

УДК 535.36+65.011.56

## Системная интеграция экспериментального оборудования высотного поляризационного лидара

О.В. Соковых, И.В. Самохвалов\*

*Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 16.07.2013 г.

Рассмотрен актуальный вопрос разработки способа системной интеграции экспериментального оборудования и программного обеспечения высотного поляризационного лидара, используемого при исследовании микроструктуры облаков верхнего яруса. Информация о характеристиках исследуемой среды содержится в лидарном сигнале, который представляет собой импульс сложной формы длительностью несколько десятков микросекунд.

Разнородность программного обеспечения, используемого для управления экспериментальным оборудованием, приводит к увеличению времени проведения эксперимента, а также к ошибкам, допускаемым оператором вследствие несогласованности программных процессов.

*Ключевые слова:* перистые облака, информационные системы, лидар; cirrus clouds, information systems, lidar.

Окружающую среду, как объект исследования, можно представить четырьмя взаимодействующими системами: атмосфера, гидросфера, литосфера и биосфера. Оптические методы позволяют проводить исследования всех этих систем, но на современном этапе развития науки данные методы пользуются наибольшим спросом при изучении именно атмосферы. Распространение оптического излучения в атмосфере сопровождается множеством эффектов, вызванных молекулярным и аэрозольным рассеянием, а также флуктуационными явлениями, обусловленными турбулентностью [1]. Именно поэтому ведущая роль в исследовании атмосферы отведена оптическим методам.

Классические методики локальных измерений в большинстве случаев позволяют получить ограниченный набор данных об атмосферных частицах (форма, масса, электрический заряд), но при заборе проб атмосферного воздуха бесследно теряется информация об ориентации частиц несферической формы [2].

Лидарные методы исследования до сих пор являются более перспективными вследствие многообразия эффектов взаимодействия оптических волн со средой. Использование лазерного излучения позволяет получать информацию о среде с большой оперативностью и высоким пространственным разрешением, определять предельно малые концентрации газов и изучать особенности микроструктуры аэрозоля, такие как ориентация кристаллических частиц в пространстве.

Для исследования преимущественной ориентации частиц в облачной среде сотрудниками Института оптики атмосферы СО РАН (г. Томск) и Томского государственного университета был разработан метод поляризационного лазерного зондирования [3]. Принципиальная схема модернизированного в 2009 г. лидара «Стратосфера-1М» представлена на рис. 1.

Для определения матрицы обратного рассеяния (МОРС), содержащей полную информацию о микроструктуре аэрозоля, приемник лидара должен обеспечить измерение четырех параметров Стокса лидарного сигнала при поочередной посылке в атмосферу излучения с четырьмя разными поляризациями.

Лазер генерирует линейно поляризованное излучение. В каналах передатчика и приемника установлены шаговые двигатели (ШД), управляемые с помощью контроллера шаговых двигателей (КШД). На роторы закреплены диски с четырьмя отверстиями, в которых вставлены соответствующие поляризационные элементы. В первое отверстие устанавливают нейтральную (по отношению к поляризации) пластинку; во второе — вращатель плоскости поляризации на  $90^\circ$  относительно базиса; в третье — четвертьволновую фазовую пластинку, ориентированную оптической осью под углом  $45^\circ$  к базису; в четвертое отверстие установлен вращатель плоскости поляризации на  $45^\circ$  относительно базиса.

В канале передатчика размещена оптопара «светодиод–фотодиод», являющаяся датчиком углового положения диска относительно начала отсчета. Оптопара в момент, когда одна из пластинок передатчика занимает угловое положение, при котором импульс излучения лазера проходит сквозь нее без виньетирования, формирует синхроимпульс, поступающий на вход блока управления лазером. После

\* Олег Викторович Соковых (zcodering@gmail.com);  
Игнатий Викторович Самохвалов (sam@elefot.tsu.ru).

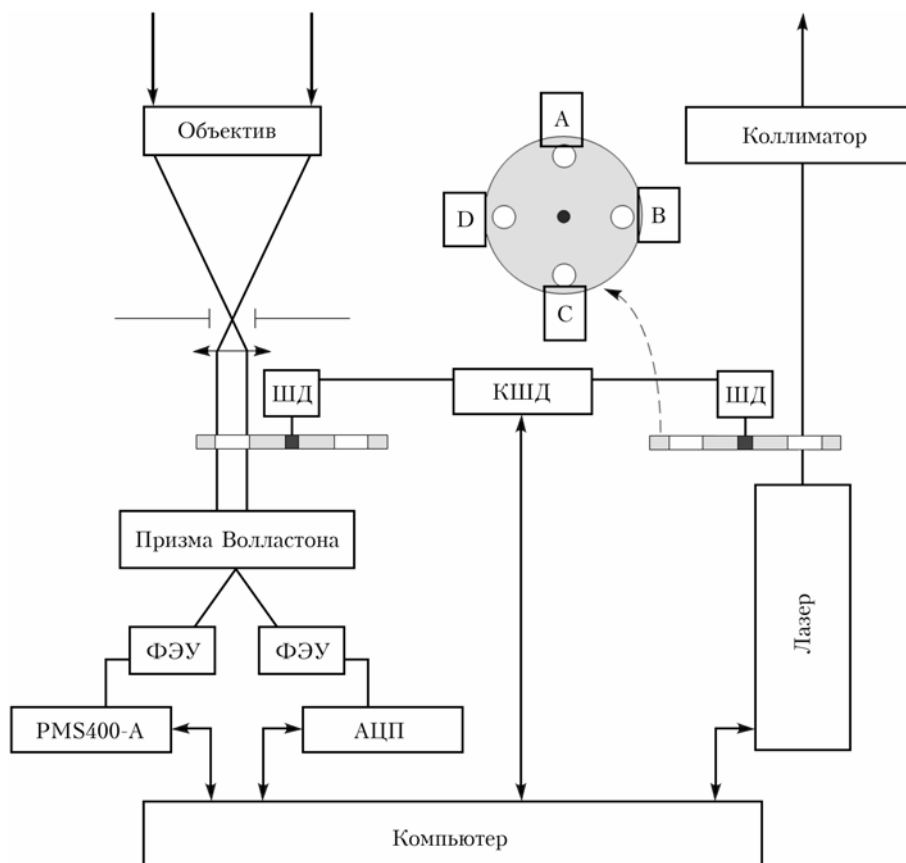


Рис. 1. Схема высотного поляризационного лидара

излучения лазером светового импульса происходит запуск систем регистрации лидарного сигнала фотодетектором, работающим в режиме счета фотонов (PMS400-A) или в аналоговом режиме.

Для одного цикла измерения матрицы обратного рассеяния требуется 16 выстрелов лазера. При частоте следования импульсов 10 Гц и скорости смены положения шагового двигателя  $\sim 0,5$  с данный промежуток времени будет равен  $\sim 10$  с. За это время измерительное устройство должно выполнить регистрацию сигнала и его запись на долговременный носитель информации, сопроводив дополнительной информацией о положениях оптических элементов в приемном и передающем трактах лидара.

Для уменьшения ошибок оценки элементов матрицы обратного рассеяния необходимо использовать режим накопления, который реализуется путем многократного повторения зондирующих лазерных импульсов. Это приводит к дополнительным трудностям при обработке результатов измерений, так как данные эксперимента, при использовании стандартного программного обеспечения PMS400-A, сохраняются во множестве различных файлов [4].

В рабочем пространстве оператора имеется три различных программных продукта, с помощью которых он осуществляет управление контроллером шаговых двигателей, счетчиком фотонов и лазерной установкой. Синхронизация процессов запуска экспериментальных устройств производится вручную,

что способствует не только уменьшению скорости проведения эксперимента, но и увеличению риска потери важных данных из-за человеческого фактора. При обработке результатов эксперимента возникают проблемы, связанные с экспортом данных в необходимые программные пакеты. Оператору требуется  $\sim 2$  ч рабочего времени на обработку результатов одного эксперимента. За день производится от 5 до 10 экспериментов.

Из вышеизложенного следует, что в данном случае необходима разработка средств автоматизации производимых измерений и автоматической обработки экспериментальных данных.

Разработанная информационная система (ИС) состоит из двух частей [5]: ядра и набора модулей. Ядро ИС построено таким образом, что с помощью дополнительных модулей можно изменять или расширять способности системы в получении, обработке и представлении данных поляризационного лазерного зондирования атмосферы с разных типов экспериментального оборудования (рис. 2).

На данный момент предложено пять типов модулей. Модули ввода/вывода позволяют как сохранять, так и получать данные с различных источников. Модули модификации опционально выполняют необходимые математические преобразования данных. Модули визуализации необходимы для представления данных в удобном для пользователя виде. Модули регистрации данных занимаются управлением

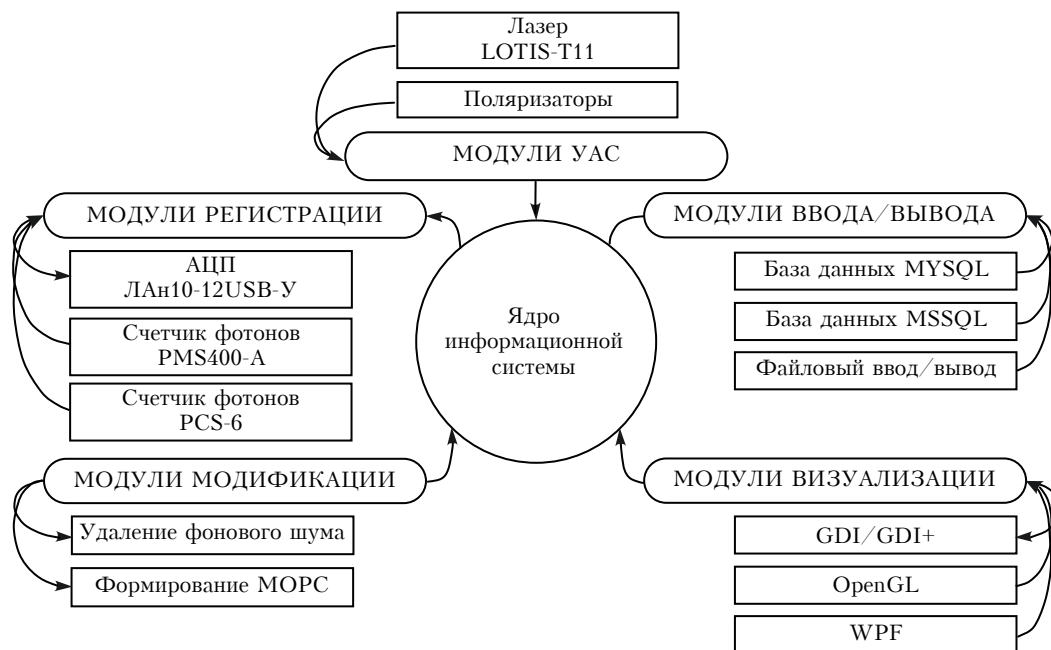


Рис. 2. Схема информационной системы

и получением данных с таких типов регистрирующей аппаратуры, как аналоговые цифровые преобразователи или счетчики фотонов. Модули управления аппаратными средствами взаимодействуют при помощи стандартных интерфейсов связи LPT, COM, USB с внешними устройствами.

Предлагаемое средство системной интеграции экспериментального оборудования позволяет в значительной степени сократить время обработки накопленных данных.

База данных результатов поляризационного лазерного зондирования [6] располагается на выделенном сервере, что дает возможность получить доступ к необходимой информации с любой точки Земли.

Структура базы данных (рис. 3) позволяет хранить как предварительные, так и обработанные данные.

Оператор базы данных имеет следующие функции:

- запуск и диагностирование экспериментального оборудования;
- настройка и ввод параметров эксперимента;
- запуск накопления данных;
- запуск функции обработки накопленных данных;
- принятие решения о необходимости сохранения полученных данных.

При зондировании атмосферных образований возникает проблема регистрации очень слабых оптических сигналов, которая решается применением чувствительных фотодетекторов – фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) – которые работают в режиме счета фотонов. Применение таких приемников позволяет зарегистрировать слабый лидарный сигнал. Однако проблема усугубляется значительными фоновыми

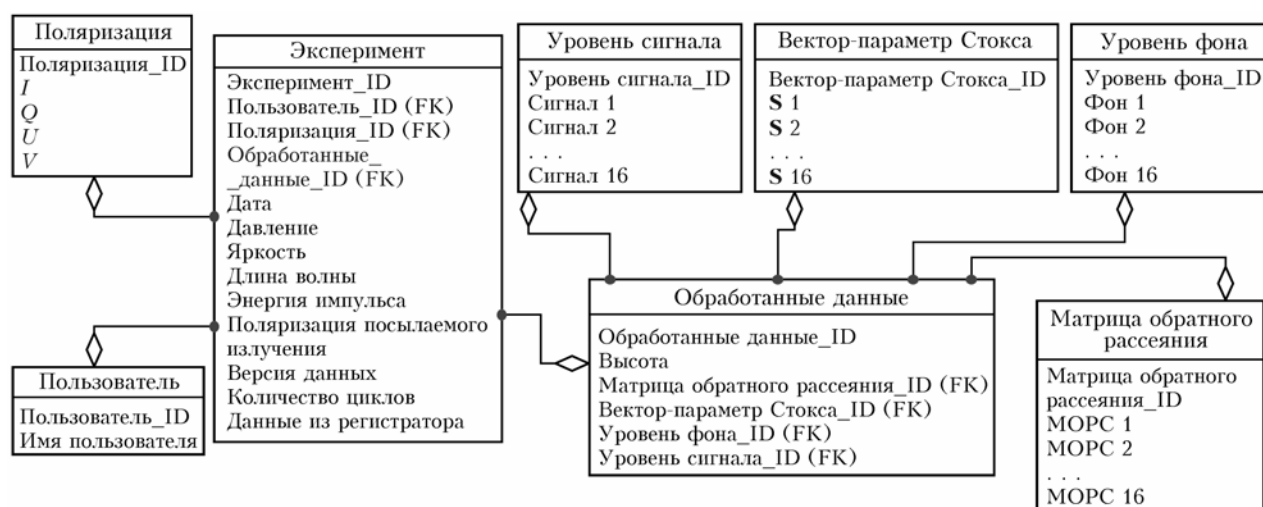


Рис. 3. Структура базы данных поляризационного лазерного зондирования

помехами, связанными как с внутренними шумами фотоприемника, так и с паразитной засветкой от внешних источников (например, Солнца).

Другой проблемой, с которой связано применение ФЭУ в режиме счета фотонов, являются просчеты системы счета фотонов. Дело в том, что сигналы с выхода ФЭУ представляют собой статистическую последовательность одноэлектронных импульсов. Интервалы времени между импульсами принимают случайные значения. Длительность одноэлектронного импульса составляет  $\Delta t = 1$  нс. Когда средняя скорость поступления импульсов приближается к величине  $1/\Delta t$ , появляется вероятность того, что интервал между соседними импульсами примет значение меньше  $\Delta t$ . Таким образом, может возникнуть ситуация, когда некоторые одноэлектронные импульсы не будут посчитаны системой счета фотонов, что приведет к некорректным экспериментальным данным.

Необходимо упомянуть еще об одном отрицательном факторе, связанном с применением ФЭУ в режиме счета фотонов, — эффекте последствия ФЭУ. Сущность явления заключается в том, что после регистрации фотона и появления на выходе ФЭУ одноэлектронного импульса в течение некоторого времени после этого есть вероятность регистрации дополнительных счетных импульсов. Этот эффект дополнен для разных типов ФЭУ и проявляется в том, что измеренный сигнал искажен пропорционально величине сигнала.

Вышеперечисленные эффекты вносят значительные погрешности при интерпретации данных лидарных экспериментов, что требует проведения предварительной обработки экспериментальных данных,

закрывающейся в корректировке лидарного сигнала на просчеты, на эффект последствия ФЭУ, а также учета уровня фона. Используемые методы коррекции лидарного сигнала позволяют повысить точность определения элементов матрицы обратного рассеяния света, а следовательно, и последующей оценки ориентации кристаллических частиц в пространстве.

Результаты экспериментов по изучению микрофизических характеристик облаков верхнего яруса на высотном поляризационном лидаре ТГУ в сентябре—октябре 2012 г. представлены ниже.

10 сентября 2012 г. проведено 16 серий измерений с 11:38 по 18:30 местного времени. В 13:06 на высоте 9–10 км начал формироваться аэрозольный слой. Вертикальная протяженность и мощность наблюдаемого слоя изменялись во время эксперимента.

В качестве примера на рис. 4 изображены 16 профилей интенсивности обратно рассеянного излучения, полученные 10 сентября в серии № 13 при накоплении по 500 импульсов лазера (продолжительность серии 14 мин), которые определяют компоненты вектор-параметра Стокса лидарного сигнала. По оси  $x$  — высота в километрах, по оси  $y$  — число фотоимпульсов, по  $z$  — 16 профилей интенсивности сигнала обратного рассеяния. Справа — пояснения к каждому профилю: матрица (столбец  $S_i$ ) характеризует состояние поляризации передатчика;  $G_i$  — приборный «вектор» приемника (матрица — строка).

Аналогичные экспериментально измеренные профили интенсивности сигналов обратного рассеяния получают постоянно в каждом сеансе зондирования. Они используются для расчета компонентов вектор-параметра Стокса, а затем для расчета 16 элементов матрицы обратного рассеяния света.

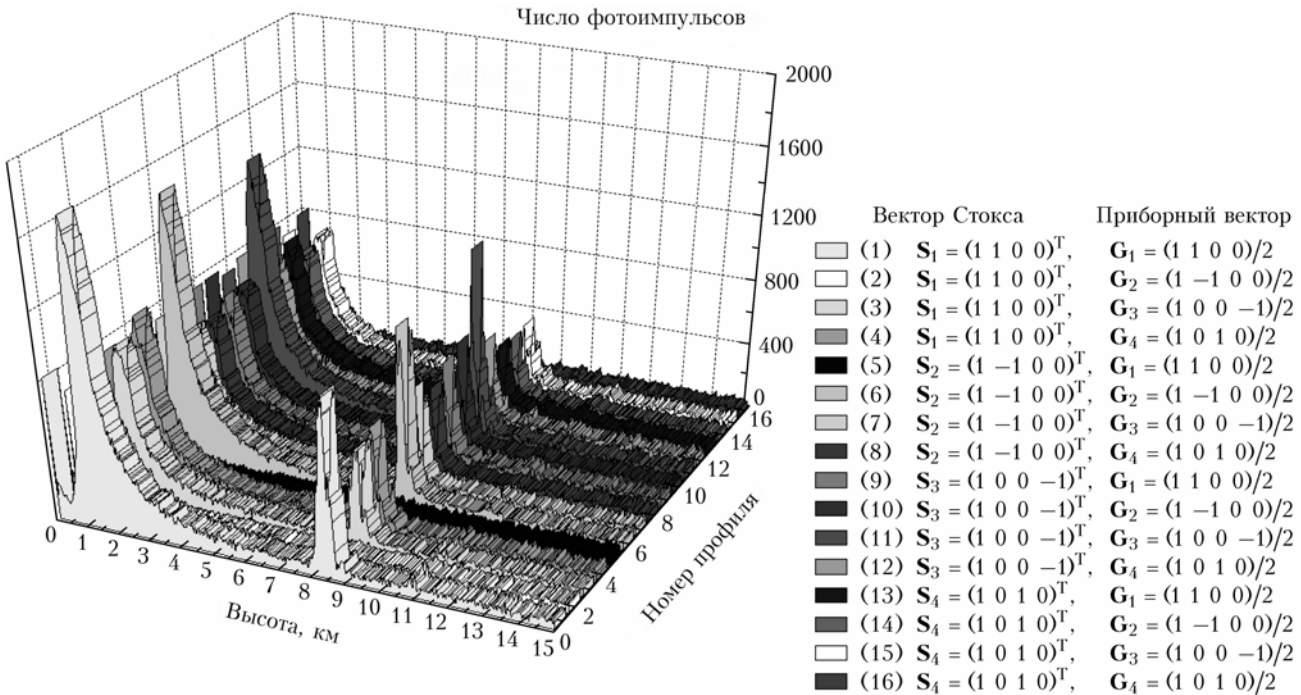


Рис. 4. Вертикальные профили интенсивности обратно рассеянного излучения. 10 сентября 2012 г. Местное время 17:26–17:32

В табл. 1 приведены результаты измерений поляризационных характеристик наблюдаемого 10 сентября облака.

11 сентября 2012 г. проведено 5 серий измерений с 15:42 по 17:51 местного времени. Все это время на высоте 8–9 и 10–11 км наблюдались облака. В табл. 2 приведены МОРС для слоев на высоте 8,7 и 10,8 км.

10 октября 2012 г. проведено три серии измерений с 16:08 до 17:34. За все время эксперимента облака верхнего яруса не наблюдались. МОРС для «чистой» атмосферы приведена в табл. 3.

Видно, что МОРС для «чистой» (фоновой) атмосферы в пределах погрешности измерений (3–5%) близка к единичной матрице – матрице молекулярно-

го (рэлеевского) рассеяния, что подтверждает достоверность разработанной методики измерения матриц.

Таким образом, разработанная система автоматизации лидарного эксперимента и автоматической обработки экспериментальных данных позволяет исключить присутствие оператора, а также подготовку лидача к проведению сеанса зондирования (тестирование готовности), получения данных с заданной точностью, их обработку и размещение в базе данных результатов поляризационного лазерного зондирования. Такая система автоматизации лидарного эксперимента дает возможность исследовать облака в режиме мониторинга и, самое главное, изучать динамические объекты в атмосфере с быстро изменяющимися характеристиками.

Таблица 1

Серия № 3, 10 сентября 2012 г. Накопление 500 импульсов лазера

Высота, км	Вектор-параметр Стокса		Степень поляризации	Нормированная на элемент $m_{11}$ матрица обратного рассеяния $M_{\pi}$
	Вектор Стокса лазерного излучения $S_i$	Нормированный вектор Стокса рассеянного излучения $S_j(I, Q, U, V)$		
8,4	$S_1 = (1 \ 1 \ 0 \ 0)$	(1 0,96 -0,06 -0,16)	0,98	$\begin{bmatrix} 1 & 0,03 & 0,07 & -0,12 \\ 0,03 & 0,94 & 0,14 & -0,07 \\ -0,07 & 0,01 & -0,83 & 0,13 \\ -0,12 & -0,04 & 0,12 & -0,72 \end{bmatrix}$
	$S_2 = (1 \ -1 \ 0 \ 0)$	(1 -0,91 -0,07 -0,07)	0,92	
	$S_3 = (1 \ 0 \ 0 \ -1)$	(1 0,10 -0,19 0,60)	0,64	
	$S_4 = (1 \ 0 \ 1 \ 0)$	(1 0,17 -0,90 0,00)	0,92	

Таблица 2

Серия № 4, 11 сентября 2012 г. Накопление 500 импульсов лазера

Высота, км	Вектор-параметр Стокса		Степень поляризации	Нормированная на элемент $m_{11}$ матрица обратного рассеяния $M_{\pi}$
	Вектор Стокса лазерного излучения $S_i$	Нормированный вектор Стокса рассеянного излучения $S_j(I, Q, U, V)$		
8,7	$S_1 = (1 \ 1 \ 0 \ 0)$	(1 0,98 0,00 -0,17)	0,99	$\begin{bmatrix} 1 & 0,00 & 0,01 & -0,10 \\ 0,00 & 0,98 & 0,37 & 0,03 \\ -0,01 & 0,01 & -0,28 & 0,08 \\ -0,10 & -0,07 & 0,36 & -0,37 \end{bmatrix}$
	$S_2 = (1 \ -1 \ 0 \ 0)$	(1 -0,98 -0,02 -0,02)	0,98	
	$S_3 = (1 \ 0 \ 0 \ -1)$	(1 -0,03 -0,10 0,27)	0,29	
	$S_4 = (1 \ 0 \ 1 \ 0)$	(1 0,37 -0,30 0,27)	0,55	
10,8	$S_1 = (1 \ 1 \ 0 \ 0)$	(1 0,92 0,06 -0,05)	0,92	$\begin{bmatrix} 1 & 0,01 & 0,09 & -0,10 \\ 0,01 & 0,91 & 0,06 & 0,16 \\ -0,09 & 0,15 & -0,67 & -0,09 \\ -0,10 & 0,05 & 0,22 & -0,88 \end{bmatrix}$
	$S_2 = (1 \ -1 \ 0 \ 0)$	(1 -0,89 -0,24 -0,15)	0,94	
	$S_3 = (1 \ 0 \ 0 \ -1)$	(1 -0,15 -0,01 0,79)	0,80	
	$S_4 = (1 \ 0 \ 1 \ 0)$	(1 0,07 -0,76 0,12)	0,77	

Таблица 3

Серия № 1, 10 октября 2012 г. Накопление 200 импульсов лазера

Высота, км	Вектор-параметр Стокса		Степень поляризации	Нормированная на элемент $m_{11}$ матрица обратного рассеяния $M_{\pi}$
	Вектор Стокса лазерного излучения $S_i$	Нормированный вектор Стокса рассеянного излучения $S_j(I, Q, U, V)$		
4,8	$S_1 = (1 \ 1 \ 0 \ 0)$	(1 0,96 0,09 -0,01)	0,97	$\begin{bmatrix} 1 & 0,00 & -0,07 & 0,00 \\ 0,00 & 0,94 & 0,06 & 0,13 \\ 0,07 & 0,03 & -0,99 & 0,05 \\ 0,00 & 0,01 & 0,12 & -0,92 \end{bmatrix}$
	$S_2 = (1 \ -1 \ 0 \ 0)$	(1 -0,91 -0,04 0,06)	0,92	
	$S_3 = (1 \ 0 \ 0 \ -1)$	(1 -0,04 0,04 0,99)	0,99	
	$S_4 = (1 \ 0 \ 1 \ 0)$	(1 0,07 -0,98 0,09)	0,98	

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ: ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (ГК № 12.518.11.7053, 14.515.11.0032), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (соглашение № 14.В37.21.0612) и РФФИ (грант № 11-05-01200а).

1. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. С. 550–551.
2. *Кауль Б.В., Самохвалов И.В.* Поляризационные лидарные измерения характеристик атмосферных аэрозолей // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Спектр, 1997. С. 34–58.

3. *Кауль Б.В., Самохвалов И.В.* Теория и результаты лазерного зондирования ориентированных кристаллических частиц в облаках // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 12. С. 1051–1057.
4. *Соковых О.В., Самохвалов И.В.* Информационная система обработки и хранения данных лазерного зондирования атмосферы // Мат-лы конф. «Лазеры. Измерения. Информация». СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. С. 320–338.
5. *Соковых О.В., Самохвалов И.В., Кауль Б.В., Волков С.Н.* Свидетельство № 2012611687, Информационная система поляризационного лазерного зондирования, 2012.
6. *Соковых О.В., Самохвалов И.В., Кауль Б.В., Волков С.Н.* Свидетельство № 2010620318, База данных лазерного поляризационного зондирования облаков верхнего яруса, 2010.

*O.V. Sokovykh, I.V. Samokhvalov.* **System integration of experimental equipment for high-altitude polarization lidar.**

This work is dedicated to the urgent issue of developing a method system of integration experimental devices and software for altitudinal polarization lidar, used in investigation of the microstructure of clouds in the upper layer. The information on characteristics of the investigated medium is contained in the lidar signal, which is a pulse of a complex form with duration of several tens of microseconds.

The heterogeneity of the software, used to manage experimental equipment, increases the time of the experiment, and the error, made by the operator. The actual task is the development of specialized software solutions for existing shortcomings of "non-automated" process of laser polarization sensing and prospects of expansion both of components and the theory of data processing.