 вести автоматический отдельный подсчет аэрозольных частиц, обладающих различными физическими свойствами. При этом техника стробирования позволяет формировать голограммы частиц, расположенных в различно удаленных срезах пространства на трассе зондирования.

Следует особо отметить, что лидарная голография является единственным методом, не требующим введения каких-либо априорных сведений об исследуемом аэрозоле, поскольку здесь определение счетной концентрации производится непосредственно по анализу изображений частиц в атмосферном воздухе. Кроме того, получаемые с помощью описанной лидарной установки поляризационные голограммы позволяют определять параметры Стокса отдельных аэрозольных частиц, что, в свою

очередь, дает возможность судить не только об их форме, но и о составляющих их веществах.

В ходе выполнения научных исследований в Харьковском национальном университете было создано несколько модификаций голографических лидаров, которые позволяют формировать голограммы аэрозолей по сигналам, отраженным от удаленных до нескольких километров аэрозольных частиц, и восстанавливать по голограммам их изображения. В результате измерений определялись усредненные по разрешаемому объему воздуха массовая концентрация аэрозолей с точностью 15–20 % и концентрации газовых компонент с чувствительностью до десятков определяемых молекул на миллион посторонних. Обнаруживаемые газы: N_2 , O_2 , CO , CO_2 , NO , N_2O , H_2O , SO_2 , CH_4 , H_2S , NH_3 , Cl_2 , C_2H_2 , H_2 и другие. Результаты измерений оперативно отображались на экране цветного монитора и при необходимости могли быть задокументированы.

Проведенные исследования позволили сделать заключение о применимости голографического поляризационного лидара для обнаружения и измерения характеристик массовых отражателей. Различия в отражательной способности выбросов предприятий в виде частиц в твердой и жидкой фазах были проанализированы с помощью формируемых поляризационных голограмм. На выходе лидарного комплекса отдельно наблюдались твердые частицы и капельки жидкости. Анализ изображений, восстановленных по голограммам, позволил определять состав и плотность частиц в исследуемом объеме [19–21].

Аппаратура мобильного лидарного комплекса может размещаться в закрытом кузове автомобиля с автономным источником электропитания, что обеспечит возможность перемещения комплекса и проведения измерений в любой точке в пределах достаточно большой территории.

5. Заключение

Разработанный в лаборатории радио- и оптической голографии комплексный газоаэрозольный поляризационный голографический лидар позволяет с высокой точностью и пространственным разрешением получать оперативную информацию о газовом и аэрозольном составе атмосферного воздуха на приземных трассах зондирования. Определение состава и концентрации газовых загрязнений производится методом СКР по результатам спектрального анализа рассеянных сигналов. Анализ аэрозольной компоненты атмосферного воздуха производится путем формирования поляризационных голограмм и отдельного наблюдения по ним твердых и жидких аэрозолей. Количественный анализ состава и концентрации частиц в разрешаемом объеме по их голографическим изображениям

обладает высоким уровнем чувствительности и не имеет аналогов среди иных используемых методов дистанционного мониторинга атмосферы. Использование поляризационных голографических методов лидарного контроля позволяет продвинуться на качественно иной уровень контроля за состоянием атмосферного воздуха.

Принято к публикации
15 августа 2000 года.

Список литературы

- [1] Долгий С.И., Зуев В.В., Смирнов С.В., Шубин С.Ф. ИК лазерные газоанализаторы дифференциального поглощения "ТРАЛ-3" и "ТРАЛ-3М" // Оптика атмосферы. - 1991. - Т. 4, N 5. - С. 515-521.
- [2] Grant W.B. Differential absorption and Raman lidar for water vapor profile measurements: a review // Optical engineering. - 1991. - V. 30, N 1. - P. 41-48.
- [3] Rafi A.S. Application of Raman scattering in remote sensing // Raman Spectroscopy: Sixty Years on. - Amsterdam, etc., - 1989. - P. 391-422.
- [4] Шурыгин И.Г., Белокриницкий Н.С., Лагутин В.М., Соболев В.Н. УФ-лидар для озонзондирования // Оптика атмосферы. - 1990. - Т. 3, N 10. - С. 1056-1059.
- [5] Ельников А.В., Зуев В.В., Маричев В.Н., Царегородцев С.И. Первые результаты лидарных наблюдений стратосферного озона над Западной Сибирью // Оптика атмосферы. - 1989. - Т. 2, N 9. - С. 995-996.
- [6] Капитанов Ал.В., Капитанов Ан.В., Смирнов Н.Д. О возможности применения лидаров при изучении азотного цикла в фотохимическом смоге // Оптика атмосферы. - 1991. - Т. 4, N 4. - С. 404-409.
- [7] Захаров В.М., Костко О.К., Торговичев В.А., Чайнова Э.А. Лазерные методы исследования загрязнений атмосферы. - Обнинск, Информац. центр. - 1976. - 34 с.
- [8] Клочкин В.П., Козлов Л.Ф., Потыкевич И.В., Соснин М.С. Лазерная анемометрия, дистанционная спектроскопия и интерферометрия: Справочник. - Киев: Наук. думка. - 1985. - 759 с.
- [9] Кравец Л.В. Метод лидарного измерения температуры атмосферы по спектру молекулярного рассеяния // Лазерно-оптические методы зондирования атмосферы и водных сред. - М.: Гидрометеиздат. - 1985. - С. 80-87.
- [10] Байков Ю.П., Кравец Л.В., Маринушкин В.Н. Лидар для измерения температуры атмосферы // VII Всесоюзный симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Тез. докл. Ч. II. - Томск. - 1984. - С. 368-371.
- [11] Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. - Новосибирск: Наука. - 1986. - 185 с.
- [12] Наац И.Э. Теория многочастотного лазерного зондирования атмосферы. - Новосибирск: Наука. - 1980. - 158 с.
- [13] Зуев В.Е., Наац И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. - Новосибирск: Наука. - 240 с.
- [14] Piccard R.D., Vo-Dinh Tuan. A multi-optical-fiber array with charge-coupled device image detection for parallel processing of light signals and spectra // Rev. Sci. Instrum. - 1991. - V. 62, N 3. - P. 584-594.
- [15] Оптический локаатор: Патент РФ N 944437 / Г.С. Сафронов, В.П. Титарь (1994 г.)
- [16] Оптический локаатор: Патент РФ N 743401 / Г.С. Сафронов, В.П. Титарь (1994 г.)
- [17] Голографическое устройство: Авторское свидетельство СССР N 1149206 / А.Б. Согоконь, В.П. Титарь (1983 г.)
- [18] Способ голографической идентификации материалов удаленных объектов: Авторское свидетельство СССР N 678969 / Г.С. Сафронов, А.Б. Согоконь, В.П. Титарь (1980 г.)
- [19] Bogdanova T.V., Titar V.P., Tomchuk E.Ya. Holograms // Optics and Spectroscopy. - 1998. - Vol.85, N 6. - P. 956-962.
- [20] Titar V.P. Effect of surface roughness on the polarization state of reflected radiation // Telecommunications and Radio Engineering. - 1998. - V. 52, N 9. - P. 58-63.
- [21] Titar V.P., Bogdanova T.V. Determination of optical characteristics of Reflecting surfaces from complex holograms // Telecommunications and engineering. - 1999. - V. 53, N 3. - P. 48-53.