

Мобильные многоволновые лидарные комплексы

А.С.Борейшо, М.А.Коняев, А.В.Морозов, А.В.Пикулик, А.В.Савин, А.В.Трилис, С.Я.Чакчир, Н.И.Бойко, Ю.Н.Власов, С.П.Никитаев, А.В.Рожнов

Разработана архитектура мобильных многоволновых лидарных комплексов (МЛК). Реализован ряд МЛК, базирующихся на автомобильных носителях. Совокупность данных комплексного лидарного зондирования, полученная с помощью МЛК, синхронизована в пространстве и времени, охватывает большую площадь (радиус действия МЛК 15 км) и основана на единой методической базе. Результаты зондирования включают информацию о концентрации и физической природе атмосферного аэрозоля, химическом составе газовой фазы атмосферы, ветре и турбулентности. Полученные данные служат основой для комплексного анализа экологической ситуации и прогнозирования ее развития.

Ключевые слова: гетеродинный лидар, дифференциальное зондирование, одночастотный лазер, лазерно-индуцированная флуоресценция.

1. Введение

Решение задач мониторинга окружающей атмосферы требует комплексных средств, которые наряду с широкой зоной охвата контролируемого пространства давали бы детальную информацию о различных метеорологических и экологических параметрах состояния атмосферы. Наиболее широкими возможностями для сбора данных о концентрации загрязняющих веществ в атмосфере, распределении скорости ветра и параметров турбулентности обладают технологии дистанционного лидарного зондирования [1]. Однако задачи комплексного анализа экологической обстановки выдвигают особые требования к составу и архитектуре лидарной системы, и для решения этих задач необходимо на единой методической платформе объединить целый ряд таких технологий.

Для анализа и прогноза экологической ситуации в целом необходимо, чтобы все полученные данные были согласованы в пространстве как по зонам покрытия, так и по пространственному разрешению, синхронизованы во времени, имели единый формат и опирались на единую методическую базу. Современные программные и аппаратные средства компьютерного моделирования делают возможными обоснованные и детальные прогнозы экологической ситуации, адекватность которых определяется лишь тем, насколько полными и непротиворечивыми являются исходные данные. Задачу сбора таких данных решают мобильные и бортовые лидарные измеритель-

ные системы наземного, воздушного и космического базирования [2–6]. Развитие вычислительной техники, программных и аппаратных средств управления большими объемами данных в настоящее время позволяет решать задачи оперативного экологического мониторинга на все более комплексном уровне.

2. Структура мобильных многоволновых лидарных комплексов

В 2003–2004 гг. на предприятии «Лазерные системы» были построены три мобильных лидарных комплекса (МЛК), фотографии которых представлены в работе [7] на рис.13. В настоящее время они работают в различных климатических зонах – в средней полосе России, в пустыне, во влажных субтропиках – и решают задачи дистанционного лазерного зондирования атмосферы в диапазоне длин волн от ближнего ультрафиолетового (266 нм) до дальнего инфракрасного (11 мкм). Рабочая дистанция, на которой МЛК осуществляют лидарное зондирование атмосферы, равна 15 км.

Структурная схема МЛК приведена на рис.1 (ее подробное описание см. в разд.10). Все основные каналы МЛК обеспечивают одинаковую дальность зондирования. В коротковолновом (видимом и ближнем ИК) диапазоне большие коэффициенты обратного рассеяния атмосферы позволяют получить лидарные сигналы на дальностях около 15 км с помощью традиционных методов прямого детектирования обратнорассеянного излучения. Что касается дальнего ИК диапазона (9–11 мкм), то зондирование атмосферы на таких дистанциях может обеспечить только гетеродинный лидар с большой приемной апертурой.

Использование гетеродинного лидара в режиме когерентного приема рассеянного излучения для измерения скорости ветра, так и коэффициентов поглощения атмосферной среды потребовало схемных решений, позволивших объединить возможности когерентного лидара и лидара дифференциального поглощения. Кроме того,

А.С.Борейшо, М.А.Коняев, А.В.Морозов, А.В.Пикулик, А.В.Савин, А.В.Трилис, С.Я.Чакчир. ООО «НПП "Лазерные системы"», Институт лазерной техники и технологии при Балтийском государственном техническом университете «Военмех» им. Д.Ф.Устинова, Россия, 198005 С.-Петербург, 1-я Красноармейская ул., 1; e-mail: office@lsystems.ru

Н.И.Бойко, Ю.Н.Власов, С.П.Никитаев, А.В.Рожнов. Управление начальника войск радиационной, химической и биологической защиты ВС РФ, Россия, 119160 Москва, Фрунзенская наб., 22/2

Поступила в редакцию 21 апреля 2005 г., после доработки – 4 июля 2005 г.

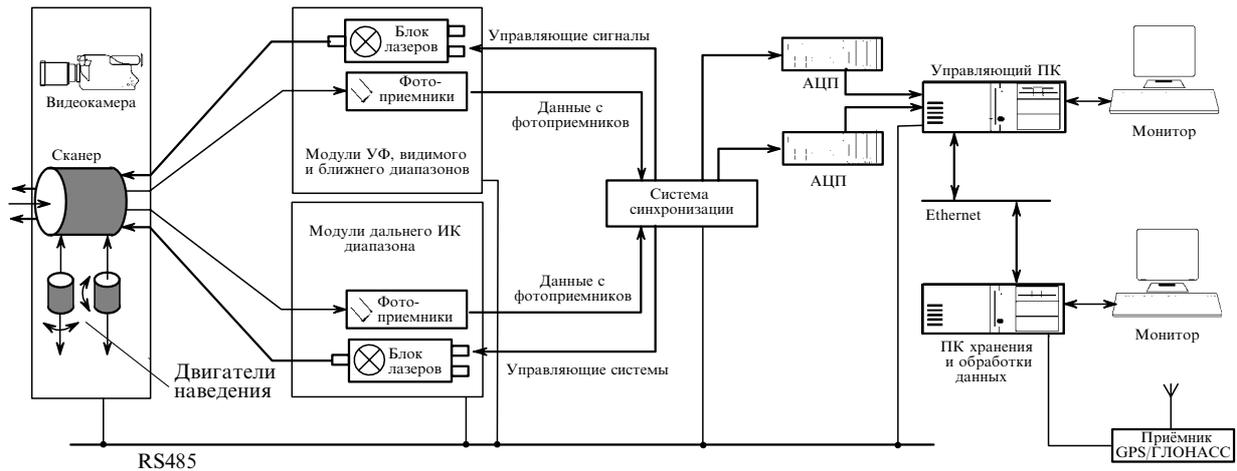


Рис.1. Структурная схема МЛК

потребовалось построить перестраиваемую двухканальную одночастотную импульсную лазерную CO_2 -систему, которая генерирует зондирующие импульсы на любой из 60 линий колебательно-вращательного спектра CO_2 и пригодна для использования на мобильном носителе.

Для оперативного и комплексного анализа экологической обстановки необходимо иметь синхронизированные данные об аэрозольной и газовой составляющих атмосферы. Это обусловлено тем, что характерные времена лидарного зондирования могут быть сопоставимы с временами изменения самой атмосферы. Следовательно, возникает необходимость в таких схемных решениях, которые позволяют одновременно и независимо работать твердотельным лазерам аэрозольного лидара и CO_2 -лазерам гетеродинного лидара дифференциального поглощения. Кроме того, рассеянное атмосферой и собранное приемным телескопом излучение необходимо одновременно проанализировать как в коротковолновом, так и в длинноволновом диапазоне. Для решения этой задачи был разработан единый приемопередаточный телескоп, обеспечивающий одновременную работу всех каналов МЛК в диапазоне длин волн 266 нм – 11 мкм.

Аэрозольный лидар МЛК также одновременно выявляет наличие атмосферного аэрозоля, определяет его концентрацию и анализирует физическую природу. Для этого объединены в единый функциональный узел аэрозольный Ми-лидар, поляризационный лидар и флуоресцентный лидар. Поэтому данные об агрегатном состоянии аэрозольных частиц и их форме, поставляемые поляри-

зационным лидаром, синхронизованы как с данными о химическом составе аэрозольных частиц, получаемыми флуоресцентным лидаром, так и с измерениями концентрации аэрозольных частиц.

Сканирование окружающего пространства осуществляется единым для всех каналов многоволновым однозеркальным или двухзеркальным сканером, обеспечивающим непрерывное совмещение полей зрения всех лидарных каналов независимо от текущего направления зондирования. Именно такое комплексное решение реализовано в оптической схеме МЛК. Организация внутреннего пространства МЛК показана на рис.2. Основные параметры МЛК приведены в табл.1.

Различия в конфигурации мобильных лидарных комплексов, обусловленные различиями решаемых задач, проиллюстрированы в табл.2. Так, например, МЛК-1 и МЛК-3 оснащены однозеркальными сканерами, позволяющими исследовать трассы с углами наклона к горизонту не более 20° . МЛК-2 снабжен двухзеркальным ска-

Табл.1. Основные параметры МЛК.

Минимальная дистанция детектирования	0,5 км
Максимальная дистанция детектирования*:	
для аэрозольного канала	до 15 км
для ИК канала	до 15 км
для УФ канала	до 5 км
Разрешающая способность	200 м
Детектируемые газовые примеси	
CO_2 ДПР- канал	углеводороды, фреоны, ортофосфаты и др.
Ti : сапфировый ДПР-канал	SO_2 , NO_2 , O_3 , Cl_2 , и др.
Nd : YAG-канал	аэрозоль
Углы обзора	
Вертикальное направление (угол места)	$-7 \dots +15^\circ$
Горизонтальное направление (азимут)	$\pm 180^\circ$
Минимальный шаг сканирования	40"
Максимальная угловая скорость вращения сканера	$8^\circ/\text{с}$
Диапазоны перестройки	
CO_2 TEA (гетеродин)	9 – 11 мкм
Nd : YAG (SHG, THG, FHG)	1064 нм (532, 355, 266 нм)
Ti : сапфир (SHG, THG)	700 – 960 нм (350 – 480, 230 – 310 нм)

*зависит от погодных условий и максимальной дальности видимости.

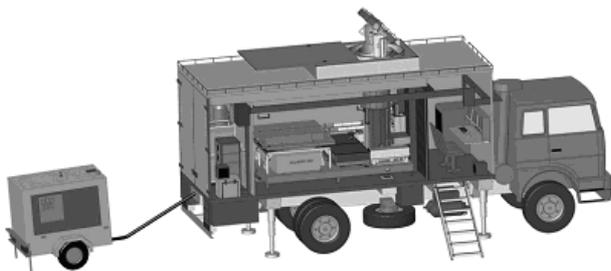


Рис.2. Организация внутреннего пространства МЛК (показан контейнер со снятой стенкой, в котором видны оптическая плита с лазерным, оптическим и электронным оборудованием МЛК, а также отсек с рабочим местом оператора.

Табл.2. Подсистемы мобильных лидарных комплексов.

Наименование подсистемы	МЛК-1	МЛК-2	МЛК-3
Тип сканера	однозеркальный	двухзеркальный	однозеркальный
Гетеродинный перестраиваемый CO ₂ -ДПП	+	+	+
Доплеровский ветровой CO ₂ -лидар	+	+	+
Коротковолновый аэрозольный лидар (четыре гармоники Nd: YAG)	+	+	+
Коротковолновый ДПП	+	+	
Флуоресцентный лидар			+
Поляризационный лидар (вторая и четвертая гармоники Nd: YAG)	+	+	
Турбулентный лидар		+	

нером, дающим возможность зондировать всю верхнюю полусферу.

3. Многоволновый приемопередающий телескоп

Телескоп в МЛК работает в широком спектральном диапазоне и сочетает в себе функции приема и передачи излучения. Он собран по схеме Мерсена и имеет асферическое главное зеркало с оптическим диаметром 500 мм и относительным отверстием 1:2 (рис.3). Коэффициент увеличения телескопа $M = 7$. Параболическое вторичное зеркало имеет привод, позволяющий фокусировать телескоп в диапазоне от 500 м до бесконечности.

В длинноволновом диапазоне телескоп используется как для передачи, так и для приема излучения. При этом площадь его апертуры разделяется на передающую и приемную зоны (рис.3,б), в отличие от [8, 9], где приемная и передающая схемы полностью разделены. Коротковолновые каналы, работающие по методу прямого детектирования, используют всю площадь апертуры телескопа для приема обратнорассеянного излучения, передача же зондирующего излучения осуществляется через независимые вводные зеркала. Телескоп расположен неподвижно на единой оптической плите (рис.3,а), как и все

лазерные излучатели, транспортная оптика и приемники. Плита, являющаяся общей базой для всех оптических элементов, имеет сотовую сварную конструкцию и обеспечивает высокую жесткость при сравнительно небольшой массе.

4. Сканирующая оптика

Сканирование пространства осуществляется единым однозеркальным или двухзеркальным сканером, который изменяет положение оптических осей всех приемных и передающих каналов одновременно. Такое решение, с одной стороны, позволило добиться стабильной взаимной юстировки всех каналов МЛК, не зависящей от углового положения линии зондирования, а с другой стороны, потребовало разработки универсального покрытия для оптики телескопа и сканера, работающего в широком диапазоне длин волн. Это многослойное металлодиэлектрическое покрытие, нанесенное на подложку из ситалла СО115М, обеспечивает коэффициент отражения не менее 0.95 в диапазоне 355 нм – 11 мкм и не менее 0.87 для $\lambda = 266$ нм.

Однозеркальный сканер в походном положении убирается внутрь контейнера МЛК с помощью специального привода и герметично закрывается крышкой. Диапазон сканирования по углу места составляет от -7° до $+20^\circ$, по азимуту он равен $\pm 180^\circ$. Кинематическая схема двухзеркального сканера позволяет зондировать всю верхнюю полусферу. Привод, обеспечивающий поворот зеркал сканера, построен на основе моментных двигателей постоянного тока по безредукторной схеме. Точность и повторяемость углового положения линии зондирования определяются классом применяемых датчиков угла и составляют $40''$. Видеонаблюдение осуществляется синхронно с лидарным зондированием, в видимом диапазоне – цифровой видеокамерой с переменным фокусным расстоянием, в дальнем ИК диапазоне – тепловизором на основе болометрической фокальной матрицы.

Все крупногабаритные зеркала телескопа и сканера изготовлены из ситалла по облегченной технологии и закреплены с разгрузкой, обеспечивающей сохранение оптического качества поверхности во всех режимах работы и при всех ориентациях зеркал.

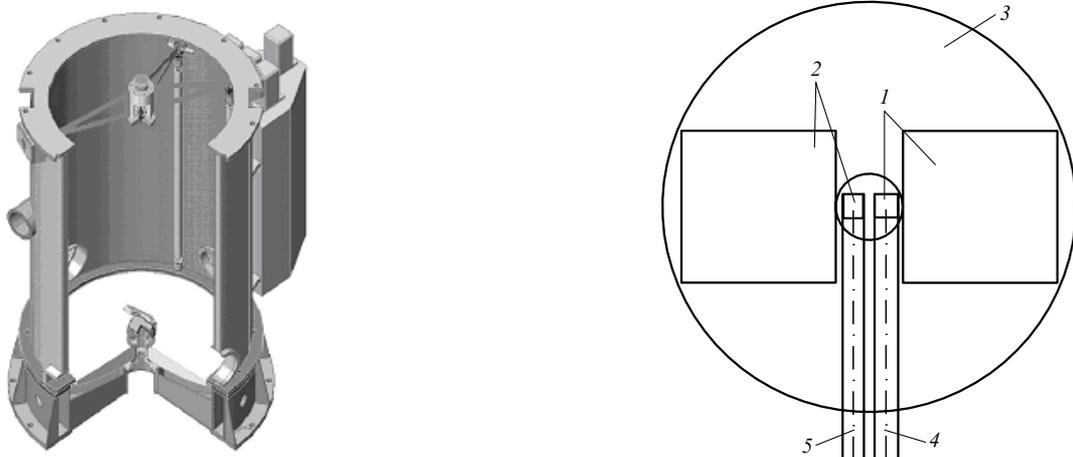


Рис.3. Приемопередающий телескоп в разрезе (а) и схема расположения приемного и передающего длинноволновых каналов на зеркалах телескопа (б): 1 – область, занятая выводом излучения; 2 – область, занятая приемом излучения; 3 – главное зеркало; 4 – выходящий зондирующий пучок; 5 – принимаемое излучение.

5. Оптическая схема МЛК

Оптические схемы составных частей МЛК приведены на рис.4–7. МЛК включает в себя следующие подсистемы.

1. Аэрозольный лидар видимого и ближнего ИК диапазона, построенный на основе Nd:YAG-лазера. Лазер работает на любой из четырех гармоник (266–1064 нм) с частотой следования импульсов 10–25 Гц. Энергия импульса на основной гармонике составляет 600 мДж. В качестве приемников излучения используются ФЭУ (266–532 нм) и лавинный фотодиод (1064 нм).

2. Коротковолновый лидар дифференциального поглощения и рассеяния (КВ ДПР). Используется, в основном, для измерения концентраций окислов азота, серы и любых других газов, спектры поглощения которых имеют контрастные особенности в диапазонах длин волн 700–960 нм, 350–480 нм и 230–310 нм.

3. Длинноволновый гетеродинный CO₂-лидар дифференциального поглощения и рассеяния (ДВ ДПР). Ис-

пользуется для измерения концентраций высокомолекулярных веществ.

4. Ветровой когерентный доплеровский лидар, построенный на той же элементной базе, что и ДВ ДПР, отличается лишь методикой обработки лидарного сигнала. Измерение доплеровского сдвига частоты рассеянного излучения позволяет определять скорость ветра в диапазоне до 20 м/с.

5. Турбулентный лидар, работающий на длине волны 532 нм и позволяющий измерять высотный профиль структурной постоянной атмосферной турбулентности. Принцип его работы основан на измерении размеров фокального пятна. В качестве зондирующего излучения используются импульсы второй гармоники Nd:YAG-лазера (532 нм). Приемопередающий телескоп фокусируется на определенной дистанции. Излучение, рассеянное из области перетяжки, создает изображение в фокусе формирующей системы турбулентного лидара. Параметры этого изображения содержат информацию о совокупном влиянии атмосферной турбулентности на участке

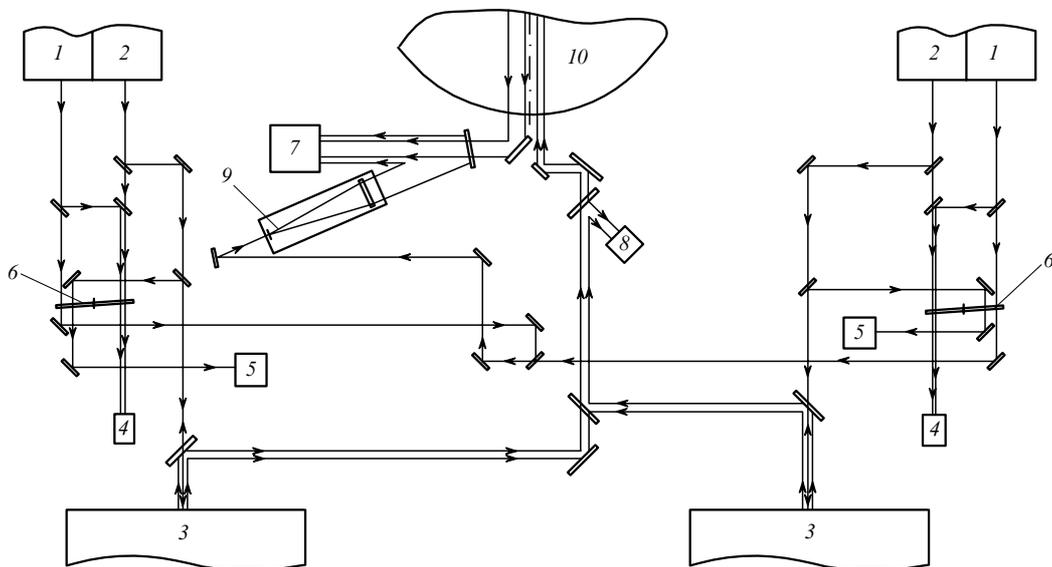


Рис.4. Схема длинноволнового гетеродинного канала:

1 – лазер-гетеродин; 2 – лазер-инжектор; 3 – ТЕА лазер; 4 – широкополосный охлаждаемый приемник системы «20 МГц»; 5 – пироприемник системы АПЧ резонатора ТЕА лазера; 6 – обтюратор; 7 – 25-элементная приемная охлаждаемая КРТ-матрица; 8 – приемник системы синхронизации; 9 – телескопический расширитель пучка гетеродина; 10 – приемопередающий телескоп.

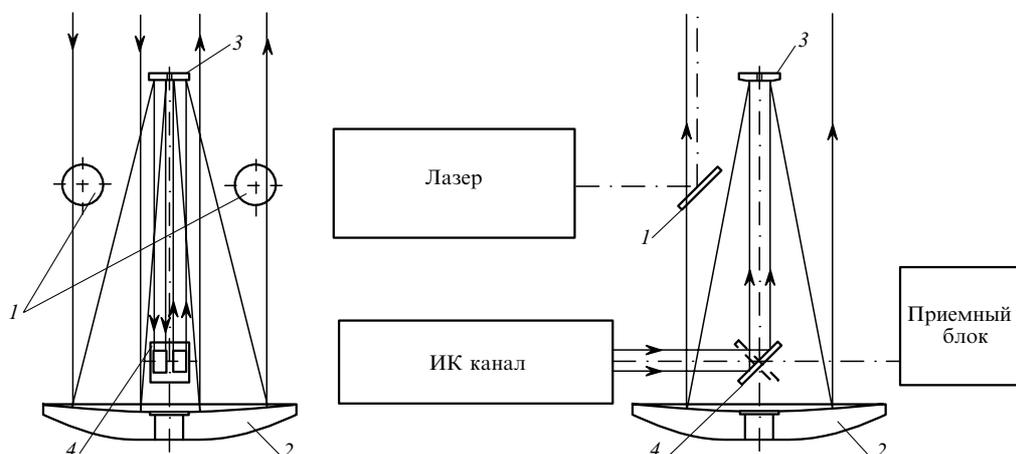


Рис.5. Схема приемопередающего телескопа:

1 – выводящее зеркало КВ канала; 2 – главное зеркало телескопа; 3 – вторичное зеркало; 4 – разделительное выводящее зеркало.

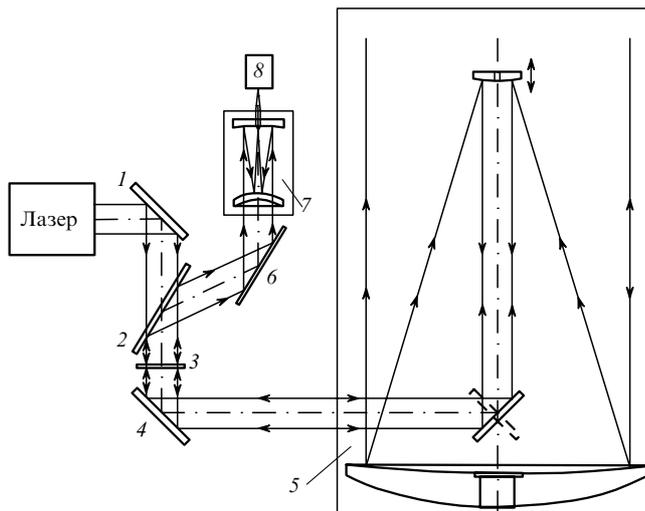


Рис.6. Схема измерения турбулентности:

1, 4, 6 – зеркала; 2 – пластина Брюстера с диэлектрическим покрытием; 3 – четвертьволновая пластина; 5 – приемопередающий телескоп; 7 – объектив Максутова – Кассегрена; 8 – узел измерения размера фокального пятна.

трассы от приемопередающего телескопа до точки фокусировки. После серии измерений, проведенных на нескольких горизонтальных и наклонных трассах, вертикальный профиль структурной постоянной атмосферной турбулентности C_n^2 восстанавливается путем математической обработки данных.

В режиме измерения турбулентности (рис.6) излучение второй гармоники Nd:YAG-лазера направляется в приемопередающий узел. Отражаясь от зеркала 1 им-

пульс лазера проходит через пластину Брюстера 2 и четвертьволновую пластину 3 и зеркалом 4 направляется в приемопередающий телескоп 5, обладающий возможностью перефокусировки. Обратнорассеянное излучение из атмосферы, повторно проходя через четвертьволновую пластину, изменяет свою поляризацию на ортогональную относительно исходной, тем самым получая возможность отражения от пластины Брюстера. Зеркалом 6 рассеянный сигнал направляется в объектив Максутова – Кассегрена 7, который фокусирует его в узел измерения диаметра фокального пятна 8.

6. Флуоресцентный лидар, предназначенный для определения природы атмосферного аэрозоля по спектру флуоресценции. Возбуждение осуществляется импульсами лазерного излучения на длине волны 266 нм. Спектр флуоресценции измеряется однорешеточным монохроматором на основе 32-элементного ФЭУ в диапазоне 300 – 500 нм.

7. Поляризационный лидар. Используется для определения физических характеристик аэрозольных частиц (форма, агрегатное состояние). В качестве зондирующего излучения используется 2-я гармоника Nd:YAG-лазера (532 нм). Обратнорассеянное излучение из атмосферы разделяется зеркалом 1 (рис.7) с диэлектрическим покрытием, которое видимый диапазон отражает, а ближний ИК пропускает. В общих фокальных плоскостях линз 2 и 4 видимой и ИК ветвей находятся полевые диафрагмы 3. Сменные оптические фильтры и разделительное зеркало 5 расположены на вращающейся турели и предназначены соответственно для сужения спектрального диапазона и подключения флуоресцентного анализа. В этом случае зеркало вводится в пучок, и часть излучения направляется в спектральный прибор для исследования спектра флуоресценции. В отсутствие зеркала 6 комплекс работает в режиме аэрозольного или КВ ДПР-лидара. Рассеянное излучение фокусируется линзой 7 на ФЭУ 9б. Зеркало 6 вводится в пучок при работе в режиме поляризационного лидара, при этом часть излучения направляется на призму Глана – Тейлора, которая расщепляет рассеянное излучение на ортогональные по поляризации составляющие и направляет их на ФЭУ 9а и 9с. Излучение ближнего ИК диапазона (1064 нм) фокусируется на лавинный фотодиод.

Параметры лазерных излучателей, использованных в МЛК, приведены в табл.3. Важная отличительная особенность оптической схемы гетеродинного длинноволнового лидара состоит в том, что двухканальная лазерная система, реализующая метод дифференциального поглощения, работает с матричным КРТ (кадмий – ртуть – теллур)-детектором. Это обеспечивает идентичность характеристик для обоих каналов. Синхронизация работы каналов осуществляется с помощью обтюраторов, защищающих приемники от прямого попадания мощных импульсов ТЕА-лазеров и коммутирующих излучение двух локальных осцилляторов.

6. Одночастотная двухканальная лазерная система гетеродинного CO₂-лидара

Гетеродинный CO₂-лидар состоит из двух синхронизированных по времени каналов с единой осью визирования, настраивающихся на разные длины волн. Частота следования импульсов в каждом канале составляет 10 Гц, временной интервал между каналами – 10 мс.

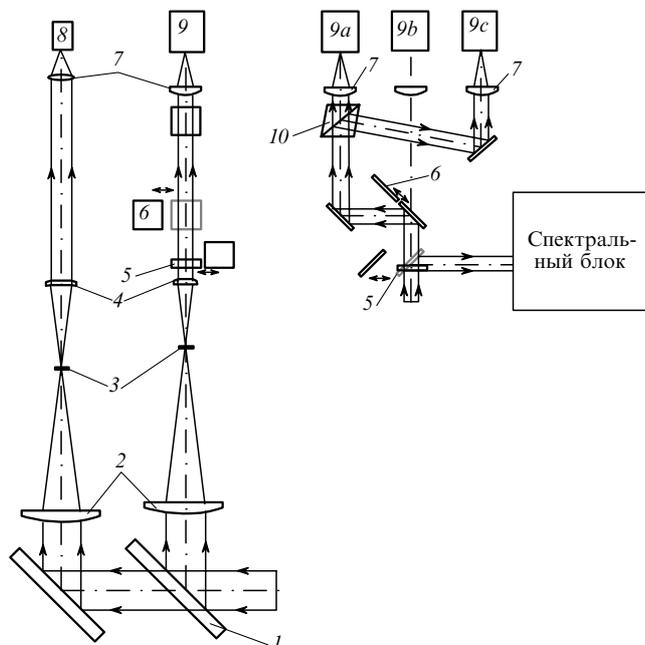


Рис.7. Схема приемного блока коротковолнового канала:

1 – зеркало с диэлектрическим покрытием; 2, 4 – оптика объектива; 3 – диафрагмы; 5 – сменные оптические фильтры и отводное зеркало на вращающейся турели; 6 – подвижное зеркало; 7 – фокусирующие линзы; 8 – лавинный фотодиод; 9 – ФЭУ; 10 – призма Глана – Тейлора.

Табл.3. Параметры лазерных излучателей.

Неодимовый лазер (YAG: Nd ³⁺)		
Энергия импульса (мДж) на длинах волн		
1064 нм		≥ 600
532 нм		≥ 400
355 нм		≥ 70
266 нм		≥ 90
Длительность импульса (нс)		10–80
Частота следования импульсов (Гц)		10–25
Титан-сапфировый лазер		
Энергия импульса (мДж) в диапазонах длин волн		
700 – 900 нм		≥ 70
350 – 450 нм		≥ 20
230 – 300 нм		≥ 10
Длительность импульса (нс)		30–40
Частота следования импульсов (Гц)		10
Двухканальная одночастотная лазерная CO ₂ -система на основе импульсных ТЕА лазеров		
Энергия импульса (мДж)		
на линии 10P(20)		≥ 500
на линиях с индексами 10–30		300–400
на краях ветвей		100–300
Диапазон длин волн (количество линий CO ₂ в колебательно-вращательном спектре)		60
Длительность импульса (мкс)		1–2
Частота следования импульсов (Гц)		10

Каждый канал включает в себя перестраиваемый одномодовый ТЕА лазер и два одночастотных перестраиваемых волноводных лазера – инжектор, предназначенный для задания частоты излучения ТЕА-лазера, и ге-

теродин, задающий опорное одночастотное излучение на приемной матрице. Лазеры настраиваются на одну линию колебательно-вращательного спектра. Система автоматической подстройки частоты (АПЧ) путем изменения длины резонатора с помощью пьезокерамических приводов настраивает и поддерживает согласованные частоты излучения лазеров. Лазер-инжектор настраивается на продольную моду с максимальной мощностью, продольная мода резонатора ТЕА лазера подстраивается под частоту инжектора, частота излучения гетеродина отстраивается на 20 МГц от частоты инжектора. Без инжекции в ТЕА лазерах реализуется генерация на нескольких продольных модах с характерными интерференционными биениями (рис.8,а). В режиме инжекции ТЕА-лазеры генерируют одночастотные импульсы, спектральная ширина каждого из которых определяется длительностью импульса генерации и составляет 1 МГц (рис.8,б). Вейвлетный анализ [10] лидарного эхо-сигнала с гетеродинным приемом от топографической мишени (рис.9,б) показывает, что основной вклад в спектральную ширину отраженного излучения вносит уширение, связанное с ограниченной длительностью лазерного импульса. Подобная гетеродинная двухканальная перестраиваемая лидарная система впервые реализована на мобильном носителе.

7. Когерентный CO₂-лидар

Этот лидар, являющийся одной из важнейших составных частей МЛК, построен на основе одночастотных импульсных ТЕА CO₂-лазеров, непрерывных одночастотных CO₂-лазеров и широкополосного матричного КРТ-приемника. Лазерные излучатели обеспечивают пе-

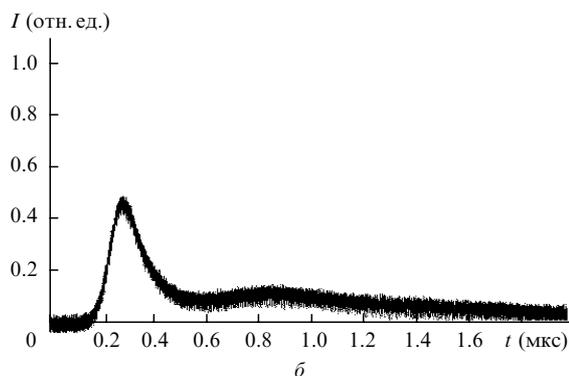
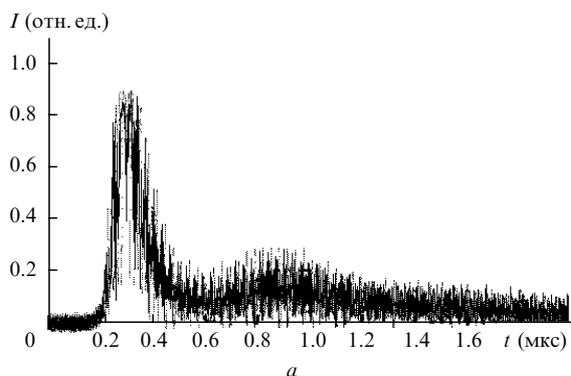


Рис.8. Форма импульсов излучения ТЕА лазера (линия 9R(18)) в режимах свободной генерации (а) и инжекции (б).

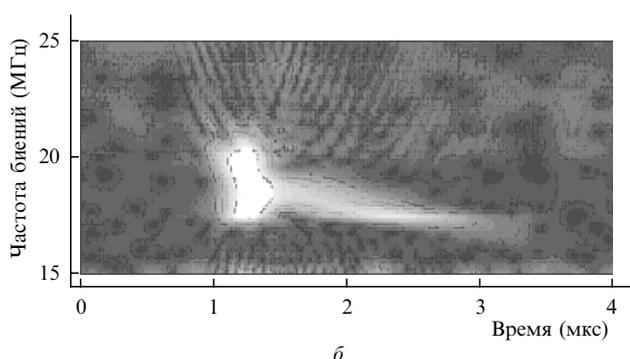
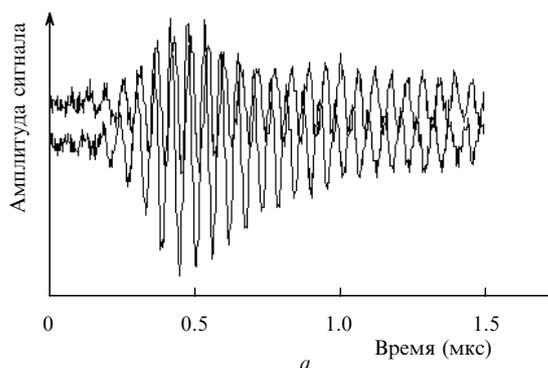


Рис.9. Сигнал гетеродинного длинноволнового лидара, отраженный от топографической мишени на дистанции около 3 км; а – временная развертка сигналов от двух различных элементов матричного приемника (общая протяженность 2 мкс); б – вейвлетный спектр (общая протяженность 4 мкс, частота биений в диапазоне 15–25 МГц).

рестройку на любую из 60 линий колебательно-вращательного спектра CO₂ в диапазоне 9–11 мкм. Непрерывные CO₂-лазеры – лазер-инжектор 2 и лазер-гетеродин 1 (см. рис.4) – выполнены в едином корпусе. Часть излучения инжектора, отраженная от делителя, полностью отражающим зеркалом направляется в резонатор ТЕА лазера 3. Отраженное резонатором излучение инжектора с помощью делителя и зеркала направляется на приемник 5 для обеспечения работы системы АПЧ. Оставшаяся часть излучения инжектора смешивается на делителе с излучением гетеродина и попадает на широкополосный охлаждаемый приемник 4, который используется для обеспечения стабилизации промежуточной частоты гетеродина. Пучок гетеродина, расширенный телескопом Галлилея 9, смешивается на светоделительной пластине с излучением, рассеянным в атмосфере, и направляется на матричный КРТ-приемник 7. Часть энергии импульса ТЕА лазера, попадающая на приемник 8, используется для запуска системы синхронизации и АЦП. Обтюратор 6 предназначен для синхронизации всей системы и защиты приемников 4, 5 от импульса ТЕА лазера.

Зондирующий импульс, отражаясь от разделительного зеркала 4 (см. рис.5), попадает на зеркала приемопередающего телескопа 3, 2 и направляется в атмосферу. Обратнорассеянное излучение собирается этим же телескопом и направляется обратно в ИК канал, где смешивается с излучением гетеродина на матричном приемнике.

Результаты зондирования атмосферы гетеродинным длинноволновым каналом приведены на рис.10,а. Там же показана кривая текущего значения среднеквадратичного отклонения (СКО) высокочастотного шума. Величина лидарного сигнала приближается к уровню шума на дистанции 15–17 км.

Отношение сигнал/шум. Гетеродинная регистрация рассеянного излучения, полученного с помощью крупногабаритного приемного телескопа, позволяет существенно увеличить отношение сигнал/шум (SNR) и рабочую дистанцию лидарной системы [11]. Оценить требуемую энергию импульса и достижимую дистанцию зондирования можно с помощью соотношения [12]

$$SNR = \frac{1}{2} \frac{E\beta(\pi)\lambda A \exp(-2\alpha R)}{hBR^2 \{1 + (1 - R/F_d)^2 [\pi D_c^2 / (4\lambda R)]^2 + (D/2r_c)^2\}}, \quad (1)$$

где $D_c = 0.61D$ – эквивалентный диаметр апертуры телескопа; D – размер приемной апертуры; F_d – дистанция фокусировки; A – площадь приемной апертуры; B – ширина полосы пропускания приемной системы; E – энергия импульса; $\beta(\pi)$ – объемный коэффициент обратного рассеяния; r_c – радиус когерентности; α – показатель экстинкции; R – дистанция детектирования.

Для оценки отношения сигнал/шум достаточно учесть, что осцилляции сигнала, имеющие временные масштабы меньше длительности зондирующего импульса τ , заведомо являются шумом. При наличии лидарного сигнала, полученного при зондировании одиночным импульсом, мгновенное среднеквадратичное значение шума может быть представлено в следующем виде:

$$N(t) = \left\{ \int_{-\infty}^t \left[S(\eta) - \int_{-\infty}^{\eta} S(\xi) \exp[-(\eta - \xi)/\tau] d\xi \right]^2 \times \exp[-(t - \eta)/\tau] d\eta \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

где $S(t)$ – исходный лидарный сигнал. Фильтрация лидарного сигнала на масштабах порядка τ осуществляется с помощью интегрального оператора с экспоненциальным ядром – таким способом выделяется часть сигнала, не связанная с шумом. После этого экспериментальная оценка SNR вычисляется следующим образом:

$$SNR = \int_{-\infty}^t S(\xi) \exp[-(t - \xi)/\tau] d\xi / N(t), \quad (3)$$

На рис.10,а приведены исходный лидарный сигнал, полученный на гетеродинном приемном канале от одиночного зондирующего импульса (кривая 1, частота выборки 50 МГц), сигнал, отфильтрованный с масштабом $\tau \approx 2$ мкс (кривая 2), и оценка СКО шума, полученная по формуле (2) – кривая 3. Экспериментальные результаты (3) и оценка по формуле (1) представлены на рис.10,б. При этом ширина полосы пропускания B приемной системы принимается равной 16 МГц. На дистанциях около 15 км обе оценки SNR приближаются к единице. Оценки показывают, что на предельных дальностях SNR уменьшается в 10 раз при $\Delta R \approx 5$ км, поэтому накопление данных в течение 10 с позволяет увеличить дальность на 5 км при частоте следования импульсов $f = 10$ Гц.

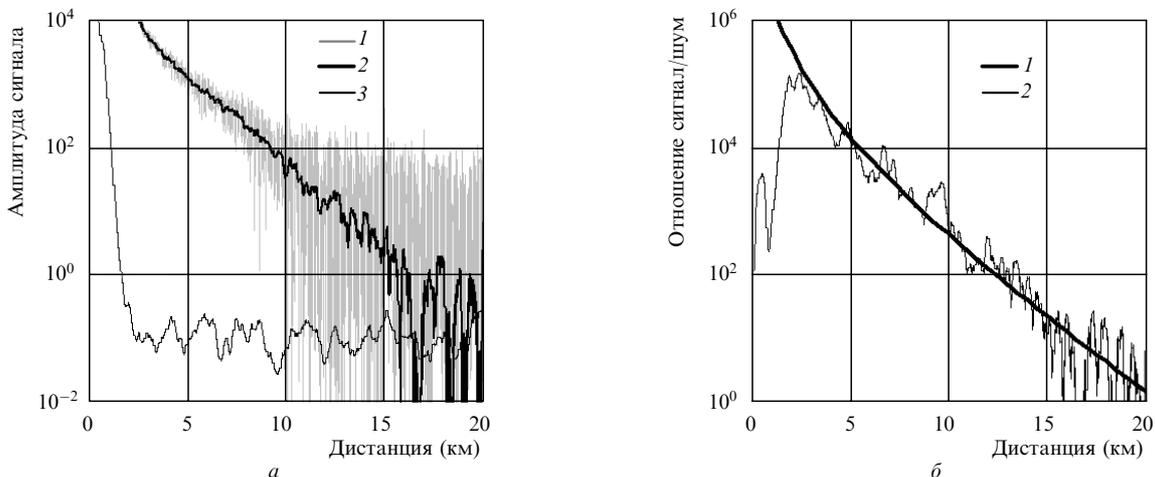


Рис.10. Сигнал обратного рассеяния, полученный в гетеродинном режиме в дальнем ИК диапазоне (линия 9R(30)) (1 – лидарный сигнал, 2 – сигнал, сглаженный экспоненциальным фильтром, 3 – СКО шума) (а) и оценки отношения сигнал/шум по формулам (1) (1) и (3) (2) (б).

Влияние турбулентности на работу гетеродинного CO_2 -лидара. Турбулентность атмосферы, нарушающая пространственную когерентность рассеянного излучения, в ряде случаев может влиять на эффективность гетеродинного приема. Степень и характер ее влияния определяются соотношением между радиусом когерентности $r_c = 1.46(k^2 C_n^2 R)^{-3/5}$ и размером приемного объектива лидара, приходящегося на один элемент приемника, $d_0 = D/N^{1/2}$ (N – число элементов многоэлементного приемника).

Выделяют три характерных случая:

1. $d_0 \ll r_c$. При этом на каждый элемент приемника из атмосферы приходит эквифазный сигнал, и атмосферная турбулентность слабо влияет на эффективность гетеродинного приема.

2. $d_0 \approx r_c$. В этом случае на каждый приемник поступает сигнал со случайной фазой. Указанная ситуация показана на рис.9,а, где представлена временная развертка двух синхронных сигналов, полученных с двух разных элементов матричного приемника. Существующая разность фаз сигналов зависит от дистанции детектирования и не повторяется от эксперимента к эксперименту.

3. $d_0 \gg r_c$. Переменная составляющая сигнала на каждом приемнике стремится к нулю с уменьшением r_c .

Критерий, определяющий рабочий диапазон гетеродинного приемного канала, выглядит следующим образом:

$$\frac{r_c}{d_0} = \frac{1.46(k^2 C_n^2 R)^{-3/5}}{D} \sqrt{N} > 1, \quad (4)$$

где k – волновое число; C_n^2 – структурная постоянная атмосферной турбулентности.

Анализ статистики параметров турбулентности [13] показывает, что для всех практически важных случаев использования мобильных лидарных комплексов условие (4) выполняется.

7.1. Ветровой когерентный доплеровский лидар

При измерении скорости ветра с помощью когерентного CO_2 -лидара он работает в режиме доплеровского лидара. При этом одночастотная лазерная CO_2 -система может работать на любом из двух каналов и на любой из линий колебательно-вращательного спектра CO_2 . Блок обработки сигналов гетеродинного матричного приемника выдает сигнал промежуточной частоты (20 ± 8 МГц), формирующийся в результате интерференции принятого из атмосферы рассеянного излучения с излучением локального осциллятора. При этом рассеянное излучение имеет доплеровский сдвиг частоты, пропорциональный проекции скорости ветра на направление трассы зондирования. Для зондирующего излучения с длиной волны 10 мкм доплеровский сдвиг частоты составляет ~ 200 кГц·м⁻¹·с.

Сигнал оцифровывается с частотой выборки 100 МГц. Длительность временной реализации, записываемой в память компьютера для каждого зондирующего импульса, составляет 100 мкс. После записи каждый импульс обрабатывается с помощью цифрового оконного БПФ-фильтра. Ширина временного окна определяется желаемой точностью измерения скорости ветра. При увеличении ширины окна точность растет, однако ухудшается пространственное разрешение. Типовой алгоритм обеспечивает точность 1 м/с, что соответствует наименьшей

возможной ширине временного окна $\tau_w = 5$ мкс. Пространственное разрешение ΔR оказывается при этом равным $c\tau/2 = 750$ м. Алгоритм гибко настраивается и позволяет в зависимости от решаемой задачи выбирать требуемые пространственное разрешение и точность измерения скорости ветра.

Пример результатов оконного фурье-анализа данных доплеровского ветрового лидара приведен на рис.11,а. Экспериментальные данные получены при зондировании горизонтальной атмосферной трассы. Временное окно с $\tau_w \approx 5$ мкс перемещается по оси абсцисс, амплитуда сигнала промежуточной частоты нормируется, после чего вычисляются автокорреляционная функция и ее фурье-преобразование. Таким образом получается нормированный энергетический спектр фрагмента лидарного сигнала. Этот спектр откладывается на линии, параллельной оси ординат. Положение этой линии на оси абсцисс соответствует центру временного окна. На рис. 11,а виден максимум в районе 21 МГц, что соответствует скорости ветра $(21 - 20) \times 10^6$ Гц/200 $\times 10^3$ Гц·м⁻¹·с = 5 м/с. Обнаруживается некоторое расширение спектра сигнала по мере роста дистанции, которое, по-видимому, обусловлено влиянием атмосферной турбулентности.

На рис.11,б показано восстановленное методом оконного фурье-преобразования распределение осевой проекции скорости ветра вдоль трассы зондирования. При этом величина и знак доплеровского сдвига частоты рассеянного излучения определяют величину и знак проекции скорости ветра на направление трассы зондирования. Для измерения высотного профиля вектора скорости ветра производятся три последовательных измерения

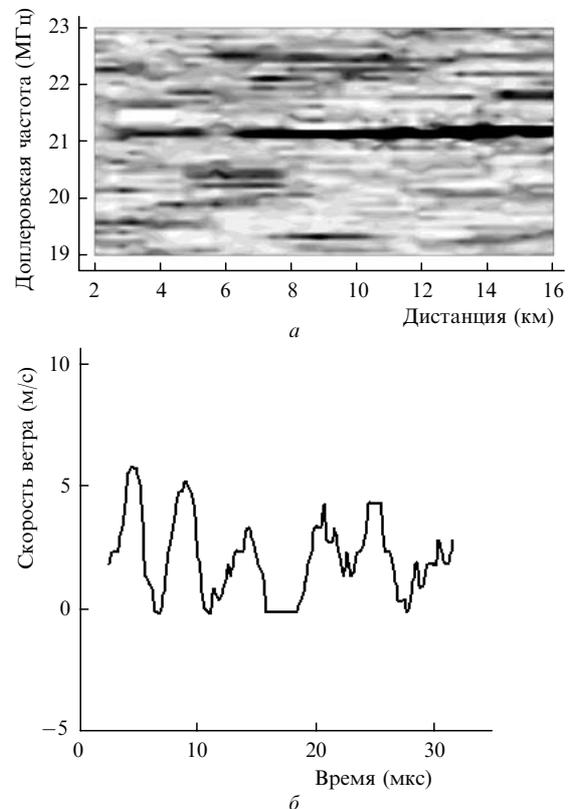


Рис.11. Результаты измерения скорости ветра по наклонной трассе под углом 10° к горизонту; а – данные оконного фурье-анализа сигнала доплеровского ветрового лидара, б – распределение осевой проекции скорости ветра.

ния по трем взаимно перпендикулярным наклонным трассам. Последующая обработка позволяет по измеренным проекциям вычислить горизонтальную и вертикальную составляющие ветра в зависимости от высоты.

7.2. Когерентный CO₂-лидар дифференциального поглощения

В режиме лидара дифференциального поглощения два когерентных CO₂-канала работают последовательно, с временным интервалом 10 мс и частотой повторения пар импульсов 10 Гц. Рабочие линии колебательно-вращательного спектра устанавливаются заранее, в соответствии с тем, какой концентрацией какого вещества необходимо измерить. Выбор и установка соответствующего положения дифракционных решеток производится автоматически. Пример одиночного лидарного сигнала приведен на рис.10,а. Вычисление концентрации C вещества предусматривает дифференцирование результатов измерений [1]:

$$C = \frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dR} \ln \frac{I_{on}}{I_{off}}, \quad (5)$$

где $\Delta\sigma$ – дифференциальное сечение поглощения ($\Delta\sigma = \sigma_{on} - \sigma_{off}$); I_{on} , I_{off} – лидарные сигналы, полученные на разных длинах волн. Подобная операция без предварительного принятых мер приводит к значительному усилению влияния шумов, что делает невозможными лидарные измерения даже на таких дистанциях, на которых отношение сигнал/шум для исходных лидарных сигналов (1), (3) значительно больше единицы. Для решения этой проблемы применяется постобработка сигнала, которая заключается в снижении уровня шума за счет пространственного разрешения.

Пространственное разрешение гетеродинного CO₂-лидара дифференциального поглощения ограничено двумя факторами – конечной длительностью зондирующего лазерного импульса и заданной погрешностью определения концентраций. Из (5), переходя к конечным расстояниям, можно легко получить соотношение между пространственной разрешающей способностью ΔR , минимальной концентрацией поглощающей примеси C_{min} , дифференциальным сечением поглощения $\Delta\sigma$ и отношением сигнал/шум SNR для исходного лидарного сигнала:

$$\Delta\sigma C_{min} SNR \Delta R \geq A_c, \quad (6)$$

где A_c – константа порядка единицы. Поэтому чувствительность лидара при наилучшем пространственном разрешении может быть выражена следующим образом:

$$C_{min} = \frac{A_c}{\Delta\sigma SNR \Delta R}. \quad (7)$$

Например, для λ_{on} (линия 10R(12)) и λ_{off} (9R(30)) дифференциальное сечение поглощения аммиака $\Delta\sigma = 55.8$ атм⁻¹·см⁻¹. При тех значениях SNR, которые достигаются в приемном канале МЛК (см. рис.10,б), и пространственном разрешении, ограниченном только длительностью импульса, минимальная обнаруживаемая концентрация аммиака на предельной дальности 15 км составляет ~1 ppm, что примерно соответствует порогу чувствительности обоняния.

Выбор лазерных линий для зондирования того или иного вещества осуществляется на основе тщательного

Табл.4. Дифференциальные сечения поглощения и чувствительность лидара для некоторых газов ($\lambda_{on} = 10R(12)$, $\lambda_{off} = 9R(30)$).

Молекула	σ_{on} (атм ⁻¹ ·см ⁻¹)	σ_{off} (атм ⁻¹ ·см ⁻¹)	$\Delta\sigma$ (атм ⁻¹ ·см ⁻¹)	C_{min} (ppm)
COF ₂	4.1	0	4.1	20.3
C ₂ H ₄	2.1	0	2.1	39.7
C ₂ H ₃ Cl	1	0.1	0.9	92.6
NH ₃	56	0.2	55.8	1.5
CClO ₃	6.8	0.25	6.55	12.7
C ₂ H ₅ OH	6.5	1.95	4.55	18.3
CCl ₂ F ₂	1.32	0	1.32	63.1

анализа требуемой дальности, чувствительности и возможных примесей, вносящих искажения в спектр поглощения изучаемой среды. Для линий 10R(12) и 9R(30) минимальные обнаруживаемые концентрации некоторых веществ для предельных дистанций приведены в табл.4. На более близких дистанциях чувствительность увеличивается соответственно росту SNR (см. рис.10,б). В любом случае пороговая концентрация обратно пропорциональна дифференциальному сечению поглощения и зависит от выбора длин волн зондирующего излучения.

Если размеры области загрязнения меньше пространственного разрешения лидара, то параметром, определяющим чувствительность системы, следует считать произведение концентрации на размер области вдоль трассы зондирования: $(C\Delta R)_{min}$. Сквозная калибровка CO₂-лидара дифференциального поглощения проведена кюветным методом по NH₃ ($\lambda_{on} = 10.716$ мкм (10P(34)), $\lambda_{off} = 10.588$ мкм (10P(20))) и SF₆ ($\lambda_{on} = 10.549$ мкм (10P(16)), $\lambda_{off} = 10.492$ мкм (10P(12))).

8. Коротковолновый аэрозольный лидар

Характерные первичные результаты зондирования естественного атмосферного аэрозоля коротковолновым аэрозольным лидаром показаны на рис.12. Видна структура аэрозольного слоя, расположенного на дистанции 8–13 км. Приведенный сигнал получен без накопления на длине волны 532 нм, при этом отношение сигнал/шум

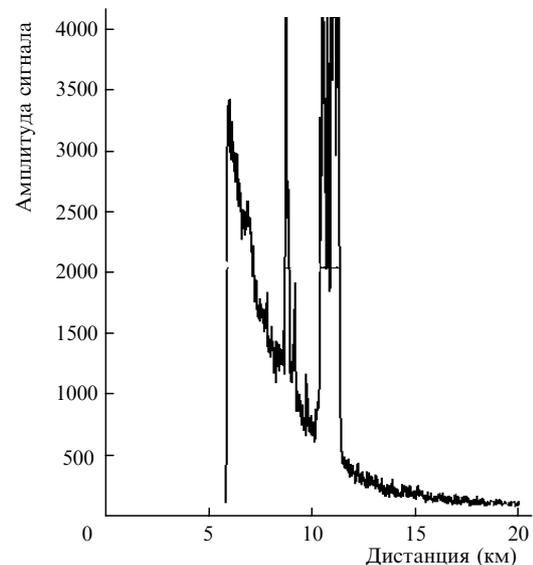


Рис.12. Лидарный сигнал, полученный без накопления при зондировании облачного слоя по наклонной трассе на длине волны 532 нм.

приближается к единице на дистанции около 15 км. Стробирование ФЭУ, которое отсекает рассеянное излучение, приходящее в данном случае с дистанции до 6 км, позволяет работать при максимальном усилении и, соответственно, на максимальной дистанции. Минимальная дистанция зондирования – 500 м.

Для зондирования атмосферного аэрозоля может быть выбрана любая из четырех гармоник Nd:YAG-лазера (1064, 532, 355, 266 нм). Коротковолновый лазерный модуль имеет два независимых канала (см. рис.4), и для режима двухволнового зондирования существует техническая возможность выбрать любую из пар длин волн (1064 и 532 нм, 1064 и 266 нм, 355 и 532 нм, 355 и 266 нм). Этот набор позволяет зондировать практически любой естественный атмосферный аэрозоль, определять его концентрацию и эффективный размер частиц.

9. Коротковолновый лидар дифференциального поглощения рассеяния

КВ ДПР построен на основе двухканального перестраиваемого лазера на сапфире с титаном, накачка которого производится второй гармоникой Nd:YAG-лазера (параметры лазера приведены в табл.3). Лазер работает в следующих полосах: 700–900 нм, 350–450 нм и 230–300 нм, что позволяет измерять концентрации различных экологических загрязнителей (NO_2 , SO_2 и т.п.), а также других веществ, спектры поглощения которых имеют особенности в пределах рабочих полос титан-сапфирового лазера. Рассеянное излучение принимается всей апертурой приемопередающего телескопа и фокусируется на приемной площадке ФЭУ.

Для основных параметров КВ ДПР, так же как и для ДВ ДПР, справедливо уравнение (6). Особенность коротковолновой системы состоит в том, что малая длительность импульса (30–40 нс) позволяет дополнительно увеличить чувствительность, уменьшив пространственное разрешение ΔR до тех значений, которые обеспечивают CO_2 -системой и МЛК в целом. Поэтому чувствительность КВ ДПР может быть вычислена с помощью формулы (6), где вместо величины σt следует использовать значение ΔR , превышающее σt . Для измерений концентрации NO_2 выбраны следующие длины волн: $\lambda_{\text{on}} = 448.5$ нм, $\lambda_{\text{off}} = 446.9$ нм ($\Delta\sigma = 5.5 \text{ атм}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$).

Накопление данных от нескольких зондирующих импульсов позволяет увеличить чувствительность в $(fT)^{1/2}$

раз за счет увеличения SNR, где T – время усреднения, которое не должно превышать характерное время изменения исследуемого загрязнения. В действительности именно усредненные по достаточно большому времени результаты являются объективными, поскольку индивидуальные лидарные сигналы сильно флуктуируют из-за изменения атмосферных условий. Так, при усреднении результатов в течение 5 с при $f = 10$ Гц и $\Delta R = 200$ м коротковолновый лидар МЛК обеспечивает чувствительность по обнаружению NO_2 с концентрацией $C_{\text{min}} \approx 1$ ppb на предельных дальностях, для которых $\text{SNR} \approx 1$. На рис.13 приведены характерный лидарный сигнал и отношение сигнал/шум. Сквозная калибровка коротковолнового лидара дифференциального поглощения проведена кюветным методом по NO_2 ($\lambda_{\text{on}} = 448.5$ нм, $\lambda_{\text{off}} = 446.9$ нм) и SO_2 ($\lambda_{\text{on}} = 300.1$ нм, $\lambda_{\text{off}} = 299.5$ нм).

10. Система управления МЛК

Все подсистемы комплекса (см. рис.2) образуют единую структуру, поскольку они объединены в бортовую сеть на основе промышленного интерфейса RS-485. Каждое устройство комплекса, подключенное к сети, имеет уникальный адрес. Обмен информацией осуществляется по инициативе управляющего компьютера в пакетном режиме, управление производится по командам от компьютера первого рабочего места (PM1). Данные от систем комплекса поступают на АЦП (частота выборки 20–100 МГц в зависимости от режима работы) после предварительной коммутации в системе синхронизации. Экспресс-обработка сигналов производится в реальном времени с выводом результатов на монитор PM1 и последующей передачей в систему визуализации и картографирования на PM2. Все результаты зондирования сохраняются в базе данных. Связь между компьютерами PM1 и PM2 осуществляется по сети Ethernet.

Согласование работы передающих и приемных устройств, а также системы сбора данных обеспечивается специальной системой синхронизации по командам, передаваемым через бортовую сеть комплекса.

Система управления обеспечивает выбор необходимых режимов работы лазеров, переключателей и ослабителей лидарных каналов, а также общую синхронизацию всех упомянутых систем. Система сканирования обеспечивает программируемый поворот зеркала сканера, а система сбора и обработки данных осуществляет измерение

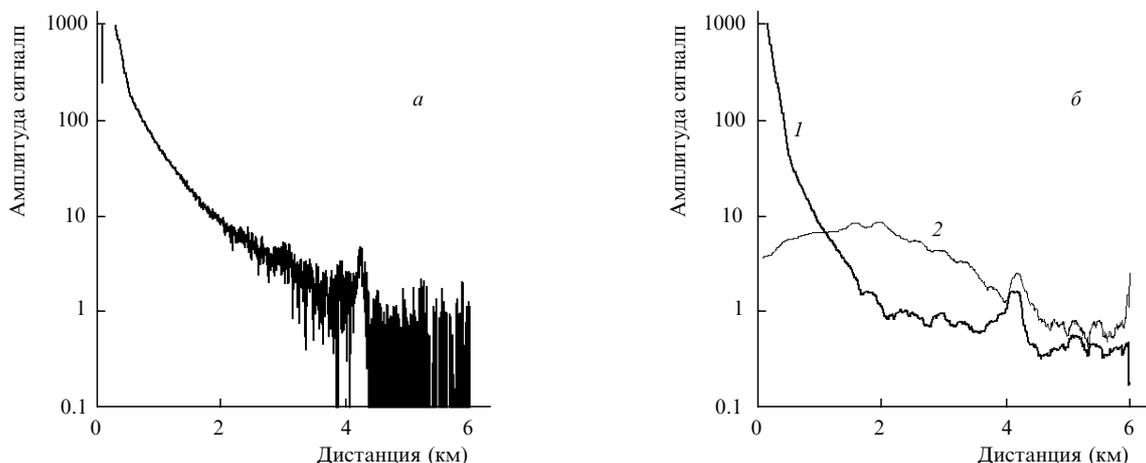


Рис.13. Лидарный сигнал, полученный на длине волны $\lambda_{\text{on}} = 448.5$ нм (а), а также СКО шума (1) и отношение сигнал/шум (2) (б).

сигналов, их накопление, вычисление объемных распределений, привязку их к местности и отображение результатов на экране монитора.

В режиме секторного сканирования контролируемый объект назначается по внешнему целеуказанию либо определяется в режимах панорамного сканирования и видеообзора. Объемное секторное сканирование производится с целью оценки мощности выброса, при этом определяются интегральные значения оптической плотности по области выброса в каждом направлении.

Панорамное сканирование представляет собой периодическое исследование воздушной среды (лидарное панорамирование – круговое или секторное) в зоне контролируемого объекта. При этом проводится аэрозольное зондирование, а также зондирование по каналам дифференциального поглощения для измерения концентрации заданных загрязняющих примесей, характерных для исследуемого объекта. Результатом является набор «лидарограмм» для последующей обработки (статистика, динамика развития, характерные времена жизни и изменения концентрации загрязнений и т. д.).

Такой режим работы лидарного комплекса требует обработки в реальном времени достаточно большого объема данных. Очевидно, что общий информационный трафик можно оценить следующим образом:

$$S = N_c f \Delta \tau F B, \quad (8)$$

где N_c – число одновременно работающих лидарных каналов; $\Delta \tau$ – длительность лидарного сигнала; F – частота выборки; B – число бит в слове данных. Для этого случая характерны следующие параметры: $N_c = 4$ (аэрозольный лидар, два канала дифференциального поглощения, флуоресцентный канал), $\Delta \tau = 100$ мкс, $F = 50$ МГц, $B = 16$. Тогда поток данных оценивается в 3.2 Мбит/с.

Экспресс-обработка лидарных сигналов, полученных в режиме секторного сканирования, позволяет получать изображение аэрозольных облаков, наложенное на карту местности. Визуализация движения аэрозольных образований позволяет прогнозировать их распространение. Оператор МЛК получает все необходимые для принятия решений данные: о текущем положении облака, о концентрации аэрозоля (изображена непосредственно на карте в виде изолиний), о направлении и скорости ветра, а также о прогнозируемых концентрации и положении облака.

11. Характерные результаты измерений

Результаты измерения фоновых концентраций аммиака в естественном городском ландшафте приведены на рис. 14. Карта распределения концентраций привязывается к географическим координатам с помощью GPS-приемника и изображается на экране монитора РМ2. По каждому из направлений сканирования производится накопление информации по 100 парам импульсов. Объем накапливаемых данных и время сканирования сектора выбираются оператором исходя из требований к быстротедействию и точности измерений.

Результаты зондирования естественного атмосферного аэрозоля в режиме секторного сканирования на длине волны 1064 нм приведены на рис. 15. Угол места при зондировании сектора был постоянным (10°). Облачный слой заканчивается на расстоянии 3–4 км, что соответствует верхней границе облачности 600–700 м. Периоди-

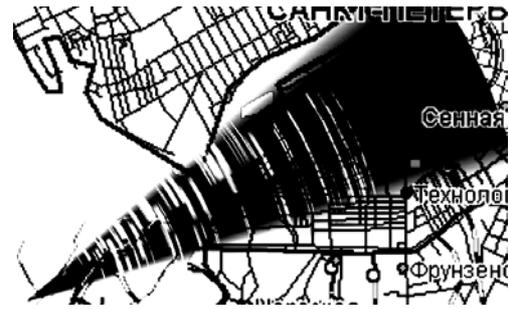


Рис. 14. Результаты измерений концентраций аммиака в естественном городском ландшафте Санкт-Петербурга. Светлые пятна в секторе зондирования соответствуют зонам с концентрацией более 1 ppm.

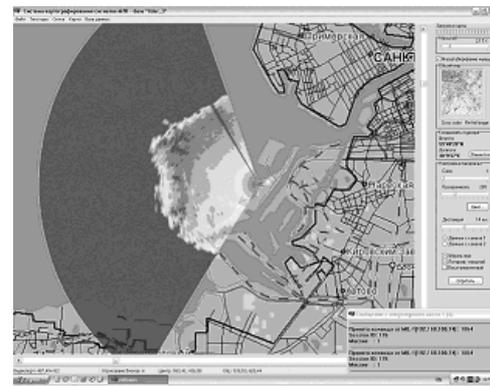


Рис. 15. Картина распределения атмосферного аэрозоля с привязкой к местности, изображенная на мониторе оператора при зондировании сектора в режиме аэрозольного лидара.

чески повторяемое зондирование сектора в одноволновом режиме при правильном выборе длины волны дает качественную картину распределения аэрозоля и ее динамику в реальном времени, обеспечивая исходные данные для краткосрочного прогноза распространения аэрозоля.

На рис. 16 приведена карта концентраций NO_2 , измеренных в городских условиях в режиме коротковолнового лидара дифференциального поглощения на трассах, наклоненных к горизонту под углом 10° . Отмечаются закономерно повторяющиеся максимумы концентрации, которые могут быть привязаны к определенным объектам на карте города.

Результаты измерений, приведенные на рис. 14–16, получены в один из летних пасмурных дней июля 2004 г. между 12-ю и 17-ю часами. Лидарный комплекс нахо-



Рис. 16. Результаты измерений фоновых концентраций NO_2 в естественном городском ландшафте Санкт-Петербурга. Светлые пятна в секторе зондирования соответствуют зонам с концентрацией более 1 ppm.

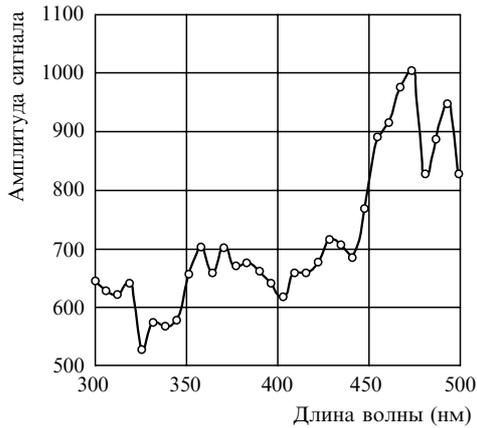


Рис.17. Спектр лазерно-индуцированной флуоресценции аэрозоля водного раствора альбумина, измеренный с помощью флуоресцентного канала МЛК.

дился на позиции, расположенной в юго-западной части Санкт-Петербурга, на берегу Финского залива. Для зондирования, как это можно видеть на картах, выбирались как западные (морские), так и восточные (городские) секторы.

Результаты дистанционных лидарных измерений спектра лазерно-индуцированной флуоресценции белка (искусственно приготовленный аэрозоль раствора альбумина) приведены на рис.17. Облако аэрозоля создавалось специальным аэрозольным генератором путем пневматического распыления раствора. Размеры облака вдоль трассы зондирования составляли несколько метров. Возбуждение осуществлялось лазерными импульсами на длине волны 266 нм. Измерения проведены в полевых условиях, в ночное время, на дистанции около 1 км. Произведено выборочное усреднение по 200 импульсам по методике, учитывающей статистическую природу флуоресцентного сигнала, с последующим вычитанием фонового спектра флуоресценции. Характерный вид спектра позволяет установить наличие белка в исследуемом аэрозоле по излучению в диапазоне длин волн 350–400 нм и 450–500 нм. В дневное время из-за сильной солнечной засветки измерения ограничивались областью до 400 нм, однако по условиям решаемых задач такие измерения должны проводиться, в основном, именно в ночное время.

Пример результатов измерения вертикального профиля структурной постоянной атмосферной турбулентности C_n^2 приведен на рис.18. В зависимости от желаемой точности и диапазона высот серия измерений C_n^2 и обработка данных осуществляются в течение 10–15 минут.

12. Заключение

Таким образом, в НПП «Лазерные системы» разработана архитектура мобильных многоволновых лидарных комплексов. Реализованы три варианта МЛК, бази-

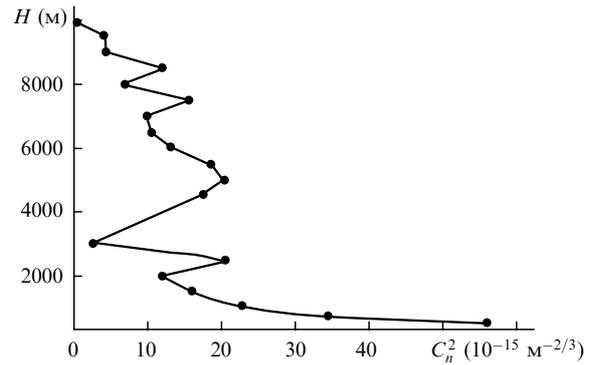


Рис.18. Высотный профиль структурной постоянной атмосферной турбулентности C_n^2 .

рующихся на автомобильных носителях. Совокупность данных комплексного лидарного зондирования, полученная с помощью МЛК, синхронизована в пространстве и времени, охватывает большую площадь (радиус действия МЛК 15 км) и основана на единой методической базе. Результаты зондирования включают информацию о концентрации и физической природе атмосферного аэрозоля, химическом составе газовой фазы атмосферы, о ветре и турбулентности. Полученные данные служат основой для комплексного анализа экологической ситуации и прогнозирования ее развития.

Авторы выражают глубокую благодарность коллегам из НПП «Лазерные системы», благодаря таланту и самоотверженному труду которых была выполнена эта работа.

1. Межерис Р. *Лазерное дистанционное зондирование* (М.: Мир, 1987).
2. <http://www.nppgamma.com/lidar.htm>.
3. Самолет-лаборатория «Оптик-Э»; <http://www.iao.ru/ru/resources/equip/plane/>.
4. Пеннер И.Э., Шаманаев В.С. *Оптика атмосферы и океана*, 7 (3), 338 (1994).
5. Балин Ю.С., Знаменский И.В., Зуев В.Е., Мельников В.Е., Самойлова С.В., Тихомиров А.А. *Оптика атмосферы и океана*, 8 (9), 1334 (1995).
6. Boreysho A.S., Volodenko V.A., Gryaznov N.A., Malamed E.R., Mendov Yu.N., Moshkov V.L., Pantaleev S.M., Pankratiev A.V., Finagin A.E., Chakchir S.Ya. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 5479, 177 (2004).
7. Борейшо А.С. *Квантовая электроника*, 35 (5), 393 (2005).
8. Killinger D.K., Menyuk N., DeFeo W.E. *Appl. Opt.*, 22 (5), 682 (1983).
9. Гордиенко В.М., Путивский Ю.Я. *Квантовая электроника*, 21 (3), 284 (1994).
10. Уэлстид С. *Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действии* (М.: Триумф, 2003).
11. Menzies R.T. *Appl. Opt.*, 10, 1532 (1971).
12. Targ R., Steakley B.C., Hawley J.G., Ames L.L., Forney P., Swanson D., Stone R., Otto R.G., Zarifis V., Brockman P., Calloway R.S., Klein S.H., Robinson P.A. *Appl. Opt.*, 35, 7117 (1996).
13. MacGovern A.J., Nahrstedt D.A., Johnson M.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 4034, 128 (2000).