

*На правах рукописи*

Сериков Илья Борисович

СПЕКТРАЛЬНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ  
ФАБРИ-ПЕРО ЛИДАРНЫХ ОТКЛИКОВ ВРАЩАТЕЛЬНОГО  
КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Специальность 01.04.05 - оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск - 2005

Работа выполнена в Институте оптики атмосферы СО РАН и  
Томском государственном университете

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
Юрий Филимонович Аршинов

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Артур Александрович Мицель

кандидат физико-математических наук,  
Алексей Анатольевич Землянов

Ведущая организация: Институт мониторинга климатических и  
экологических систем СО РАН

Защита состоится "14" апреля 2005 г. в 14 час. 30 мин. на  
заседании диссертационного совета Д 212.267.04 при Томском  
государственном университете (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36), ауд. 119.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского  
государственного университета.

Автореферат разослан « 3 » марта 2005 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

/Б.Н.Пойзнер/

### **Актуальность темы:**

Температура, характеризующая среднюю для ансамбля молекул скорость их хаотического теплового движения, является необходимым исходным параметром в задачах прогнозирования состояния атмосферы и тенденций развития протекающих в ней процессов. Это задачи метеопрогноза, прогнозирования смогообразования, задачи оценки интенсивности переноса в атмосфере антропогенных примесей, задачи исследования динамики развития атмосферных процессов, к примеру, динамики формирования облачных образований, динамики фазовых переходов. Во всех этих, и многих других задачах подобного плана вертикальный профиль температуры атмосферы, и его изменение во времени, является важным входным параметром. Необходимые для получения этой информации круглосуточные измерения температуры атмосферы до сих пор ведутся с применением контактных методов, которые не обеспечивают необходимого временного разрешения и повторяемости пространственной привязки профиля измеряемых параметров. Альтернативой контактным методам являются лидарные методы измерений, не имеющие обозначенных недостатков. Анализ существующих на сегодняшний день лидарных методов измерения температуры позволяет выделить, как наиболее перспективный, метод измерения температуры атмосферы по вращательным спектрам комбинационного рассеяния (КР) света молекулами атмосферного азота и кислорода. Экспериментальные исследования, проводившиеся различными научными группами, показали высокую эффективность данного метода при проведении измерений в отсутствии помехи рассеянного фона дневного неба (ночных измерений) [1-4, 3\*]<sup>А</sup>. В случае дневных измерений наличие помехи фона дневного неба существенно ограничивает высотный диапазон применимости метода. Один из подходов, позволяющих если не устранить совершенно, то, по крайней мере, значительно ослабить это ограничение, построен на фильтрации помехи рассеянного фона неба интерферометром Фабри-Перо [5]. Основная идея подхода такова: поскольку вращательный спектр КР света азотом (и кислородом) имеет вид гребенки линий, расположенных в шкале частот практически эквидистантно [6, 7], для выделения линий и подавления фона между ними может быть использован интерферометр Фабри-Перо (ИФП), представляющий собой частотный гребенчатый фильтр [8-11]. Эта идея фильтрации была высказана в работе [5] лишь в общем виде, ее физические основы не были изучены вплоть до момента проведения представляемой работы, не был построен соответствующий математический аппарат, не были выполнены экспериментальные исследования. Последнее обуславливает **актуальность** данной диссертационной работы, **целью** которой является исследование физических основ метода фильтрации интерферометром Фабри-Перо вращательного спектра комбинационного рассеяния света молекулами атмосферного азота (и кислорода) в задаче измерения температуры атмосферы. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Исследовать сравнительную эффективность измерений температуры атмосферы в зависимости от выбора положения и ширины температурно-чувствительных участков вращательного спектра комбинационного рассеяния азота и кислорода, с учетом влияния на точность измерений помехи несмещенного рассеяния и помехи рассеянного фона дневного неба.
2. Исследовать сравнительную эффективность измерений температуры атмосферы в зависимости от положения спектрального интервала, в котором возбуждаются спектры рассеяния.
3. Построить математическую модель интерферометра Фабри-Перо, позволяющую учесть физические аспекты фильтрации рассеянного фона дневного неба в задаче измерения температуры атмосферы лидаром по вращательным спектрам комбинационного рассеяния света.

### **Методы исследования:**

В работе применен комплексный подход: используется теория рассеяния Рэлея [в задаче № 2], рассеяния Ми [в задаче № 2], теория спонтанного комбинационного рассеяния [в задачах № 1-3], теория многолучевой интерференции [в задаче № 3], физическое и численное моделирование, методы математической статистики, натурный эксперимент.

### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. При выделении линий вращательного спектра комбинационного рассеяния атмосферного азота и фильтрации интерферометром Фабри-Перо спектрально однородного фона в промежутках между линиями, предел снижения времени измерений температуры атмосферы по соотношению интенсивности выделяемых линий равен 20.
2. Интерферометр Фабри-Перо, обеспечивающий максимальное снижение времени измерений температуры при отношении сигнал-фон, равном 0,1, обеспечивает, при отношении сигнал-фон в интервале от 1 до 0,01, снижение времени измерений не менее 87% от предельного уровня, достижимого при выборе параметров интерферометра для каждого конкретного значения отношения сигнал-фон.
3. В лидарной схеме измерений наличие упорядоченных по апертуре дефектов поверхности зеркал интерферометра Фабри-Перо приводит к зависимости пропускания спектральных каналов лидара от дальности зондирования.

### **Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы:**

На основе теории спонтанного КР выполнены оценки характеристик температурного канала лидара, найденные значения подтверждаются оценками, полученными из эксперимента. В частности, значение температурной чувствительности отношения вращательных откликов КР, полученное из расчета, с точностью в 3% согласуется с величиной, полученной по результатам натурных измерений [1\*]. Вертикальные профили температуры, восстановленные по результатам лидарных измерений, с хорошей точностью (1-2 градуса) ложатся на профили

<sup>А</sup> символом \* отмечены ссылки на список публикаций Серикова И.Б.

температуры, полученные при помощи метеорологических зондов, запускавшихся параллельно с лидарными измерениями [3\*, 6\*, 7\*, 9\*].

Результаты расчета параметров полос пропускания температурного канала лидара, выполненного в соответствии с предложенным в работе критерием, совпадают с результатами подобных расчетов, представленных в работе [5], выполненных для случая измерений в отсутствии помех в соответствии с критерием минимизации ошибки измерений.

Математическая модель интерферометра Фабри-Перо построена на основе теории многолучевой интерференции. Оценка уровня подавления помехи рассеянного фона дневного неба интерферометром, полученная с применением принятой модели, с хорошей точностью (2 %) совпадает со значением оценки этого параметра, найденным из натуральных измерений. Пропускание интерферометра для лидарных откликов в каналах вращательного КР, рассчитанное по модели, хорошо согласуется с данными, полученными в натурном эксперименте (отличие 5 %).

В частном случае, когда в каждом из четырех выделяемых (в соответствии с методикой измерения температуры) температурно-чувствительных участков вращательного спектра КР содержится по одной спектральной линии, а помеха фона много больше величины полезной составляющей сигнала, предлагаемый критерий выбора параметров интерферометра совпадает с критерием, предложенным в работе [12].

Оценка величины смещения восстанавливаемого по лидарным откликам значения температуры от истинного значения, рассчитанная по модели в предположении наличия крупномасштабных упорядоченных дефектов поверхности зеркал интерферометра, хорошо описывает результаты натуральных измерений. При дополнении измерительного канала лидара устройством, способным, в соответствии с моделью, устранить влияние упорядоченных по апертуре дефектов поверхности зеркал интерферометра, форма вертикального профиля температуры атмосферы, восстановленного по лидарным откликам, изменилась прогнозируемым по модели образом.

#### **Научная новизна работы заключается в следующем:**

Впервые исследованы физические основы метода фильтрации интерферометром Фабри-Перо помехи рассеянного фона дневного неба в спектральных промежутках между линиями вращательного спектра комбинационного рассеяния. Разработана методика расчета параметров интерферометра Фабри-Перо, предназначенного для фильтрации помехи рассеянного фона дневного неба в спектральных промежутках между линиями вращательного спектра КР. На основании расчета по данной методике впервые определены границы применимости метода фильтрации рассеянного фона дневного неба с использованием интерферометра Фабри-Перо, получена оценка эффективности метода. [Пункты 1-2 списка защищаемых положений].

Впервые описано влияние дефектов поверхности зеркал интерферометра, упорядоченных по апертуре, на зависимость пропускания спектральных каналов лидара от дальности зондирования. [Пункт 3 списка защищаемых положений].

В настоящей работе впервые описана зависимость оптимального (с точки зрения минимизации времени измерений) положения и ширины температурно-чувствительных участков вращательного спектра КР азота и кислорода от уровня помехи несмещенного рассеяния и помехи рассеянного фона дневного неба.

Для наиболее характерных атмосферных ситуаций, и высот зондирования, представляющих практический интерес, впервые описана зависимость времени накопления, необходимого для обеспечения фиксированной точности измерений температуры атмосферы, от выбора спектрального диапазона, в котором возбуждаются спектры рассеяния.

#### **Научная ценность результатов диссертационной работы:**

Использование выводов и рекомендаций, изложенных в работе, при построении температурных лидаров делает возможными дневные лидарные измерения высотных профилей температуры атмосферы с адекватным временным и пространственным разрешением. [Пункты 1-3 списка защищаемых положений].

Выводы и опыт, полученные в результате теоретической проработки и экспериментальной апробации методики фильтрации рассеянного фона дневного неба с применением интерферометра Фабри-Перо, являются уникальными и могут быть использованы при разработке температурных лидаров следующего поколения. [Пункты 1-3 списка защищаемых положений].

Результаты расчета параметров настройки температурного канала лидара (выполнявшейся в соответствии с критерием минимизации времени измерений), представленные в работе в виде зависимости положения и ширины участков вращательного спектра КР азота и кислорода от уровня помехи несмещенного рассеяния и спектральной плотности помехи рассеянного фона дневного неба, могут быть использованы при анализе различных вариантов фильтрации помех, а так же при конструировании лидаров.

Рассчитанная для различных атмосферных ситуаций зависимость времени накопления, необходимо для обеспечения заданной точности измерений температуры, от выбора спектрального диапазона, в котором возбуждаются спектры рассеяния, может быть напрямую использована при разработке лидаров.

#### **Практическая значимость результатов диссертационной работы:**

Предложенная в работе простая методика определения базы интерферометра может быть использована при настройке интерферометров Фабри-Перо, предназначенных для выделения линий вращательного спектра КР азота и кислорода.

Предложенная методика автоподстройки интерферометра, обеспечивающая высокую стабильность настройки (стабильность базы на уровне двух ангстрем, отклонение от параллельности зеркал не больше пяти сотых микрометра), может быть использована для решения задачи автоподстройки интерферометра в любых приложениях, по-

добных описанному в работе. В тех же приложениях может быть использован разработанный программный модуль, позволяющий осуществлять автоподстройку интерферометра в автономном режиме.

Предложенный в работе вариант устройства, позволяющего избавиться от зависимости угловых и апертурных параметров пучка, формируемого приемным телескопом лидара, от положения рассеивающего объема вдоль трассы зондирования, и, тем самым, обеспечить независимость пропускания спектральных каналов лидара от дальности зондирования, может использоваться в схеме любых лидаров. Его применение особенно оправдано в том случае, если измеряемый по лидарным откликам параметр определяется через величину отношения откликов рассеяния в различных лидарных каналах, и постоянство пропускания каждого из каналов особенно важно.

#### **Внедрение результатов работы:**

Описанная в работе методика фильтрации помехи рассеянного фона дневного неба в промежутках между линиями вращательного спектра комбинационного рассеяния азота с применением интерферометра Фабри-Перо опробована (ноябрь 1999 года) и внедрена (апрель 2001 года) на экспериментальном полигоне Института тропосферных исследований (Лейпциг, Германия). С апреля 2001 года интерферометр, установленный в температурном канале лидара, находится в непрерывной эксплуатации.

#### **Апробация работы:**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 19-ой Международной конференции по лазерному и акустическому зондированию (1998 г., Аннаполис, США), 5-ом Международном симпозиуме по оптике атмосферы и океана (1998 г., Томск), 20-ой Международной конференции по лазерному и акустическому зондированию (2000 г., Виши, Франция), 5-ом Международном симпозиуме по тропосферному профайлингу (2000 г., Аделаида, Австралия), 11-ой Международной школе по квантовой электронике (2000 г., Варна, Болгария), 21-ой Международной конференции по лазерному и акустическому зондированию (2002 г., Квебек, Канада), 6-ом Международном симпозиуме по тропосферному профайлингу (2003 г., Лейпциг, Германия), 22-ой Международной конференции по лазерному и акустическому зондированию (2004 г., Матера, Италия).

#### **Структура и объем работы:**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 91 наименование, и приложения, содержит 236 страниц, 153 рисунка и 5 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, изложены новые научные результаты и положения, выносимые на защиту.

**В первой обзорной главе** дан анализ достоинств и недостатков методов дистанционного измерения температуры, известных на момент проведения исследования. Показано, что из числа существующих методов наиболее оптимальным для построения на его основе системы, способной обеспечить возможность проведения круглосуточных дистанционных измерений профилей температуры атмосферы с адекватным временным и пространственным разрешением, является лидарный метод измерения температуры по вращательным спектрам КР света молекулами атмосферного азота и кислорода [14]. По сравнению с методами, построенными на других принципах, данный метод отличается тем, что для него:

- не существует принципиальных ограничений высотного диапазона применимости;
- спектральная селекция принципиально позволяет отделить информативную (с точки зрения метода) составляющую отклика рассеяния от других компонент рассеяния, в том числе и аэрозольного, являющегося серьезной, и зачастую неустранимой, помехой для многих других методов;
- эффект, лежащий в основе метода, существует при произвольном выборе частоты зондирующего излучения, (как одно из следствий, отсутствует необходимость перестройки частоты зондирующего излучения, что упрощает систему регистрации откликов рассеяния);
- частотный интервал, в пределах которого локализована информативная (с точки зрения метода) составляющая отклика рассеяния, относительно широк, что обуславливает простоту и, соответственно, надежность спектрального канала системы регистрации откликов рассеяния;
- метод является самодостаточным с точки зрения калибровки системы.

Эффективность метода при проведении измерений в отсутствие мешающего влияния рассеянного фона дневного неба подтверждается работами многих исследовательских групп [1-4, 11\*, 13\*]. К примеру, результат, полученный нашей группой совместно с лидарной группой Института тропосферных исследований (Лейпциг, Германия): при полуторачасовом усреднении лидарных откликов отклонение рассчитанного по ним профиля температуры атмосферы от профиля температуры, полученного при помощи метеорологического шара-зонда, не превысило одного градуса до высоты в 14 км [3\*].

В силу перечисленных достоинств методика измерения температуры по вращательным спектрам комбинационного рассеяния азота и кислорода выбрана как исходная для построения системы, способной обеспечить проведение круглосуточных измерений высотных профилей температуры атмосферы.

В той же первой главе кратко охарактеризованы существующие варианты снижения уровня помехи рассеянного фона дневного неба в каналах вращательного КР температурного лидара - помехи, ограничивающей возможности методики при проведении дневных измерений. Такой вариант, как переход в "солнечно слепую" область спектра, при необходимой дальности зондирования не менее 15 километров, рассматривается как неприемлемый, поскольку одни и те же атмосферные составляющие, участвующие, с одной стороны, в поглощении солнечного излучения и обеспечивающие снижение уровня рассеянного фона, с другой стороны, участвуют в ослаблении зонди-

рующего излучения [15]. Отличие в ослаблении сигнала и фона определяется отличием оптических толщ, а потому пропадает при их равенстве, делая переход в “солнечно слепую” область спектра резонным лишь для области высот порядка нескольких километров. В качестве метода снижения уровня помехи рассеянного фона дневного неба выбран метод, для которого не существует принципиальных ограничений по дальности зондирования, а именно, метод, построенный на фильтрации рассеянного фона дневного неба в промежутках между выделяемыми линиями вращательного спектра КР с применением интерферометра Фабри-Перо [5, 4\*].

Во второй главе работы рассматриваются вопросы оптимального (с точки зрения минимизации времени накопления, необходимого для обеспечения заданной точности измерений) выбора положения и ширины температурно-чувствительных участков вращательного спектра КР азота и кислорода, применительно к методике лидарных измерений температуры атмосферы, в зависимости от уровня помехи несмещенного рассеяния и помехи рассеянного фона дневного неба в измерительных каналах лидара, а также в зависимости от положения спектрального диапазона, в котором возбуждаются спектры рассеяния. Для этого дано краткое описание эффекта вращательного КР на языке формы спектров, интенсивности линий, их формы и относительного положения на оси частот. Дано описание методики измерений, в соответствии с которой температура,  $T$ , рассчитывается по величине отношения интенсивности откликов рассеяния в пределах участков вращательного спектра КР с противоположной по знаку температурной зависимостью интенсивности линий

$$R(T) = \frac{\sum_{j_{lo}} P_{j_{lo}} \overline{n_{j_{lo}}}(T)}{\sum_{j_{hi}} P_{j_{hi}} \overline{n_{j_{hi}}}(T)}, \quad (1)$$

$P_j \overline{n_j}(T)$  - средняя частота следования фотоотчетов в измерительном канале лидара для линии вращательного спектра КР (азота или кислорода) с номером  $j$  с учетом пропускания канала  $P_j$ . Суммирование по  $j_{lo}$  и  $j_{hi}$  соответствует суммированию по линиям, попадающим в полосу пропускания канала с меньшим ( $lo$ ) и большим ( $hi$ ) частотным сдвигом относительно линии возбуждающего излучения, рис. 1.

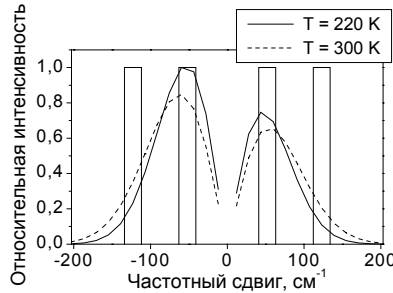


Рис. 1. Пример огибающих вращательного спектра КР азота для двух температур газа.

Предложен критерий выбора положения и ширины выделяемых участков спектра, состоящий в минимизации времени накопления,  $\Delta t(\Delta T)$  выражение (2), необходимого для обеспечения заданной точности измерений температуры,  $\Delta T$ . В выражении (2) величины  $\overline{B_{lo}}$  и  $\overline{B_{hi}}$  имеют смысл средней частоты следования фотоотчетов помехи в соответствующем спектральном канале.

$$\Delta t(\Delta T) = \left( \frac{\sum_{j_{lo}} P_{j_{lo}} \overline{n_{j_{lo}}} + \overline{B_{lo}}}{\left[ \sum_{j_{lo}} P_{j_{lo}} \overline{n_{j_{lo}}} \right]^2} + \frac{\sum_{j_{hi}} P_{j_{hi}} \overline{n_{j_{hi}}} + \overline{B_{hi}}}{\left[ \sum_{j_{hi}} P_{j_{hi}} \overline{n_{j_{hi}}} \right]^2} \right) \cdot \left( \frac{4,48}{\Delta T} \frac{1}{\left( \frac{dR}{dT} \right) \frac{1}{R}} \right)^2 \quad (2)$$

В соответствии с данным критерием рассчитаны положение и ширина участков вращательного спектра КР азота, выделение которых обеспечит минимальное время измерений (в рамках обсуждающейся методики измерений температуры), в зависимости от уровня помехи несмещенного рассеяния, рис. 2, и помехи рассеянного фона дневного неба, рис. 3.

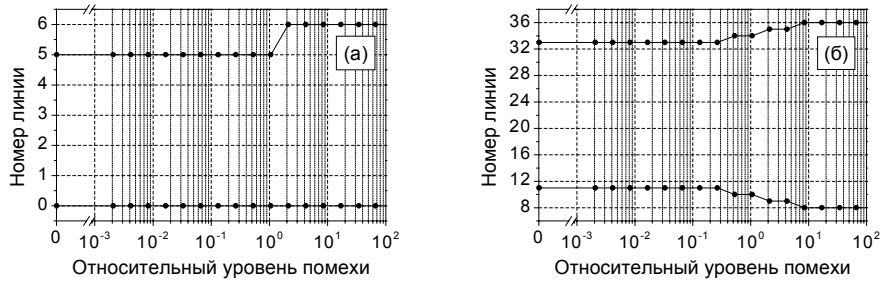


Рис. 2. Оптимальное положение границ выделяемых участков вращательного спектра КР азота с меньшим (а) и большим (б) частотным сдвигом относительно линии возбуждающего излучения в зависимости от относительного уровня помехи.

Уровень помехи на рисунке 2 приведен в единицах отклика рассеяния для шестой линии стоксовой полосы вращательного спектра КР азота при температуре газа 220 К. При изменении уровня помехи в указанных на рисунке 2 пределах выбор положения и ширины выделяемых участков спектра с учетом уровня помехи позволяет снизить необходимое время накопления до двух раз по сравнению с вариантом, когда участки спектра выбираются для случая отсутствия помехи.

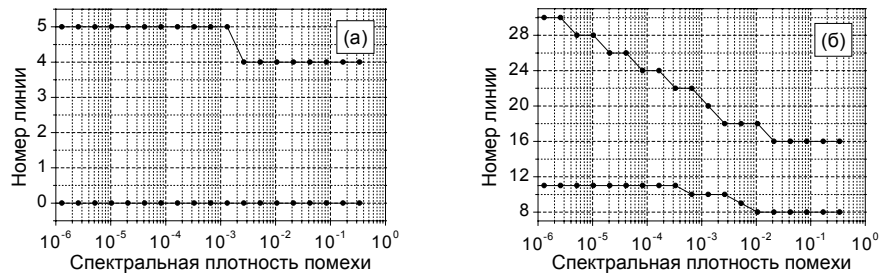


Рис. 3. Оптимальное положение границ выделяемых участков вращательного спектра КР азота с меньшим (а) и большим (б) частотным сдвигом относительно линии возбуждающего излучения в зависимости от уровня спектральной плотности помехи.

Спектральная плотность помехи на рисунке 3 приведена в единицах спектральной плотности отклика рассеяния для шестой линии стоксовой полосы вращательного спектра КР азота при температуре газа 220 К. При изменении уровня спектральной плотности помехи в указанных на рисунке 3 пределах, выбор положения и ширины выделяемых участков спектра с учетом уровня помехи позволяет снизить необходимое время накопления до трех раз по сравнению с тем вариантом, когда участки спектра выбираются для измерений в отсутствие помехи. Аналогичного рода зависимости (рис. 2, 3) получены в работе еще для двух вариантов формирования спектральных каналов: выделения отдельно линий вращательного спектра КР кислорода и одновременного выделения линий спектра азота и спектра кислорода.

Для набора моделей, описывающих наиболее характерные атмосферные ситуации (чисто молекулярной атмосферы [16, 17], двух типов дымки, “прозрачной” и “плотной” (с дальностью видимости по горизонту в приземном слое 23 км и 5 км, для излучения с длиной волны 514,5 нм) [16, 18], атмосферы с присутствием кристаллических облаков [19, 20]), с учетом спектральной плотности освещенности прямой солнечной радиацией [13], выполнены оценки уровня рассеянного фона дневного неба, ожидаемого при проведении атмосферных измерений. С учетом полученных оценок исследована зависимость времени накопления (2), необходимого для обеспечения фиксированной точности измерений, от положения спектрального диапазона, в котором возбуждаются спектры рассеяния. Извлечение из этой части работы представлено на рисунке 4.

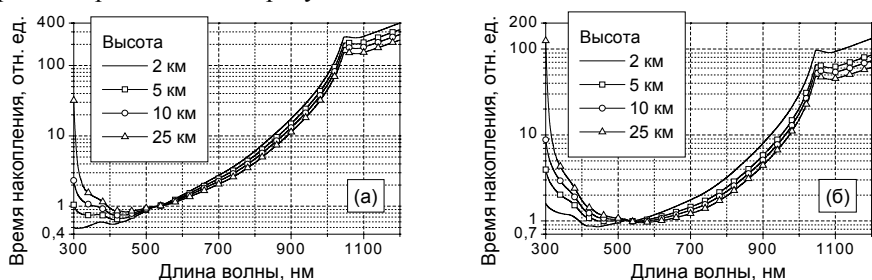


Рис. 4. Относительное время накопления, необходимое для обеспечения фиксированной точности измерений, как функция длины волны возбуждающего излучения и высоты измерений, для комбинации модели чисто молекулярной атмосферы с моделью “прозрачной” приземной дымки (а), и моделью “плотной” приземной дымки (б). Отношение сигнал-фон равно единице.

Время накопления на рисунке 4 приведено в относительных единицах, за единицу для каждой высоты зондирования (рассматривается случай зондирования в зенит) принято время накопления, необходимое для обеспечения фиксированной точности измерений при возбуждении спектра рассеяния излучением с длиной волны 532 нм. Зависимости получены в предположении выбора фотоприемников (из числа существующих) с максимальной квантовой эффективностью в пределах каждого спектрального интервала, в котором возбуждаются спектры рассеяния, [21]. Все прочие параметры системы регистрации заданы постоянными. В соответствии с расчетом (по критерию минимизации времени измерений), для высот зондирования порядка 15 километ-

ров и выше, при отношении сигнал-фон (в канале с большим частотным сдвигом полосы пропускания) меньше единицы, спектры рассеяния следует возбуждать в ближнем ультрафиолете, при отношении сигнал-фон больше единицы следует использовать видимую область спектра.

С привлечением тех же моделей атмосферы выполнены оценки сравнительной дальности зондирования в зависимости от положения спектрального диапазона, в котором возбуждаются спектры рассеяния. Показано, что в случае высокого уровня помехи (сигнал-фон порядка 0,1) при фиксированном времени накопления переход из видимой области спектра в ближний ультрафиолет дает лишь небольшой выигрыш по дальности зондирования (порядка одного-двух километров). И, таким образом, выбор для возбуждения спектров рассеяния видимой области спектра или ближнего ультрафиолета оказывается практически равнозначным, с точки зрения достижения предельной высоты измерений.

Для температурного канала комплексного Ми-КР-лидара Института тропосферных исследований (Лейпциг, Германия), на базе которого выполнены все представленные в работе экспериментальные исследования, сделаны оценки времени накопления, необходимого для обеспечения точности измерения температуры в 1 градус, в зави

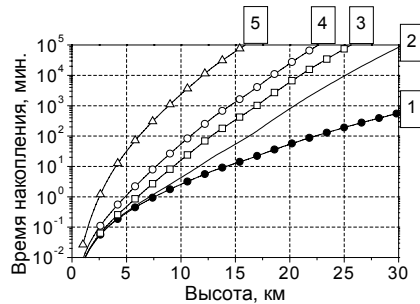


Рис. 5. Время накопления как функция высоты измерений, при точности измерений температуры  $1^\circ$ . Высотный ход температуры - модель среднеширотного лета [16]. Пространственное разрешение 60 м. Зенитный угол Солнца  $20^\circ$ . Кривые: 1 - молекулярная атмосфера (ночь); 2 - молекулярная атмосфера (день); 3 - кристаллическое облако; 4 - "прозрачная" дымка; 5 - "плотная" дымка.

Таблица 1. Параметры Ми-КР лидара Института тропосферных исследований (Лейпциг, Германия).

Лазер	
Длина волны, нм	532,075
Ширина линии по полувысоте, $\text{см}^{-1}$	0,003
Энергия в импульсе, Дж	0,8
Частота повторения, Гц	30
Длительность импульса, нс	10
Расходимость, мрад	0,5
Коллимация	1:10
Приемный телескоп	
Диаметр, м	1
Эффективное фокусное расстояние, м	10
Угол поля зрения телескопа, мкрад	175
Фотодетектор	
ФЭУ, Hamamatsu H7421-40	
Квантовая эффективность, %	43
Длительность строба, нс	400

симости от дальности (высоты) зондирования, рис. 5. Параметры лидара приведены в таблице 1. На основании выполненных оценок, сделан вывод о том, что при проведении дневных измерений, методика измерений температуры атмосферы по вращательным спектрам комбинационного рассеяния атмосферного азота и кислорода, при необходимой высоте измерений в 15-25 километров и приемлемом времени накопления (порядка часа), не позволит достичь достаточной точности измерений (1-3 градуса) без дополнительных усилий по снижению уровня помехи рассеянного фона дневного неба. Результаты исследований, описанных во второй главе, используются в третьей главе работы.

**В третьей главе** проводится исследование физических основ метода фильтрации интерферометром Фабри-Перо вращательного спектра комбинационного рассеяния света молекулами атмосферного азота (и кислорода) в задаче измерения температуры атмосферы. Для этого построена математическая модель интерферометра с учетом неидеальной плоскостности зеркал и конечной расходимости падающего на интерферометр пучка. В соответствии с моделью форма максимума функции пропускания интерферометра описывается соотношением



$$f_{d,0}(\delta\tilde{\nu}) = \left(1 - \frac{\alpha}{1-R}\right)^2 \frac{\arctg\left(\frac{F_R}{F_0}\right)}{\frac{F_R}{F_0}} \delta f_d^{\max}\left(\frac{F_{R,0}}{F_d}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\delta\tilde{\nu}^2}{2\sigma_{R,d,0}^2}\right), \quad (3)$$

где  $\delta\tilde{\nu}$  - смещение по частоте от положения максимума пропускания,  $R$  и  $\alpha$ , соответственно, коэффициенты отражения и поглощения (по интенсивности) зеркал интерферометра.  $F_R$ ,  $F_0$  и  $F_d$  - отражательная, угловая и дефектная резкости функции пропускания интерферометра, соответственно

$$F_R = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}, \quad (4)$$

$$F_0 = \frac{\Delta\nu}{\left(\frac{v_k\delta\theta^2}{2}\right)}, \quad (5)$$

$$F_d = \frac{1}{n} \frac{\lambda}{2} \frac{1}{2\sqrt{2\ln 2}\sigma_d}. \quad (6)$$

$\Delta\nu = \frac{1}{2d}$  - область свободной дисперсии,  $d$  - база интерферометра;  $v_k$  - положение в шкале частот максимума функции пропускания интерферометра для порядка интерференции с номером  $k$ ;  $\delta\theta$  - половина плоского угла расходимости пучка;  $\lambda$  - длина волны интерферирующего излучения.  $n$  - показатель преломления вещества, заполняющего промежуток между зеркалами интерферометра;  $\sigma_d$  - среднее квадратическое отклонение в модели распределения отклонений от среднего расстояния между зеркалами интерферометра (по апертуре зеркал)

$$\rho(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma_d^2}\right). \quad (7)$$

Резкость функции пропускания интерферометра с идеально плоскими зеркалами  $F_{R,0}$  связана с отражательной и угловой резкостью соотношением

$$\frac{1}{F_{R,0}^2} = \frac{1}{F_R^2} + \frac{1}{F_0^2}. \quad (8)$$

Величина  $\sigma_{R,d,0}$  определяется как

$$\sigma_{R,d,0} = \frac{1}{2\sqrt{2\ln 2}} \frac{\Delta\nu}{\delta f_d\left(\frac{F_{R,0}}{F_d}\right) \cdot F_{R,0}} \quad (9)$$

Фактор  $\delta f_d^{\max}\left(\frac{F_{R,0}}{F_d}\right)$  и фактор  $\delta F_d\left(\frac{F_{R,0}}{F_d}\right)$ , характеризующие, соответственно, снижение амплитуды и уширение максимума пропускания вследствие неплоскостности зеркал интерферометра, описываются аппроксимациями

$$\delta f_d^{\max}\left(\frac{F_{R,0}}{F_d}\right) = \frac{1,450}{\left(1 + \frac{F_{R,0}}{F_d}\right)} + \frac{0,298}{\left(1 + \frac{F_{R,0}}{F_d}\right)^2} - \frac{0,760}{\left(1 + \frac{F_{R,0}}{F_d}\right)^3} \quad (10)$$

$$\delta F_d\left(\frac{F_{R,0}}{F_d}\right) = \frac{0,974}{\left(1 + \frac{F_{R,0}}{F_d}\right)} + \frac{0,527}{\left(1 + \frac{F_{R,0}}{F_d}\right)^2} + \frac{0,390}{\left(1 + \frac{F_{R,0}}{F_d}\right)^3} - \frac{0,917}{\left(1 + \frac{F_{R,0}}{F_d}\right)^4} \quad (11)$$

При расчете параметров интерферометра используется тот же критерий минимизации времени измерений, выражение (2), в котором величины  $P_j$  имеют смысл пропускания интерферометра для отдельных линий спектра. С учетом доплеровского уширения линии вращательного спектра КР и гауссовой формы контура линии возбуждающего излучения пропускание интерферометра для отдельной линии имеет вид

$$P_j^{\text{FPI}} = \int_{(\delta\nu_{\text{RAMAN}})} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{v,L}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(v - v_0 - \Delta\nu_j)^2}{\sigma_{v,L}^2}\right) \cdot f_{d,0}(v) dv, \quad (12)$$

интегрирование ведется в пределах ширины выделяемой спектральной линии  $\delta\nu_{\text{RAMAN}}$ .  $v_0$  - частота, определяющая положение линии возбуждающего излучения.  $\Delta\nu_j$  - частотный сдвиг линии с номером  $j$  вращательного спектра комбинационного рассеяния (выбранного типа молекул).  $\sigma_{v,L}$  - среднее квадратическое отклонение, характеризующее ширину линии вращательного спектра КР.  $f_{\text{FPI}}(v)$  - функция пропускания интерферометра.

Уровень помехи рассеянного фона дневного неба в каналах КР,  $\overline{B}_{lo}$  и  $\overline{B}_{hi}$  в выражении (2), определяется следующим образом

$$\overline{B}_{lo} = P_{sky}^{FPI} \overline{n}_v^{sky} \Delta v_{lo}, \quad \overline{B}_{hi} = P_{sky}^{FPI} \overline{n}_v^{sky} \Delta v_{hi}, \quad (13)$$

$\Delta v_{lo}$ ,  $\Delta v_{hi}$  определяют ширину полосы пропускания соответствующего канала.  $\overline{n}_v^{sky}$  - спектральная плотность средней частоты следования фотоотсчетов для фотонов рассеянного фона в каналах вращательного комбинационного рассеяния лидара.  $P_{sky}^{FPI}$  - пропускание интерферометра для помехи рассеянного фона дневного неба, которое, в приближении спектральной однородности фона и постоянства величины квантовой эффективности фотоприемника, имеет вид

$$P_{sky}^{FPI} = \left(1 - \frac{\alpha}{1-R}\right)^2 \frac{\pi}{2} \frac{1}{F_R}. \quad (14)$$

Расчет параметров интерферометра по модели (3) в соответствии с критерием минимизации (2), позволяет получать оценки значений оптимальных параметров интерферометра, отклонение которых от истинных значений (получающихся из прямого расчета) не превышает десятых долей процента, что говорит об адекватности модели (3). Применение предложенной модели интерферометра позволяет сократить время вычислений до 100 раз.

На основании анализа зависимости фактора снижения необходимого времени накопления при фильтрации фона интерферометром от величины отношения сигнал-фон определены границы применимости рассматриваемого метода фильтрации фона. Показано, что применение интерферометра оправдано в том случае, если отношение сигнал-фон лежит в пределах примерно от 1 до 0,01, рис. 6. Так же показано, что для системы, предназначенной для проведения измерений температуры в условиях изменения величины отношения сигнал-фон в пределах от 1

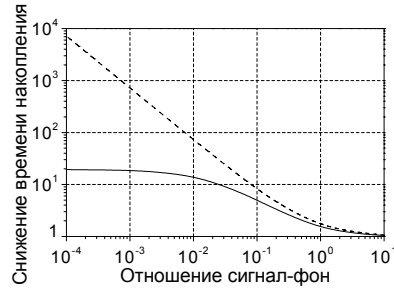


Рис. 6. Фактор снижения времени накопления при абсолютном подавлении помехи рассеянного фона (пунктирная кривая) и фильтрации фона интерферометром (сплошная кривая) в зависимости от величины отношения сигнал-фон (в канале с большим частотным сдвигом полосы пропускания).

до 0,01, параметры интерферометра следует выбирать для отношения сигнал-фон, равного 0,1.

При обсуждении вопроса согласования функции пропускания интерферометра и вращательного спектра КР показано, что рассогласование гребенки спектральных линий и максимумов функции пропускания интерферометра, являющееся следствием неэквидистантности положения в шкале частот линий вращательного спектра КР, а так же произвольного выбора частоты возбуждающего излучения, можно скомпенсировать без существенной потери пропускания интерферометра перестройкой базы. Переход от интерферометра к “идеальному” фильтру (отличающегося от интерферометра только тем, что положение максимумов его функции пропускания точно совпадает с положением выделяемых спектральных линий), при условии, что такой существует, не дал бы существенного выигрыша в снижении времени накопления, рис. 7.

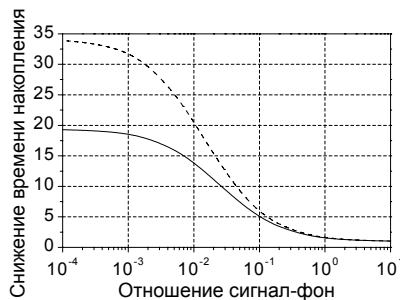


Рис. 7. Фактор снижения времени накопления в зависимости от величины отношения сигнал-фон при фильтрации помехи рассеянного фона интерферометром Фабри-Перо (сплошная кривая) и “идеальным” фильтром (пунктирная кривая).

Оценка влияния качества поверхности зеркал интерферометра на величину фактора снижения времени пока-

зала, что фактор снижения времени накопления, близкий к предельному, достижимому при идеальном качестве поверхности зеркал, реализуется при дефектной резкости порядка 100. Предел снижения времени накопления ограничен вследствие конечной ширины выделяемых спектральных линий. При качестве поверхности зеркал интерферометра, соответствующем дефектной резкости функции пропускания порядка 20, фильтрация фона интерферометром малоэффективна, рис. 8. Показано, что при изменении величины дефектной резкости функции пропускания интерферометра от 20 до 100 оптимальная величина отражательной резкости функции пропускания меняется в пределах примерно от 14 до 28, и, соответственно, область оптимальных значений коэффициента отражения зеркал интерферометра лежит в пределах от 0,8 до 0,9.

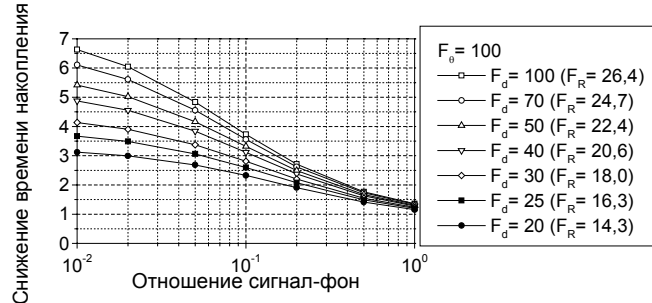


Рис. 8. Фактор снижения необходимого времени накопления в зависимости от величины отношения сигнал-фон с учетом фильтрации интерферометром линий спектра кислорода. Отражательная резкость функции пропускания при каждом конкретном значении дефектной резкости и заданной угловой резкости соответствует оптимуму для отношения сигнал-фон, равного одной десятой.

Анализ зависимости фактора снижения необходимого времени накопления от величины угловой резкости функции пропускания интерферометра показал, что при значениях угловой резкости больше 100 эффективность фильтрации фона отличается не более чем на 5 % от предельной, достижимой в том случае, когда падающий на интерферометр пучок представляет собой плоскую волну.

В работе рассмотрены различные схемы фильтрации фона. Показано, что использование двух интерферометров (одного для выделения линий вращательного спектра КР азота, второго – для выделения линий вращательного спектра КР кислорода) позволит снизить время накопления до полутора раз по сравнению с вариантом использования одного интерферометра и выделения только линий спектра азота (рис. 8). Также показано, что использование двух интерферометров (по описанной выше схеме) с относительно невысоким качеством поверхности зеркал (с дефектной резкостью порядка 30) позволяет добиться того же снижения времени накопления, что с одним интерферометром идеального качества (настроенным для выделения линий спектра азота).

Описано влияние ширины линии возбуждающего излучения на степень снижения времени накопления. Показано, что для того, чтобы степень снижения времени накопления была ниже максимально возможной (при заданных параметрах интерферометра и характеристиках падающего на него пучка) не более чем на 5 %, ширина линии возбуждающего излучения не должна превышать ширину контура доплеровского уширения линии вращательного спектра КР.

**В четвертой главе** рассматриваются практические вопросы реализации методики фильтрации рассеянного фона дневного неба с применением интерферометра Фабри-Перо. Описываются экспериментальные исследования, выполненные с целью проверки выводов, полученных в ходе теоретических расчетов, изложенных в третьей главе работы. Приводятся примеры дневных измерений вертикальных профилей температуры атмосферы, рассчитанных по лидарным откликам, отфильтрованных от рассеянного фона дневного неба при помощи интерферометра Фабри-Перо, в сравнении с профилями температуры, полученными при помощи метеорологических зондов.

Таблица 2. Параметры интерферометра.

Модель: TL-38 (Burleigh Instruments, Inc.)	
Световой диаметр зеркал, мм	32
База интерферометра, мкм	628+/-4,25
Резкость функции пропускания	
при диаметре пучка 2 мм	22
при диаметре пучка 30 мм	16,5
Коэффициент отражения зеркал	0,885
Коэффициент поглощения зеркал	0

Описаны схема и параметры температурного канала комплексного Ми-КР-лидара Института тропосферных исследований (Лейпциг, Германия), на базе которого проводилась апробация методики фильтрации рассеянного фона дневного с применением интерферометра Фабри-Перо. Описана конструкция и параметры использовавшегося интерферометра, таблица 2.

Предложена методика настройки интерферометра (определения базы) по уникальному совпадению в интерференционной картине, получающейся при освещении интерферометра рассеянным излучением ртутной лампы и гелий-неонового лазера, диаметров интерференционных колец для излучения с длинами волн 632,817 нм (He-Ne лазер), 546,073 нм (зеленая линия излучения ртутной лампы) и 576,960 нм (желтая линия излучения ртутной лампы). Описана методика автоподстройки базы интерферометра, обеспечивающая стабильность средней (в пределах апертуры зеркал интерферометра) базы на уровне 2 ангстрем, и отклонение зеркал от параллельности не более 0,05 микрорадиана. Предложенная схема автоподстройки позволяет осуществлять контроль и коррекцию настройки интерферометра параллельно с проведением измерений. Дано качественное описание программного модуля автоподстройки интерферометра.

Приведены результаты экспериментальной проверки оптимальности настройки, рис. 9. Измерено относительное пропускание интерферометра в нескольких порядках интерференции в окрестности рабочего порядка

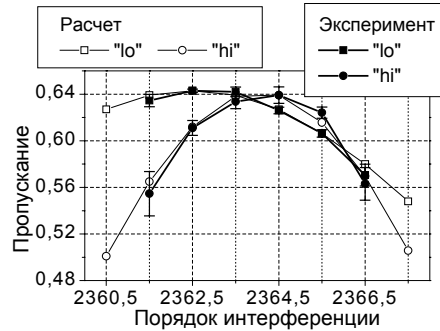


Рис. 9. Расчетное и экспериментально измеренное пропускание интерферометра для канала с меньшим (lo) и большим (hi) частотным сдвигом полосы пропускания для порядков интерференции в окрестности рабочего порядка 2364,5 (относительно  $\lambda = 532,075$  нм). Доверительные интервалы оценок рассчитаны по уровню 0,95.

интерференции, в котором, в соответствии с расчетом, пропускание интерферометра должно быть максимальным. Результаты натурных измерений продемонстрировали хорошее согласие эксперимента и теории, рис. 9. Это, во-первых, лишний раз подтверждает адекватность принятой математической модели интерферометра, во-вторых, доказывает то, что выбранный порядок интерференции действительно является оптимальным по пропусканию интерферометра, и, в-третьих, демонстрирует то, что предложенная методика определения базы позволяет точно настроить интерферометр в заданный порядок интерференции.

Проведены последовательные измерения без интерферометра и с интерферометром в температурном канале лидара для оценки уровня подавления интерферометром помехи рассеянного фона дневного неба, рис. 10. Для контроля уровня рассеянного фона использовался дополнительный спектральный канал – канал упругого рассеяния на частоте возбуждения откликов вращательного КР, использующихся для измерения температуры. Результаты измерений показали хорошее согласие (2 %) теории и эксперимента – оценка уровня подавления интерферометром рассеянного фона дневного неба по результатам измерений оказалась равной 16, в то время как по расчету эта величина, для используемого интерферометра, должна быть равна 16,3.

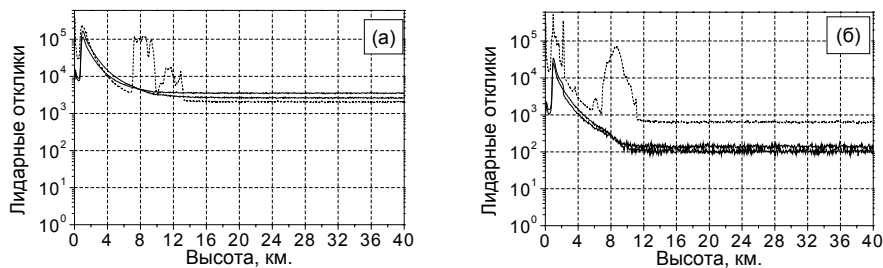


Рис. 10. Лидарные отклики (число фотоотсчетов) в каналах вращательного КР (сплошные кривые) и канале упругого рассеяния (пунктирные кривые), без интерферометра (а) и с интерферометром (б) в температурном канале лидара. Измерения без интерферометра: 29.11.1999, 14:45-15:26; с интерферометром: 30.11.1999, 15:01-15:42, [4\*].

С целью демонстрации принципиальных возможностей методики измерения температуры атмосферы по вращательным спектрам КР атмосферных азота и кислорода, и того качества данных, к которому должно быть приближено качество дневных измерений, приведен пример вертикального профиля температуры, полученного при помощи лидара в серии ночных измерений (без интерферометра) [3\*], в сравнении с профилем температуры, полученным при помощи метеорологического зонда, рис. 11 (а). На рисунке 11 (б) приведен пример дневных измерений профиля температуры атмосферы (из серии круглосуточных лидарных измерений, выполненных с применением для фильтрации рассеянного фона дневного неба интерферометра Фабри-Перо [7\*]), в сравнении с профилем температуры, полученным при помощи метеорологического зонда. Профили лидарной и зондовой температуры, представленные на рисунке 11 (б), хорошо согласуются друг с другом для высот от 2 до 10 км. Выше 10 км полезная составляющая сигнала существенно меньше помехи рассеянного фона (на 11 км отношение сиг-

нал-фон в канале с большим частотным сдвигом полосы пропускания равно 0,25) и для получения приемлемой точности измерений необходимо большее время накопления.

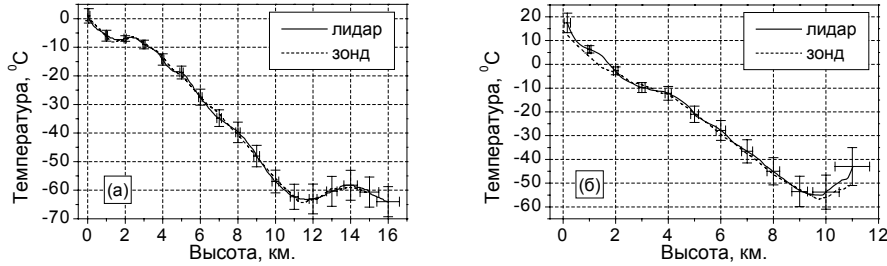


Рис. 11. Вертикальные профили температуры атмосферы по лидарным и зондовым измерениям. (а) ночные измерения без интерферометра, выполнены 15.11.1999, 21:54-23:27 [3\*]. (б) дневные измерения с интерферометром, выполнены 23.04.2001, 14:55-15:55 [7\*]. Вертикальными и горизонтальными отрезками на профилях “лидарной” температуры показаны, соответственно, доверительные интервалы по уровню 0,95 и пространственное разрешение.

Расхождение профиля лидарной и зондовой температуры в области высот до двух километров, что имеет место при измерениях с интерферометром, рис. 11(б), и отсутствует при измерениях без интерферометра, рис. 11 (а), объяснены наличием дефектов поверхности зеркал интерферометра, упорядоченных по апертуре зеркал. Проведенные модельные оценки систематических ошибок измерений температуры, являющихся следствием сферичности зеркал интерферометра (как одного из вариантов упорядоченных по апертуре отклонений от плоскостности зеркал),

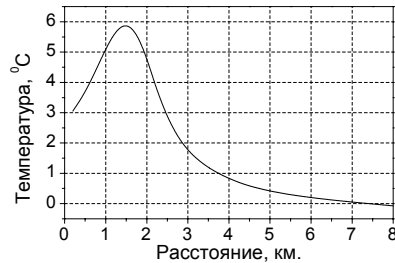


Рис. 12. Расчетное смещение восстанавливаемого по лидарным сигналам значения температуры от исходного, заданного значения ( $0^{\circ}\text{C}$ ), в зависимости от расстояния от лидара до рассеивающего объема.

подтвердили обоснованность данного объяснения. Расчетное смещение восстанавливаемого по лидарным сигналам значения температуры от исходного (истинного) значения и пространственное распределение профиля систематических ошибок измерений, полученные в рамках модели сферичности зеркал, рис. 12, хорошо согласуются с экспериментом.

В соответствии с принятым объяснением, для устранения систематических ошибок измерений, обусловленных наличием упорядоченных по апертуре дефектов поверхности зеркал, необходимо устранить зависимость угловых и апертурных параметров падающего на интерферометр пучка, формируемого приемным телескопом лидара, от положения рассеивающего объема вдоль трассы зондирования. Для решения этой задачи

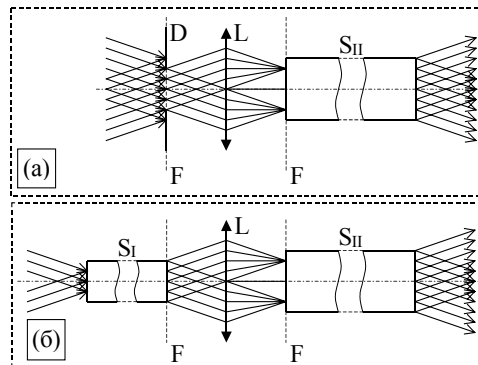


Рис. 13. Схема преобразования пучка с переменным углом расходимости в пучок с постоянным углом расходимости (а) и схема преобразования пучка с переменными угловыми и апертурными параметрами в пучок с постоянными угловыми и апертурными параметрами (б). D диафрагма, L линза,  $S_1$  и  $S_2$  световоды. Вертикальными пунктирными линиями показано положение фокальных плоскостей линзы.

предложен вариант устройства (скремблера), рис. 13, обеспечивающего преобразование пучка с переменными угловыми и апертурными параметрами в пучок с постоянными параметрами. Основным элементом скремблера является отрезок световода, который при большом числе переотражений внутри него лучей, составляющих па-

дающий пучок, производит усреднение интенсивности пучка по апертуре так, что при конечном диаметре пучка на входном торце световода выходной торец оказывается равномерно засвеченным (при этом углы лучей, составляющих падающий пучок, передаются световодом практически без искажений). Для усреднения интенсивности пучка по углу при помощи линзы осуществляется преобразование Фурье углов лучей в пространстве предметов в координаты точек в фокальной плоскости линзы в пространстве изображений. Световод  $S_{II}$ , осуществляющий усреднение интенсивности падающего на него пучка по апертуре, фактически производит усреднение интенсивности по углу входного пучка, падающего на диафрагму  $D$ , в случае схемы рис. 13 (а), и падающего на входной торец световода  $S_I$ , в случае схемы рис. 13 (б).

Установка скремблера, в варианте схемы рисунка 13 (а), в температурном канале лидара позволила избежать от систематических ошибок измерений, связанных с наличием упорядоченных по апертуре дефектов поверхности зеркал интерферометра, рис. 14. Тот факт, что при дополнении измерительного канала лидара устройством, способным, в соответствии с моделью интерферометра, устранить влияние упорядоченных дефектов поверхности зеркал, форма профилей температуры атмосферы, восстанавливаемых по лидарным сигналам, изменилась прогнозируемым по модели образом, подтверждает еще раз адекватность модели интерферометра, а так же обоснованность объяснения систематических ошибок измерений (рис. 12) наличием упорядоченных по апертуре интерферометра дефектов поверхности зеркал.

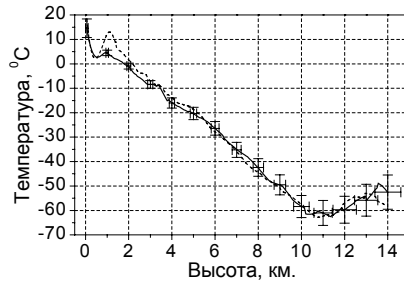


Рис. 14. Вертикальные профили температуры атмосферы, восстановленные по результатам измерений откликов рассеяния без скремблера (пунктирная кривая) и со скремблером (сплошная кривая) в температурном канале лидара. Измерения выполнены 30 марта 2003 г., без скремблера 30.03.2003, 21:01-21:31, со скремблером 30.03.2003, 22:47-23:52 [10\*, 12\*].

**В заключении** приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Исследована зависимость оптимального (с точки зрения минимизации времени накопления, необходимого для обеспечения заданной точности измерений температуры) положения и ширины участков вращательных спектров комбинационного рассеяния азота и кислорода от уровня помехи несмещенного рассеяния, помехи рассеянного фона дневного неба, а так же от положения спектрального диапазона, в котором возбуждаются отклики рассеяния.

2. Исследованы принципиальные возможности метода снижения необходимого времени накопления за счет фильтрации помехи рассеянного фона дневного неба в промежутках между линиями вращательных спектров комбинационного рассеяния молекул атмосферного воздуха с применением интерферометра Фабри-Перо. Построена математическая модель интерферометра, позволяющая сократить время вычислений в 100 раз при адекватном учете физических аспектов задачи фильтрации. Выработан критерий согласования параметров интерферометра Фабри-Перо, и в соответствии с ним определены границы применимости метода фильтрации рассеянного фона дневного неба в промежутках между линиями вращательного спектра комбинационного рассеяния атмосферных молекул с использованием интерферометра Фабри-Перо. Определены области значений параметров интерферометра и диапазон значений относительной спектральной плотности помехи, при которых эффективна фильтрация фона интерферометром. Показано, что:

- Один интерферометр может быть использован для одновременного выделения всех необходимых (по методике измерений температуры) линий вращательного спектра комбинационного рассеяния выбранного типа молекул (азота или кислорода).

- Один интерферометр, без изменения его параметров и настройки, может быть использован при проведении круглосуточных измерений температуры атмосферы.

- При измерении температуры атмосферы по вращательным спектрам комбинационного рассеяния атмосферного азота (или кислорода) использовать интерферометр Фабри-Перо для фильтрации помехи рассеянного фона дневного неба следует в том случае, если отношение сигнал-фон лежит в пределах диапазона от 1 до 0,01.

- Эффективность снижения времени накопления, отличающаяся не более чем на 9 % от той, что позволил бы получить интерферометр с идеально плоскими зеркалами, реализуется при дефектной резкости функции пропускания интерферометра больше 100.

- Фильтрация помехи рассеянного фона интерферометром при дефектной резкости функции пропускания интерферометра меньше 20 малоэффективна (при отношении сигнал-фон 0,01 эффективность снижения времени накопления в 2,4 раза меньше предельно возможной).

- При изменении величины дефектной резкости функции пропускания интерферометра от 20 до 100 оптимальная величина отражательной резкости функции пропускания меняется в пределах примерно от 14 до 28, соответственно, область оптимальных значений коэффициента отражения зеркал интерферометра лежит в пределах от 0,8 до 0,9.

- При угловой резкости функции пропускания интерферометра больше 100 эффективность снижения необходимого времени накопления отличается не более чем на 5 % от предельной, достижимой в том случае, когда падающий на интерферометр пучок представляет собой плоскую волну.

- При дефектной резкости функции пропускания интерферометра равной 100 и угловой резкости функции пропускания интерферометра равной 100 фильтрация интерферометром Фабри-Перо рассеянного фона дневного неба в промежутках между линиями вращательного спектра комбинационного рассеяния азота позволяет снизить время измерений температуры атмосферы в 6,6 раза при отношении сигнал-фон 0,01, в 3,8 раза при отношении сигнал-фон 0,1 и в 1,34 раза при отношении сигнал-фон 1.

- Одновременное выделение двумя интерферометрами линий спектра азота и линий спектра кислорода при фильтрации фона в спектральных промежутках между выделяемыми линиями позволяет дополнительно снизить время измерения температуры атмосферы примерно в полтора раза по сравнению с вариантом выделения одних только линий спектра азота.

- Пара интерферометров с относительно невысоким качеством поверхности зеркал (дефектная резкость функции пропускания порядка 30), при использовании одного из них для выделения линий спектра азота, второго - для выделения линий спектра кислорода, позволяет фильтровать рассеянный фон так же, и даже более эффективно, как один интерферометр с идеально плоскими зеркалами, настроенный для выделения линий спектра азота, либо линий спектра кислорода.

- Для обеспечения эффективности снижения необходимого времени накопления за счет фильтрации фона в промежутках между линиями вращательного спектра комбинационного рассеяния не хуже 95 % от предельной, ширина линии возбуждающего излучения не должна превышать ширину контура доплеровского уширения линии вращательного спектра комбинационного рассеяния.

3. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие теоретические оценки эффективности фильтрации интерферометром Фабри-Перо помехи рассеянного фона дневного неба в каналах вращательного комбинационного рассеяния. Полученные экспериментальные данные показали, что применение интерферометра Фабри-Перо позволяет значительно снизить уровень помехи рассеянного фона дневного неба в каналах вращательного КР (с использовавшимся в эксперименте интерферометром, до 16 раз), а так же существенно улучшить отношение сигнал-фон (с использовавшимся интерферометром, до 6 раз).

Итак, при фильтрации интерферометром (или двумя интерферометрами) Фабри-Перо рассеянного фона дневного неба в промежутках между линиями вращательного спектра комбинационного рассеяния азота (и ки-

слорода, в случае двух интерферометров) качество дневных измерений температуры атмосферы по вращательным спектрам комбинационного рассеяния азота (и кислорода) может быть приближено к предельным возможностям методики, реализующимся при измерениях в отсутствии помехи рассеянного фона. И, таким образом, методика измерений температуры атмосферы по вращательным спектрам комбинационного рассеяния атмосферных азота и кислорода и методика фильтрации помехи рассеянного фона с применением интерферометра Фабри-Перо в комбинации могут быть использованы для построения на их основе лидарной системы, способной обеспечить проведение круглосуточных дистанционных измерений профилей температуры атмосферы с адекватным временным и пространственным разрешением.

#### Основные результаты опубликованы в следующих работах:

- 1\*. Ansmann A., Arshinov Yu., Bobrovnikov S., Mattis I., Serikov I., Wandinger U. Double grating monochromator for a pure rotational Raman-lidar // Fifth International symposium on atmospheric and ocean optics / Zuev V.E., Matvienko G.G. (Editors), Proceedings of SPIE. – 1998. - V.3583. – P. 491-497.
- 2\*. Wandinger U., Mattis I., Ansmann A., Arshinov Yu., Bobrovnikov S., Serikov I. Tropospheric temperature profiling based on detection of Stokes and Anti-Stokes rotational Raman lines at 532 nm // 19th International laser radar conference: 6-10 July 1998. – Annapolis, 1998, P. 297-299.
- 3\*. Althausen D., Arshinov Y., Bobrovnikov S., Serikov I., Ansmann A., Mattis I., Wandinger U. Temperature Profiling in the Troposphere Using a Pure Rotational Raman Lidar // Needs and Technology: Vth International Symposium on Tropospheric Profiling. – Adelaide, Australia, 2000. P. 31-33.
- 4\*. Arshinov Yu., Bobrovnikov S., Serikov I., Ansmann A., Althausen D., Mattis I., Wandinger U. Spectrally absolute instrumental approach to isolate pure rotational Raman lidar returns from nitrogen molecules of atmosphere // Advances in laser remote sensing / Editors: Dabas A., Loth C., Pelon J. – Vichy, France, 2000, P. 121-124.
- 5\*. Arshinov Yu., Bobrovnikov S., Serikov I., Althausen D., Mattis I., Wandinger U., Ansmann A. Temperature profiling in the atmosphere using lidars // 11th International school on quantum electronics: laser physics and applications / Atanasov P.A., Cartaleva S. (Editors), Proceedings of SPIE. – 2000. - V.4397. – P. 453-460.
- 6\*. Mattis I., Ansmann A., Althausen D., Jaenish V., Wandinger U., Mueller D., Arshinov Yu., Bobrovnikov S., Serikov I. Raman lidar observations of relative humidity // 21st International laser radar conference: 8-12 July 2002. – Quebec, 2002, P. 27-31.
- 7\*. Bobrovnikov S., Arshinov Yu., Serikov I., Althausen D., Ansmann A., Mattis I., Wandinger U. Daytime temperature profiling in the troposphere with a pure rotational Raman lidar // 21st International laser radar conference: 8-12 July 2002. – Quebec, 2002, P. 717-720.
- 8\*. Serikov I., Arshinov Yu., Bobrovnikov S., Althausen D., Mattis I. Distortion of the temperature profile of the atmosphere acquired with a pure rotational Raman lidar due to sphericity of the Fabry-Perot interferometer plates // 21st International laser radar conference: 8-12 July 2002. – Quebec, 2002, P. 721-724.
- 9\*. Mattis I., Ansmann A., Althausen D., Jaenish V., Wandinger U., Mueller D., Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M., Serikov I.B. Relative humidity profiling in the troposphere with a Raman lidar // Applied Optics. – 2002. – V.41. - №30. – P. 6451-6462.
- 10\*. Arshinov Yu., Althausen D., Ansmann A., Bobrovnikov S., Mattis I., Mueller D., Serikov I., Wandinger U. Round-the-clock temperature profiling in the troposphere with Raman lidar // Sixth International symposium on tropospheric profiling: Needs and technologies: 14-20 September 2003. – Leipzig, Saxony, 2003, P. 142-144.
- 11\*. Balin I., Simeonov V., Serikov I., Bobrovnikov S., Calpini B., Arshinov Yu., van den Berg H. Simultaneous measurement of temperature, water vapor, aerosol extinction and backscatter by Raman lidar // Reviewed and revised papers presented at 22-nd International laser radar conference: 12-16 July 2004. – Matera, Italy, 2004, P. 139-142.
- 12\*. Arshinov Yu., Bobrovnikov S., Serikov I., Althausen D., Ansmann A., Mattis I., Mueller D., Wandinger U. Optic-fiber scramblers and Fourier transform lens as a mean to tackle the problem on the overlap factor of lidar // Reviewed and revised papers presented at 22nd International laser radar conference: 12-16 July 2004. – Matera, Italy, 2004, P. 227-230.
- 13\*. Balin I., Serikov I., Bobrovnikov S., Simeonov V., Calpini B., Arshinov Y., van den Bergh H. Simultaneous measurement of atmospheric temperature, humidity, and aerosol extinction and backscatter coefficients by a combined vibrational-pure-rotational Raman lidar // Applied Physics B. – 2004. - № 79. P. 775–782.

#### Цитируемая литература:

1. Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M., Zuev V.E., Mitev V.M. Atmospheric temperature measurements using a pure rotational Raman lidar // Applied Optics. – 1983. – V. 22. - № 19. – P. 2984-2990.
2. Nedeljkovich D., Hauchecorne A., Chanin M.L. Rotational Raman lidar to measure temperature from the ground to 30 km // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1993. - V.31. - №1. - P. 90-101.
3. Vaughan G., Wareing D.P., Pepler S.J., Thomas L., Mitev V. Atmospheric temperature measurements made by rotational Raman scattering // Applied Optics. – 1993. - V.32, №15, P. 2758-2764.
4. Behrendt A., Reichardt J. Atmospheric temperature profiling in the presence of clouds with a pure rotational Raman lidar by use of an interference-filter-based polychromator // Applied Optics. – 2000. - V.39. - №9. – P. 1372-1378.
5. Аршинов Ю.Ф. Разработка и исследование лидарного метода измерения температуры атмосферы по вращательным спектрам КР молекул воздуха: Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. - Томск, 1982. – 139 с.
6. Плачек Г. Рэлеевское рассеяние и Раман-эффект. - Харьков: ГНТИ Укр.ССР, 1935. – 173 с.
7. Butcher R.J., Willetts D.V., Jones W.J. On the use of Fabry-Perot etalon for the determination of rotational constants of simple molecules – the pure rotational Raman spectra of oxygen and nitrogen // Proc. Roy. Soc. Lon. A. – 1971. - V. 324, P. 231-245.
8. Мальшев В.И. Введение в экспериментальную спектроскопию. - М.: Наука, 1979. – 478 с.
9. Тарасов К.И. Спектральные приборы. – Ленинград: Машиностроение, 1977, - 387 с.
10. Нагибина И.М. Интерференция и дифракция света. - Ленинград: Машиностроение, 1974. – 359 с.
11. Зайдель А.Н. Основы спектрального анализа. - М.: Наука, 1965. – 322 с.
12. Monzon J.J., Sanchez-Soto L.L., Bernabeu E. Influence of coating thickness on the performance of a Fabry-Perot interferometer // Applied Optics. – 1991. - V.30. - №28. – P 4126-4132.
13. Valley S.L. Handbook of Geophysics and Space Environments. - Belford, Massachusetts: Air Force Cambridge Research Laboratories, 1965. – 692 p.
14. Cooney J. Measurement of atmospheric temperature profiles by Raman backscatter // J. Appl. Meteorol. – 1972. - V.11. - №1. – P. 108-112.



15. Аршинов Ю.Ф., Бобровников С.М., Попов А.Г., Шелефонтюк Д.И., Шумский В.К. Дальность обнаружения малых загрязняющих компонентов атмосферы в солнечнослепой области спектра // Оптика атмосферы и океана. – 1994. - т. 7. - № 8. - С. 1132-1138.
16. McClatchey R.A., Fenn R.W., Selby J.E.A., Volz F.E., Garing J.S. Optical properties of the atmosphere // Environmental research papers. – 1972. - №411. – p. 108.
17. Мак-Картни Э. Оптика Атмосферы. - М.: Мир, 1979. - 421 с.
18. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения полидисперсными частицами: Пер. с англ. – М.: Мир, 1971. – 165 с.
19. Measurements with lidar systems during the international cirrus experiment 1989. – Hamburg: Max-Planck-Institut fuer Meteorologie, №60, 1990. – 158 p.
20. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1984. – 198 с.
21. Kaufmann K. Photomultipliers detect rare events // Laser focus world. - 2000. - V.36. - №10. - P. 77-81.