

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.501

**Ю.С. Балин, И.В. Знаменский, В.Е. Зуев, В.Е. Мельников,  
С.В. Самойлова, А.А. Тихомиров**

### **РОССИЙСКИЙ КОСМИЧЕСКИЙ ЛИДАР «БАЛКАН»**

Приводится описание первого Российского космического одночастотного аэрозольного лидара. Лидар предназначен для исследования облачных образований и земной поверхности и будет установлен на модуле «Спектр» орбитальной станции «Мир». Лидар состоит из приемопередатчика, системы регистрации и управления.

Рассматриваются методические вопросы интерпретации данных зондирования.

#### **1. Введение**

Основным видом информации об атмосфере и подстилающей поверхности Земли, получаемой в настоящее время со спутников в оптическом диапазоне длин волн, являются фотографические и радиометрические наблюдения, проводимые с использованием средств пассивного зондирования.

Средства активного лазерного зондирования (лидары) еще не нашли должного применения в практике космического мониторинга, поскольку находятся в стадии технологических испытаний. Примером тому является первый в мире запуск аэрозольного космического лидара NASA в рамках реализации технологического эксперимента «LITE» осенью 1994 г. [1]. Активно идет подготовка российско-французского космического лидара «Алиса» [2].

В настоящей статье описывается первый российский космический лидар «Балкан», изготовленный в 1989 г. [3] и предназначенный, как и вышеупомянутые лидары, для исследования оптико-физических параметров облачных полей и поверхности Земли.

При реализации проекта мы прежде всего руководствовались необходимостью максимального использования уже накопленного опыта как в космических, так и наземных измерениях. Поэтому для ускорения сроков разработки и повышения надежности аппаратуры были использованы многие элементы уже действующих космических геодезических лазерных дальномеров.

Одно из важных в этом плане решений касалось системы обработки данных на борту спутника. В большинстве существующих наземных лидаров информация обрабатывается непосредственно в ходе проведения эксперимента с помощью входящего в состав лидара ЭВМ.

Не обладая в то время знаниями о характеристиках реальных сигналов, мы решили не осуществлять обработку данных на борту спутника. Принятый сигнал оцифровывается, и информация сбрасывается через телеметрический канал на Землю в «сыром» виде для последующего анализа и обработки. Это позволяет в значительной степени упростить систему регистрации, избежать возможных ошибок и накопить опыт для последующих разработок.

#### **2. Общее описание лидара «Балкан»**

По своему общему конструктивному принципу локатор «Балкан» представляет типичный лидарный комплекс, состоящий из следующих основных блоков: приемопередатчика, геодезического канала определения дальности, системы регистрации лидарных сигналов и пульта управления.

Лидар размещается на модуле «Спектр» – третьем модуле пилотируемой орбитальной станции «Мир». Приемопередатчик лидара крепится на кронштейне перед иллюминатором, выполненным из специального стекла диаметром 400 мм. В непосредственной близости от него расположен блок регистрации, а пульт управления установлен на рабочем месте космонавта.

Основные технические параметры лидара представлены ниже.

Длина волны излучения, нм . . . . .	532
Энергия импульса излучения, Дж . . . . .	0,20
Длительность импульса, нс . . . . .	12
Частота посылок импульсов, Гц . . . . .	0,18
Диаметр передающего коллиматора, мм . . . . .	120
Расходимость излучения лазерного передатчика, мрад . . . . .	0,15
Диаметр приемного телескопа, мм . . . . .	275
Угол поля зрения, мрад . . . . .	0,44
Ширина полосы пропускания интерференционного светофильтра, нм . . . . .	3
Квантовая эффективность ФЭУ, % . . . . .	13
Уровень световой пороговой мощности приемного тракта, Вт . . . . .	$2 \times 10^{-8}$
Ширина полосы электронного усилителя, МГц . . . . .	40
Погрешность канала точной дальности, м . . . . .	0,75
Разрядность АЦП, бит . . . . .	6
Временное разрешение АЦП, нс . . . . .	20
Потребляемая электрическая мощность, Вт . . . . .	200
Масса лидара, кг . . . . .	120

Для повышения надежности аппаратуры, как это принято в космическом приборостроении, используется «холодное» и «горячее» резервирование блоков и элементов лидара. «Холодное» резервирование охватывает блоки регистрации и излучатель лазера. В «горячем» резервировании находятся два фотоприемника канала, которые работают одновременно.

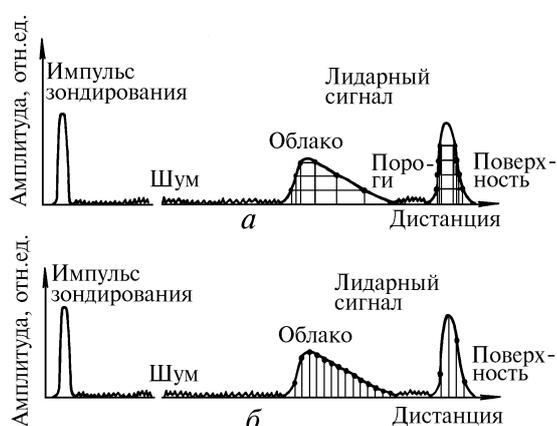


Рис. 1. Методология регистрации сигналов с использованием дальномерного (а) и лидарного (б) каналов

Рис. 1 иллюстрирует основу метода измерений сигналов, отраженных от облаков и подстилающей поверхности, с использованием двух каналов регистрации – дальномерного и лидарного, которые работают одновременно.

Дальномерный канал основан на использовании четырех различных устройств, срабатывающих, когда сигнал превышает величину минимального светового порога уровня  $2 \times 10^{-8}$  Вт, измеренную на входе фотоприемника. При этом определяется время (дальность) в момент превышения порога на переднем и заднем фронтах эхосигнала. Лидарный канал основан на использовании аналого-цифрового преобразователя, регистрирующего эхосигнал с разрешением 3 м.

Точки на принимаемых лидаром сигналах показывают местоположение снятия отсчетов амплитуд и временных интервалов при использовании двух каналов регистрации.

При использовании дальномерного канала весьма вероятны случаи (рис. 1, а), когда величина сигнала от облака может не достигать значений максимальных порогов. Тем не менее наличие дальномерного канала позволяет в определенной степени продублировать лидарный канал регистрации и, как будет показано во второй части статьи, осуществить оценку оптической плотности облаков.

### 3. Приемопередающее устройство

Общий вид приемопередатчика лидара показан на рис. 2. Слева расположен лазерный блок, в правой части рисунка – оптическая часть лидара, состоящая из коллиматора лазера и приемной телескопической системы.

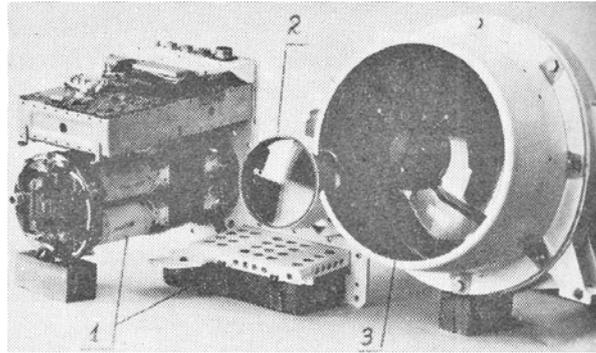


Рис. 2. Общий вид приемопередатчика лидара «Балкан»: 1 – лазеры; 2 – коллиматор; 3 – приемный телескоп

Приемопередатчик лидара выполнен в виде единой отливки, что обеспечивает поддержание параллельности оптических осей приемной и передающей оптики с погрешностью не хуже  $\pm 10$  угл.с. Взаимное крепление оптических антенн и лазера осуществляется по посадочным местам, что дает необходимую жесткость системе.

Оптическая схема приемопередатчика лидара изображена на рис. 3.

Передающая антенна, состоящая из трехлинзового объектива и двухлинзового окуляра, представляет телескоп Галилея, который обеспечивает существенное уменьшение расходимости лазерного излучения. Применение просветления объективов обеспечивает коэффициент пропускания на передачу не менее 0,87.

В приемной оптической антенне используется зеркально-линзовый телескоп по схеме Манжена, при этом отражающие покрытия нанесены на внешние поверхности зеркала. Такая система позволяет в значительной степени сократить продольный габарит телескопа. Коэффициент экранирования вторичного зеркала не превышает 0,3. Просветление оптических деталей и зеркальные покрытия обеспечивают коэффициент пропускания приемной системы на длине волн 532 нм не менее 0,7. В фокальной плоскости установлена полевая диафрагма, обеспечивающая поле зрения на прием, равное  $90 \pm 5$  угл.с. Для формирования диаметра выходного зрачка, равного 8 мм, используется линза Фабри. Расходимость светового луча на ее выходе не более  $3^\circ$ .

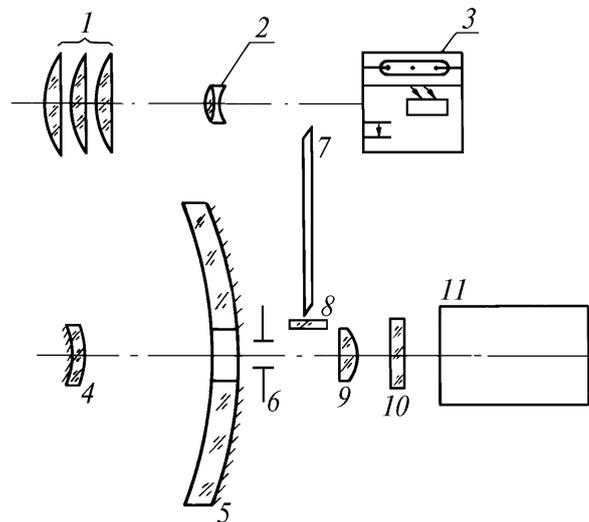


Рис. 3. Оптическая схема лидара «Балкан»: 1 и 2 – коллиматор; 3 – лазер; 4 и 5 – приемный телескоп; 6 – полевая диафрагма; 7 – световод; 8 – светофильтр; 9 – линза Фабри; 10 – интерференционный фильтр; 11 – фотодетектор

Часть лазерного излучения, рассеянного передней поверхностью окуляра 2, через световод 7 подается в приемную систему. Для отсекаания основной гармоники лазерного излучения используется светофильтр 8 из стекла СЗС-23. Эта часть лазерного излучения после преобразования

зования в блоке 11 в электрический сигнал используется в дальнейшем в качестве стартового импульса при обработке лидарного сигнала.

### 3.1. Лазерный передатчик

В лидаре используется лазер на ИАГ с удвоителем частоты. Для повышения надежности и увеличения ресурса работы лидара применяются два передающих канала – основной и резервный. Совмещение направлений излучения основного и резервного излучателей лазера осуществляется с помощью призм сведения и коммутации. Переключение излучателей лазера с основного на резервный производится автоматически при отсутствии двух излучений подряд, которые фиксируются с помощью датчика наличия генерации или по команде с пульта управления. Переключение лазера с резервного канала на основной производится только по команде с пульта управления.

Основной и резервный каналы излучателя идентичны, и каждый включает в себя задающий генератор, два однопроходных усилителя, удвоитель частоты. На рис. 4 приведена оптическая схема одного из излучателей.

В задающий генератор входят резонатор, электрооптический затвор, активный элемент с осветителем. Резонатор образован зеркалом с 100%-м коэффициентом отражения и сапфировой пластиной с коэффициентом отражения около 16%. Электрооптический затвор осуществляет режим модулированной добротности. Активный элемент – кристалл ИАГ с примесью неодима цилиндрической формы размером 6,3×65 мм. В осветителе используется светофильтр, отсекающий ультрафиолетовый участок спектра излучения лампы. Усилители отличаются от задающего генератора только отсутствием резонатора и затвора. Удвоитель частоты преобразует проходящее через него инфракрасное излучение с энергией порядка 0,5 Дж в видимое с коэффициентом преобразования около 50%. Используется нелинейный элемент – герметизированный кристалл СДА размером 10×10×40 мм, заключенный в термостат, температура в котором поддерживается с точностью до 0,1 К. Четвертьволновые пластины 11 и 13 совместно с плоскопараллельными пластинами 9, установленными под углом Брюстера, служат для подавления свободной генерации в лазере. Фильтр 15 отсекает излучение основной гармоники лазера, а поворотная призма 10 используется для сокращения продольного размера лазера. Призма сведения 16 позволяет направить выходящее излучение по оптической оси выходного зрачка лазера. Плотная упаковка лазерного блока и отсутствие водяного охлаждения ограничивают период посылок зондирующих импульсов величиной не менее 5,6 с. При этом число посылок в серии не более 80 с последующим перерывом 30 мин.

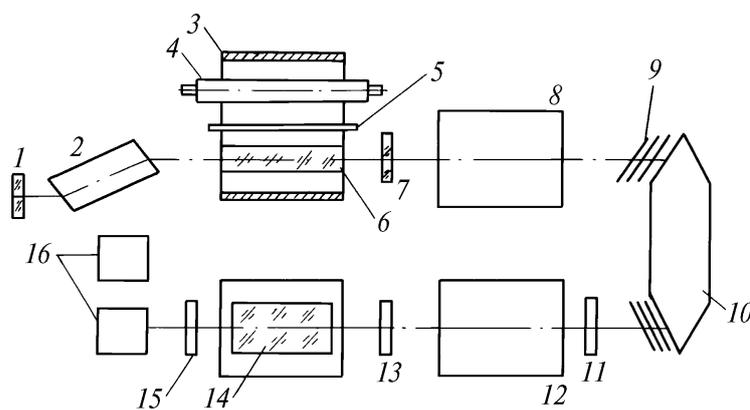


Рис. 4. Оптическая схема лазерного излучателя: 1 – 100% отражающее зеркало; 2 – электрооптический затвор; 3 – отражатель; 4 – лампа накачки; 5 – фильтр; 6 – активный элемент; 7 – сапфировая пластина; 8 и 12 – оптические усилители; 9 – пластины; 10 – поворотная призма; 11 и 13 – оптические четвертьволновые пластины; 14 – удвоитель частоты; 15 – фильтр; 16 – призмы сведения излучения

### 3.2. Фотоприемный блок

Общая блок-схема фотоприемного блока лидара показана на рис. 5. За основу оптического детектора был взят фотоэлектронный умножитель типа ФЭУ-84, имеющий хорошую кван-

товую эффективность в видимой области спектра длин волн. С целью повышения надежности регистрации лидарных сигналов в фотоприемном блоке одновременно работают два фотоумножителя, на торцах которых для повышения эффективности регистрации световых потоков укреплены призмы полного внутреннего отражения. Интерференционный фильтр крепится непосредственно на корпусе фотоприемного блока с помощью специального клинового устройства, обеспечивающего пропускание фильтра на длину волны 532 нм. После фотоэлектрического преобразования лидарные сигналы усиливаются и поступают на формирователи-сумматоры, причем для повышения надежности системы сигналы на каждый сумматор поступают с обоих фотоумножителей.

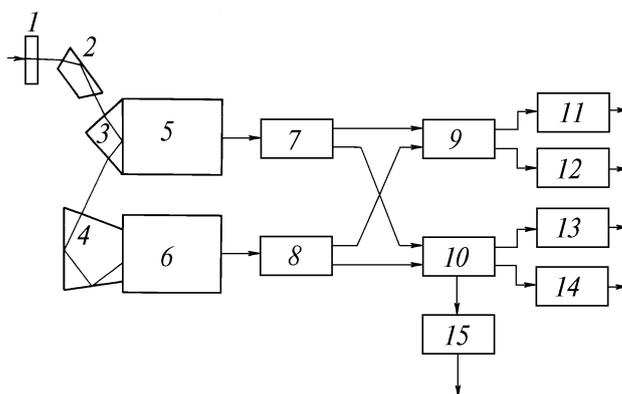


Рис. 5. Блок-схема фотоприемного блока: 1 – интерференционный светофильтр; 2 – поворотная призма; 3 и 4 – призмы полного внутреннего отражения; 5 и 6 – ФЭУ; 7 и 8 – транзисторные усилители; 9 и 10 – сумматоры; 11–14 – пороговые устройства; 15 – эмиттерный повторитель

При работе дальномерного канала системы регистрации применена нелинейная цифровая фильтрация сигналов на основе селекции длительности отраженных импульсов. На выходе каждого сумматора установлено два пороговых устройства с различными уровнями порогов по световой мощности, наименьшая величина которого составляет  $2 \times 10^{-8}$  Вт. В дальнейшем сигналы с пороговых устройств поступают для обработки в канал измерения дальности до объекта.

Одновременно с выхода сумматора сигнал через эмиттерный повторитель направляется на аналого-цифровой преобразователь канала регистрации лидарных сигналов. Этот канал имеет два режима работы – «дневной» и «ночной».

В «ночном» режиме коэффициент усиления фотоприемника увеличивается по сравнению с «дневным» на 15 дБ за счет увеличения напряжения питания фотоумножителя.

В конечном итоге это позволит провести исследования чувствительности лидарной системы при зондировании различных объектов, в том числе при изменении фоновой составляющей сигнала.

#### 4. Система регистрации лидара

Система регистрации лидарных сигналов, как уже упоминалось выше, состоит из двух независимых каналов – дальнометрического (амплитуда–дальность) и лидарного (дальность–амплитуда).

Дальнометрический канал обеспечивает определение дальности до зондируемого объекта за счет измерения временного интервала между зондирующим импульсом и отраженным сигналом, достигающим уровня заданного порогового значения. Поскольку сигнал достигает порога на переднем и заднем фронтах, то таким образом можно фиксировать также его длительность на различных амплитудных уровнях (см. рис. 1). В идеальном случае, когда величина эхосигнала превышает величину максимального порога, формируется совокупность четырех пар значений амплитуда–дальность, из анализа которых, как будет показано ниже, можно делать оценки оптических параметров облака.

Эта информация в специпроцессоре канала преобразуется в цифровой двоичный код, соответствующий точной дальности до зондируемого объекта.

Лидарная система регистрации основана на измерении амплитуд сигнала в фиксированные моменты времени, отсчитываемые с момента посылки импульса излучения. Для этого используется шестизарядный аналого-цифровой преобразователь с временным дискретом оцифровки сигнала, равным 20 нс. Амплитудная выборка сигнала записывается в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), где одновременно фиксируются данные о паспорте выстрела. Эта информация поступает в виде 22-разрядного двоичного кода о времени зондирования (сутки, часы, минуты, секунды), а также 18-разрядного двоичного кода о номере цикла зондирования. Кроме того, в паспорт выстрела входит информация о дальности до лоцируемого объекта.

Вся эта совокупность данных формируется в ОЗУ в одну информационную строку длиной 31 байт, структура которой показана на рис. 6. Если длительность лидарного сигнала превышает 560 нс, информация об остальной части сигнала записывается в следующей информационной строке с теми же паспортными данными. После записи восьми информационных строк содержание ОЗУ автоматически переписывается в буферное запоминающее устройство (БЗУ). Передача накопленной информации из БЗУ в телеметрическую систему станции «Мир» производится по команде бортового вычислительного комплекса.



Рис. 6. Формат информационной строки

Расшифровка и обработка научной и служебной телеметрической информации осуществляется в Центре управления полетом.

## 5. Пульт управления и наземный комплекс аппаратуры

Пульт управления обеспечивает управление и контроль функционирования всех составляющих частей лидара, в том числе автоматический учет номеров циклов измерений. Кроме того, пульт управления обеспечивает прием и распределение команд управления от бортовых систем орбитальной станции.

Управление лидара – полуавтоматическое, а выбор режима работы определяется космонавтом-оператором в зависимости от задач реализуемого космического эксперимента. Зондирование может производиться как одночастотными импульсами, так и их серий. Помимо того, в аппаратуре предусмотрена возможность дистанционного включения лидара, что позволяет рассматривать возможность его установки на борт беспилотного космического носителя.

В момент включения аппаратуры в течение 40 мин производятся прогрев термостабилизирующих блоков лидара и самоконтроль их функционирования. Эта служебная информация поступает на блок индикации пульта управления и по телеметрической системе сбрасывается в Центр управления полетами.

После окончания сеанса зондирования производится выключение блоков лидара. Снятие напряжения питания с системы регистрации лидарного сигнала заблокировано до момента окончания сброса информации в телеметрический комплекс станции.

Наземный комплекс аппаратуры предназначен для проведения контрольно-поверочных измерений электрических и оптических параметров лидара при работе в автономном режиме и в составе приборов модуля станции «Мир». В состав комплекса входят электрические и оптические имитаторы лидарных сигналов, оптическая аппаратура по юстировке и проверке характеристик приемопередатчика, аппаратура по тестированию электрических параметров лидара и его составных частей.

С помощью данного комплекса были проведены климатические, механические и акустические испытания лидара, включая испытания по воздействию электромагнитных помех.

Для этих целей были также изготовлены габаритно-массовый, технологический и тренажерный пакеты лидара «Балкан».

## 6. Интерпретация данных зондирования

Для указанных выше параметров лидара были проведены модельные расчеты мощности лидарных сигналов от различных типов облачных образований. Как показали модельные оценки, мощность лидарного сигнала в основном определяется двумя параметрами облака – коэффициентом рассеяния и его высотным градиентом в верхней кромке облака. Поэтому сигналы от облаков с малым оптическим градиентом могут быть ниже порогового уровня чувствительности лидара и не фиксироваться его регистрирующей аппаратурой.

Другая проблема, на которую следует обратить внимание при разработке алгоритмов обработки, заключается в малом количестве отсчетов амплитуд сигнала вследствие специфики проводимых измерений.

### 6.1. Методика обработки сигналов

При разработке алгоритмов обработки лидарных сигналов был проведен анализ имеющегося экспериментального материала, полученного при локации подстилающей поверхности и облачных полей с использованием дальномерного канала, т.е. при регистрации сигнала в пороговом режиме.

Часть этого экспериментального материала, представленная в виде сигналов от облачных образований, водной и степной поверхностей, показана на рис. 7. По оси абсцисс указаны моменты времени достижения сигналом первого порогового уровня на переднем и заднем фронтах. По оси ординат, в относительных единицах, отложены значения уровней пороговой мощности.

Как видно из рис. 7, сигналы от облаков и подстилающей твердой поверхности (степь) отличаются между собой как по форме, так и по интенсивности. Промежуточное положение между ними занимает водная поверхность. Из анализа всего материала выяснилось, что в большинстве случаев (90%) сигналы от облаков не достигают величины максимального четвертого порога, а их длительность на минимальном уровне составляет 15÷30 м.

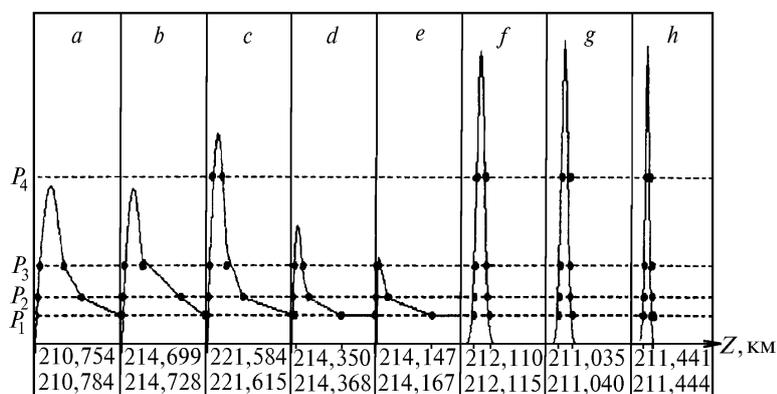


Рис. 7. Профили лидарных сигналов от облаков (*a–c*), водной (*d–e*) и степной (*f–h*) поверхностей. Точками на кривых показаны амплитуды сигналов, зафиксированные дальномерным каналом

При реализуемом в лидаре пространственном разрешении 3 м, это может привести к малому количеству отсчетов, что предъявляет специфические требования к алгоритмам обработки.

Общая схема обработки лидарных сигналов включает в себя выполнение трех последовательных этапов. *Фильтрация* – выделение сигнала на фоне помех и устранение аппаратурных искажений. *Классификация* – распознавание типа зондируемых объектов (облако, подстилающая поверхность). Третий этап заключается непосредственно в *обработке* лидарных сигналов для оценки оптико-физических параметров и подстилающей поверхности.

**Фильтрация.** Этот этап обработки лидарных сигналов наиболее универсален, требует минимума априорной информации о физическом состоянии объекта, легко автоматизируем. Его необходимость обусловлена, во-первых, стремлением уменьшить влияние случайных помех фонового и аппаратурного происхождения, во-вторых, устранить аппаратурные искажения лидарного сигнала, обусловленные его уширением. Дело в том, что из-за специфики эксперимента лидарные сигналы обладают весьма малой длительностью, особенно при лоцировании поверхности, сопоставимой с длительностью зондирующего импульса. В то же время из-за ограниченной полосы приемного сигнала это приводит к уменьшению лидарного сигнала и искажению его временной структуры.

Иллюстрацией сказанному являются данные табл. 1, в которой показано изменение длительности лидарных сигналов, изображенных на рис. 7.

В табл. 1 параметр  $d_0$  соответствует длительности восстановленного сигнала (на уровне  $P = P_2$ ) при полосе пропускания 10 МГц и длительности зондирующего импульса 10 нс. Восстановление осуществлялось с использованием алгоритмов обратной фильтрации, описанных в [4].

**Классификация.** Этот этап необходим потому, что интерпретация данных бортового лидара без привлечения априорной информации может оказаться неоднозначной. В силу высокой изменчивости оптических свойств системы «атмосфера–подстилающая поверхность» существует определенная вероятность принятия ложного решения о типе рассеивающего объекта.

Для построения алгоритмов классификации необходимо выбрать минимальное количество существенных информационных параметров сигнала и обеспечить их максимальную независимость. Многие параметры сигнала, такие как крутизна нарастания фронтов, длительность, амплитуда в максимуме и т.д., являются взаимосвязанными. Как было показано в [5], для обеспечения классификации можно ограничиться следующими характеристиками сигнала — дальность до зондируемого объекта  $z_0$ , длительность переднего фронта  $\Delta z$  и его интегральное значение. Последняя характеристика пропорциональна коэффициенту отражения поверхности или индикатрисе рассеяния назад при зондировании облака. Перечисленные характеристики содержат практически всю информацию о типе зондируемого объекта, которую удастся получить при одночастотном зондировании, анализируя энергетические параметры сигнала.

Таблица 1

**Влияние ограниченности полосы пропускания приемного тракта на длительность лидарных сигналов**

Сигнал	$d$ , км	$d_0$ , км	$d/d_0$
<i>a</i>	0,008625	0,008517	1,01
<i>b</i>	0,008625	0,008176	1,05
<i>c</i>	0,005625	0,005298	1,06
<i>d</i>	0,004125	0,003542	1,16
<i>e</i>	0,006000	0,004240	1,41
<i>f</i>	0,003375	0,002718	1,24
<i>g</i>	0,002625	0,001903	1,38
<i>h</i>	0,001875	0,000999	1,88

**Оценивание параметров.** Выбранные выше характеристики несут информацию о физическом состоянии объекта исследований, поэтому их значение в отдельности представляет самостоятельный интерес. В частности, по дальности регистрируется высота верхней границы облаков и решаются геодезические задачи. Интегральное значение сигнала характеризует оптическое состояние объекта. Третий параметр – длительность переднего фронта – зависит от характера изменения коэффициента рассеяния  $\sigma(z)$  в верхней кромке облака.

В предположении линейного нарастания  $\sigma(z)$  третий параметр однозначно связан с градиентом:

$$\frac{d\sigma}{dz} = \frac{1}{2 \Delta z^2} = \ln \left( \frac{z_2 - z_0}{z_1 - z_0} \right) [(z_2 - z_0)^2 - (z_1 - z_0)^2]^{-1}. \quad (1)$$

Устойчивую оценку градиента можно получить по методу наименьших квадратов:

$$\hat{\frac{d\sigma}{dz}} = \int_{z_1}^{z_2} \ln \frac{(z-z_0)S(z_m)}{(z_m-z_0)S(z)} [(z-z_0)^2 - (z_m-z_0)^2] dz \left\{ \int_{z_1}^{z_2} [(z-z_0)^2 - (z_m-z_0)^2]^2 \right\}^{-1}. \quad (2)$$

Здесь  $S(z_m)$  – максимальная амплитуда сигнала на расстоянии  $z_m$ ;  $z_1$  и  $z_2$  – дистанции, на которых зафиксированы уровни равной амплитуды соответственно на переднем и заднем фронтах сигнала.

Из представленных уравнений можно оценить  $z_0$ , что целесообразно осуществлять при высоком уровне шумов. Как показали модельные расчеты, наибольшая погрешность восстановления наблюдается при использовании длительности заднего фронта сигнала. Учитывая, что эта часть лидарного сигнала является также наиболее искаженной за счет помехи многократного рассеяния, можно дать рекомендации об использовании при интерпретации данных зондирования в основном передней части импульса.

Таблица 2

Результаты обработки сигналов от облаков

Параметр	Сигнал		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
$z_0$ , км	210,7539	214,6991	221,5641
$z_1 - z_0$ , км	0,0016	0,0007	0,0015
$\bar{\sigma}(z_1)$ , км <sup>-1</sup>	19,29	19,02	42,34
$\tau(z_1)$	0,0325	0,0143	0,0648
$z_3 - z_0$ , км	0,0065	0,0049	0,0042
$\bar{\sigma}(z_3)$ , км <sup>-1</sup>	64,30	88,73	100,38
$\tau(z_3)$	0,422	0,432	0,417
$z_2 - z_0$ , км	0,0099	0,0071	0,0049
$\bar{\sigma}(z_2)$ , км <sup>-1</sup>	95,54	126,77	116,99
$\tau(z_2)$	0,949	0,903	0,574

Разработанные алгоритмы оценивания оптических параметров облаков были апробированы при обработке реальных сигналов (рис. 7).

Результаты расчетов представлены в табл. 2, в которой показано расстояние до облака  $z_0$ , средние значения  $\bar{\sigma}$  и соответствующие значения оптической толщи  $\tau(z_i)$  для трех дистанций  $z_i$ . Расстояния  $z_1$  и  $z_2$  соответствуют моментам времени, в которые сигнал равен максимальному пороговому уровню ( $P_3$  для случаев *a*, *b*;  $P_4 - c$ ). Расстояние  $z_3$  соответствует проникновению излучения в облако до оптической толщи  $\tau \sim 0,4$ .

Как видно из табл. 2, наименьшую степень достоверности вызывают результаты, использующие информацию о заднем фронте импульса, о чем уже упоминалось выше.

В то же время средние значения  $\bar{\sigma}$  находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными для плотных облаков [6].

Полученные значения  $\bar{\sigma}$  могут в дальнейшем использоваться для восстановления профиля коэффициента рассеяния с помощью уже известных алгоритмов [7].

## 6.2. Численный эксперимент

Для исследования информативности лазерного зондирования объектов из космоса был проведен численный эксперимент, который проводился методом статистических испытаний. Моделировались серии случайных реализаций параметров среды (для каждого типа образований), затем рассчитывались соответствующие реализации лидарных сигналов, по которым вычислялись информативные параметры и проводилась классификация. Использовался бейсовский классификатор. Распределения основных параметров задавались нормальными и соответствующими среднему коэффициенту отражения 0,1 – для воды; 0,2 – для облака; 0,5 – для льда. Использовались однородная модель водной толщи, модель слоистой облачности со средней мощностью 0,5 км [6]. Среднее расстояние до зондируемого объекта равнялось 300 км со стандартным отклонением 300 м (в случае воды и льда) и 295 км со стандартным отклонением 5 км (для облака). Коэффициенты вариации остальных перечисленных параметров полагались равными 50%. Априорные вероятности гипотез предполагались равными.

В табл. 3 приведены в процентах ошибки распознавания ледовой, водной и облачной поверхностей при использовании в качестве информативных параметров:

- а) только коэффициента отражения (что примерно соответствует распознаванию по яркости на космических фотоснимках при нахождении Солнца в зените);
- б) коэффициента отражения и длительности переднего фронта отраженного импульса;
- в) перечисленных параметров и длительности до зондируемого объекта.

Как видно из табл. 3, использование лидара с присущей ему трехмерностью получаемых данных, благодаря селекции объектов по дальности, позволяет значительно повысить достоверность распознавания типов природных образований. Это в совокупности с существующими радиометрическими пассивными методами в достаточной степени расширяет возможности современных радиационных измерений.

Лидар «Балкан», о котором сообщалось в этой статье, является результатом совместной деятельности четырех организаций: Института оптики атмосферы СО РАН, КТИ «Оптика» СО РАН, Института космического приборостроения и РКК «Энергия». Нам бы хотелось поблагодарить всех специалистов этих организаций, принявших участие в реализации данного проекта.

Т а б л и ц а 3

Погрешности распознавания образования по данным зондирования

Тип объекта	Информативные параметры		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>v</i>
Лед	32	1	1
Вода	45	31	21
Облако	73	33	3

Особую признательность хотелось бы выразить И.В. Самохвалову, В.В. Буркову, В.С. Ильичевскому, В.С. Шаманаеву, В.И. Ефимкину и Ю.Н. Грачеву, принимавшим постоянное и активное участие в разработках.

1. McCormic M.P., Winter D.M., Browell E.V. et al. // Bulletin American Meteorol. Society. 1993. V. 74. N 2. P. 205–214.
2. Международный целевой комплексный проект «Природа». Научная программа экспериментов. М.: ИРЭ РАН, 1993. 62 с.
3. Balin Yu.S., Burkov V.V., Znamenskii I.V. et al. // 15th Inter. Laser Radar. Conf. Abstracts. Tomsk. 1990. V. 1. P. 12–14.
4. Кавкянов С.И., Стрелетова С.В. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 6. С. 50–56.
5. Балин Ю.С., Кавкянов С.И., Креков Г.М. и др. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 1. С. 93–99.
6. Радиация в облачной атмосфере / Под ред. Е.М. Фейгельсон. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 280 с.
7. Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 186 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
29 января 1995 г.

Ju.S. Balin, I.V. Znamenskii, V.E. Zuev, V.E. Mel'nikov, S.V. Samoilova, A.A. Tikhomirov. **Russian Space Lidar «Balkan».**

Description of the first Russian space one-frequency aerosol lidar is presented in the paper. The lidar is designed for investigation of clouds and Earth's surface and is planned to be mounted inside module «Spectr» of the orbital station «Mir». It consists of receiver-transmitter as well as recording and controlling systems. Some aspects of the sounding data interpretation are also treated.