

УДК 551.501: 535.818

## Лазерное зондирование Земли из космоса.

### I. Российский лидар космического базирования БАЛКАН

В. Е. Зуев<sup>1</sup>, Ю. С. Балин<sup>1</sup>, А. А. Тихомиров<sup>2</sup>,  
И. В. Знаменский<sup>3</sup>, В. Е. Мельников<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт оптики атмосферы СВ РАН, Томск, Росія

<sup>2</sup> Конструкторсько-технологічний інститут «Оптика» СВ РАН, Томск, Росія

<sup>3</sup> Російський НДІ космічного приладобудування, РКА, Москва, Росія

<sup>4</sup> Російська космічна корпорація «Енергія», РКА, Корольов, Московська область, Росія

*Надійшла до редакції 24.02.97*

---

Приведено опис першого російського космічного одночастотного аерозольного лідара БАЛКАН, призначеного для дослідження хмарних утворень і підстилаючої поверхні Землі з борту орбітальної станції «Мир». Подається порівняння його характеристик з американським лідаром LITE та російсько-французьким лідаром ALISSA.

---

#### ВВЕДЕНИЕ

Наблюдение за атмосферой Земли с помощью приборов, установленных на спутниках, позволяет оперативно в глобальном масштабе исследовать ее состояние для формирования прогнозов погоды (Кондратьев, Тимофеев, 1978; Герман, 1985). При этом основными видами получаемой информации являются фотометрические и радиометрические изображения, поскольку первоначально развитие техники космического дистанционного зондирования было сфокусировано на пассивных системах видимого, ИК- и СВЧ-диапазонов (Кренкелл, 1984; Лазарев и др., 1987).

Дистанционное зондирование на основе лазерных лидаторов (лидаров) обеспечивает новые уникальные возможности, недоступные пассивным и активным радиолокационным системам, в получении более полных и детальных сведений о различных

характеристиках атмосферы (Захаров, 1988; Зуев В. Е., Зуев В. В., 1992; Curran, 1989). Наиболее очевидное преимущество — рекордное увеличение пространственного разрешения благодаря малым длительностям лазерных импульсов.

Первый проект космической лидарной станции был представлен специалистами NASA в серии докладов (Abstracts. Conf., 1979). Затем опубликованы более детальные проекты (Russel et al, 1982; Curran, 1989). С 1994 г. в рамках Европейского симпозиума «Satellite and Remote Sensing» ежегодно проходит конференция «Lidar Techniques for Remote Sensing» (Proc. SPIE 2310, 2581). Первый лидар NASA выведен на орбиту в сентябре 1994 г. для выполнения экспериментов по программе LITE (McCormick et al, 1993). Эксперимент в основном преследовал технологические цели, связанные с проверкой параметров лидара, отработкой программ взаимодействия с подспутниковыми средст-

вами наблюдений и обработки получаемой информации (Winker, McCormick, 1995).

В апреле 1996 г. в составе модуля «Природа» выведен на орбиту российско-французский лидар ALISSA (Захаров, 1988; Chazette et al, 1990). Планируется запустить в составе международной космической станции «Альфа» германский доплеровский лидар ALADIN для зондирования ветровых полей (Werner et al, 1995).

В данной статье приводится история создания, описание принципов действия и технические характеристики первого российского космического лидара БАЛКАН (Balin et al, 1990, 1994, 1995; Балин и др., 1995, 1996), разработанного и изготовленного в Конструкторско-технологическом институте (КТИ) «Оптика» Сибирского отделения РАН (до 1992 г. — Специальное конструкторское бюро научного приборостроения «Оптика» СО РАН) совместно с Институтом оптики атмосферы (ИОА) СО РАН и РНИИ космического приборостроения (РНИИ КП) по техническому заданию РКК «Энергия».

#### НАЗНАЧЕНИЕ

Лидар БАЛКАН, установленный на пилотируемой станции «Мир», предназначен для проведения следующих космических экспериментов: определение потенциальных возможностей лазерного зондирования плотных аэрозольных образований с борта станции и уточнение характеристик лидара в процессе его работы; измерение высоты верхней границы и оптико-физических параметров облачных образований; определение возможности селекции различных видов облачности на фоне подстилающей поверхности (ПП); определение коэффициента обратного отражения ПП (различные участки суши и океана) при разных углах зондирования; обнаружение и измерение параметров аэрозольных выбросов в атмосферу при экологических катастрофах; зондирование верхнего слоя океана; уточнение параметров орбиты станции методом лазерной локации.

Полученные результаты найдут применение в климатологии, экологическом региональном и глобальном мониторинге атмосферы, метеообеспечении авиации дальнего действия, космической навигации, а проводимые эксперименты обеспечат необходимый материал для методологической подготовки последующих проектов по новым космическим лидарам и экспериментам по лазерному дистанционному зондированию (Matvienko et al, 1994; Зуев и др., 1995).

#### КРАТКАЯ ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ЛИДАРА БАЛКАН

Первые работы по проекту космического лидара были начаты в ИОА в 1975 г. При участии КТИ «Оптика» по заданию РКК «Энергия» были разработаны технические предложения по возможным вариантам создания приемопередающего устройства космического лидара и систем регистрации лидарных сигналов. Однако недостаточный уровень развития отечественной техники в области надежных малогабаритных лазеров и быстродействующих аналого-цифровых преобразователей не позволил в то время реализовать проект.

Повторно работы возобновились в конце 1984 г., когда планировалась установка новой научной аппаратуры на модули орбитальной станции «Мир» и корабль многоцветного использования «Буран». Разработка технической документации и изготовление лидара проводились в КТИ «Оптика» в течение 1986—1989 гг. с отработкой всех необходимых стадий выполнения космических ОКР. При этом максимально использовался как собственный опыт, накопленный при создании наземных и самолетных лидаров (Кабанов, Тихомиров, 1997), так и опыт космических фирм СССР.

Для ускорения сроков и повышения надежности применен ряд блоков уже действующих космических геодезических лазерных дальномеров. Было принято решение установить лидар на третий модуль станции «Мир», который в последствии стал именоваться «Спектр». Лидар получил название БАЛКАН (бортовой аэрозольный лидар, космический, Академии наук).

Для отработки схемных и конструкторских решений было изготовлено несколько вариантов макетов и опытных образцов лидара, включая габаритно-массовый макет и технологический образец, и проведено требуемое количество различных видов испытаний. Изготовлен и передан в Центр подготовки космонавтов тренажерный макет лидара. В конце 1989 г. на завод, где происходила сборка орбитального модуля, переданы штатный и запасной образцы лидара, а также два комплекта контрольно-поверочной аппаратуры. Приемопередатчик лидара был изготовлен в РНИИ КП. В 1990 г. после завершения всех наземных испытаний лидар установлен на модуле. Впервые о созданном лидаре БАЛКАН сообщалось в докладе Balin et al. (1990).

В 1992 г. модуль был законсервирован, и только в 1994 г. в соответствии с российско-американским соглашением «Черномырдин—Гор» возобновились работы по подготовке к запуску двух оставшихся на Земле модулей «Спектр» и «Природа». Было решено продолжить работы по лазерному зондиро-

ванию Земли из космоса. В связи с этим дополнительно проведен соответствующий цикл испытаний лидара для продления сроков его гарантии. В мае 1995 г. лидар выведен на орбиту. Первая серия сеансов экспериментов выполнена в августе–сентябре 1995 г. космическими экспедициями ЭО-19 и ЭО-20, вторая — в феврале–апреле 1996 г. экспедициями ЭО-20 и ЭО-21.

#### ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И СОСТАВ ЛИДАРА

Действие лидара, как и любого лазерного локатора, основано на послыке в атмосферу Земли коротких лазерных импульсов и приеме рассеянных обратно сигналов. Лазерные импульсы, доходя до плотных облачных образований или ПП Земли, рассеивают часть своей энергии в обратном направлении. Это рассеянное излучение собирается на приемной системе лидара и поступает на фотодетектор, где преобразуется в электрические сигналы. Форма импульса принятого сигнала несет информацию о свойствах рассеивающего объекта (Захаров, 1988; Зуев В. Е., Зуев В. В., 1992).

Существенным отличием космического лидара от обычного (наземного или самолетного) является диапазон его действия по дальности и уровень принимаемых сигналов. Из-за большого удаления зондируемых объектов (250÷400 км) принимаемый эхосигнал от облаков или ПП Земли поступает с задержкой в 1.7÷2.7 мс и ослаблен более чем в  $10^4$  раз, ослабленным по сравнению с сигналом, по-

лучаемым в самолетном или наземном лидаре с такими же параметрами. В связи с этим в значительной степени возрастают требования к энергетическому потенциалу лидара — энергии излучаемого лазерного импульса, диаметру приемной антенны и чувствительности фоторегистрирующего тракта. Это требует увеличения массо-габаритных характеристик лидара и потребляемой им мощности, которые ограничиваются возможностями со стороны борта станции. Поиск компромиссных вариантов и являлся одной из основных задач при проектировании космического лидара.

Поскольку основной целью разрабатываемого лидара являлось зондирование плотных облачных полей и ПП Земли, принято целесообразным использовать фотодетектор, работающий в аналоговом режиме. Это также связано с малой частотой посылок зондирующих импульсов, которые обеспечивал бортовой образец космического лазера. Габариты оптических антенн приемопередающего устройства лидара ограничивались диаметром иллюминатора модуля (420 мм).

Одно из важных решений касалось системы обработки данных на борту станции. В современных наземных лидарах информация обрабатывается непосредственно в ходе проведения эксперимента с помощью входящей в состав лидара ЭВМ (Балин, Разенков, 1993). Не обладая во время проектирования знаниями о характеристиках реальных сигналов, мы приняли решение, что впоследствии оказалось правильным, решение не осуществлять обработку лидарных сигналов в бортовой ЭВМ. После

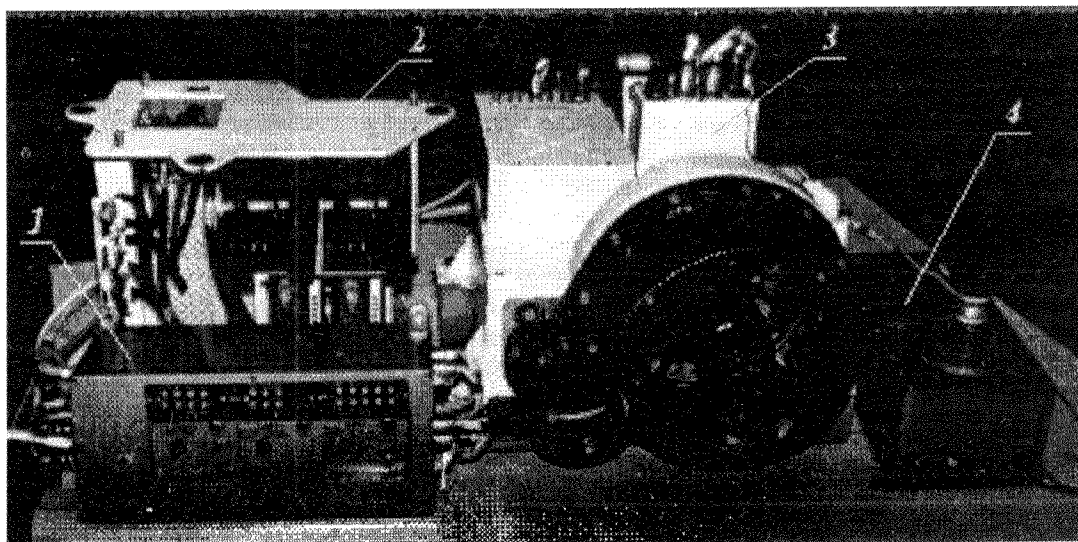


Рис. 1. Общий вид лидара БАЛКАН: 1 — пульт управления; 2 — блок регистрации точной дальности; 3 — приемопередатчик; 4 — блок регистрации лидарных сигналов

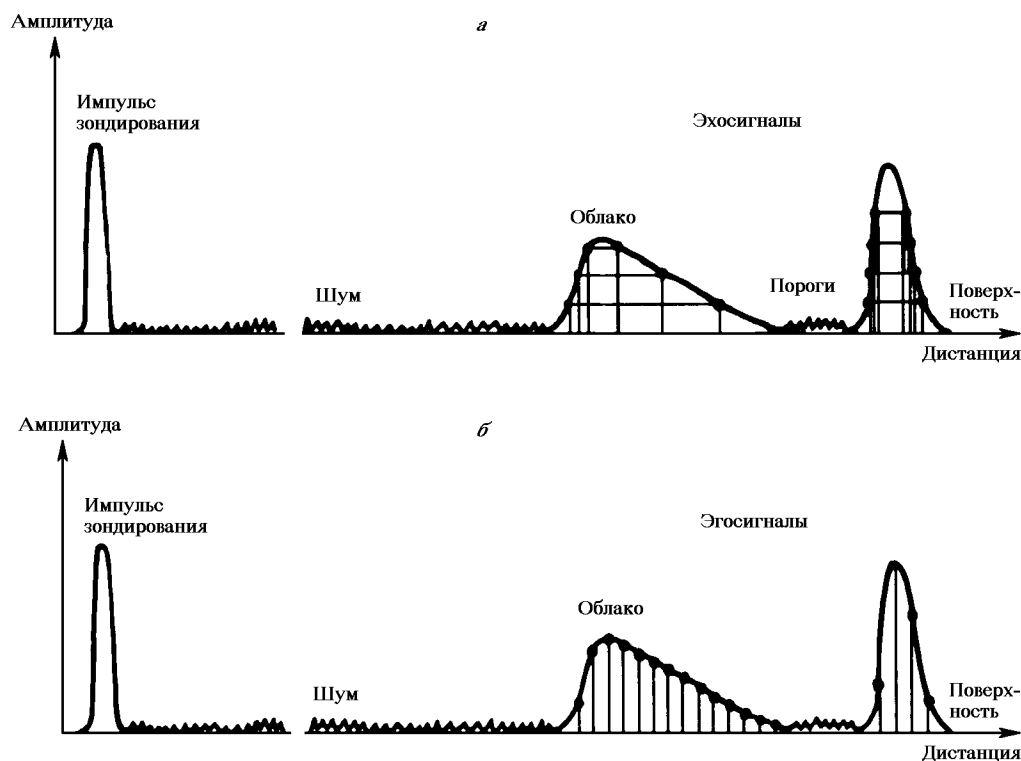


Рис. 2. Методология регистрации эхосигналов от различных объектов с использованием дальномерного (а) и лидарного б) каналов

фотодетектирования и аналого-цифрового преобразования цифровые массивы информации о принятом сигнале передаются через радиотелеметрическую систему на Землю в «сыром» виде для анализа и обработки. Это позволило в значительной степени упростить систему регистрации лидара, избежать возможных ошибок и накопить опыт для последующих разработок.

Исходя из этих предпосылок, а также ряда других требований, была выбрана схема построения лидара, конструктивно состоящая из четырех функционально законченных устройств: приемопередатчика, блока регистрации точной дальности, блока регистрации лидарных сигналов и пульта управления лидаром. Общий вид составных частей лидара показан на рис. 1.

Рис. 2 иллюстрирует основу методологии измерений эхосигналов, отраженных от облаков и ПП с использованием двух блоков (каналов) регистрации: дальномерного и лидарного, которые работают одновременно. Работа дальномерного канала основана на использовании пороговых устройств, которые срабатывают, когда сигнал превышает минимальную пороговую величину оптического сигнала,

а затем при его последовательном увеличении, кратном примерно двум. При этом определяется время (дальность) в момент превышения порога на переднем и заднем фронтах эхосигнала. Работа лидарного канала основана на использовании аналого-цифрового преобразователя (АЦП), регистрирующего значения амплитуды эхосигнала с дискретностью 20 нс. Точки на сигналах (рис. 2) показывают местоположения измерения амплитуд и временных интервалов при использовании двух каналов регистрации.

Детальное описание составных частей лидара и принципов их работы приведено в работах Valin et al. (1994), Балина и др. (1995). Краткие технические характеристики лидара представлены в табл. 1.

#### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ЛИДАРА И ПРИНЦИПОВ ИХ РАБОТЫ

Приемопередатчик лидара выполнен в виде единой отливки, что обеспечивает поддержание параллельности оптических осей приемной и передающей

Таблица 1. Технические характеристики лидара БАЛКАН

<b>Оптический передатчик</b>	
Длина волны излучения лазера, нм	532
Энергия излучения в импульсе, Дж	0.15
Длительность импульса излучения, нс	12
Режим излучения импульсов	одиночный или периодический
Диаметр оптической передающей антенны, мм	120
Гарантированный ресурс передатчика, импульсы излучения	$36 \times 10^3$
<b>Оптический приемник</b>	
Приемный телескоп	система Манжена
Световой диаметр приемной оптической антенны, мм	275
Ширина полосы интерференционного светофильтра, нм	3
Уровень пороговой мощности, Вт	$2 \times 10^{-8}$
Фотоприемник	ФЭУ-84
<b>Система регистрации сигналов</b>	
Ширина полосы электронного усилителя, МГц	40
Погрешность дальномерного канала, м	1.5
Число порогов в дальномерном канале	4
Разрядность АЦП лидарного канала	6
Временное разрешение АЦП, нс	20
Емкость информационного слова, байт	31
Емкость БЗУ лидарного канала, слов	256
<b>Лидар</b>	
Электропитание от сети постоянного напряжения, В	27
Потребляемая электрическая мощность, не более, Вт	200
Масса, кг	120
Число телеметрических сигналов, контролирующих работу	19
Максимальная длина контролируемого участка поверхности, км	3400

антенн с погрешностью не хуже  $10''$ . Взаимное крепление оптических антенн и лазера осуществляется по посадочным местам, что дает необходимую жесткость системе. Оптическая схема лидара приведена на рис. 3. Передающая антенна состоит из трехлинзового объектива и двухлинзового окуляра, что обеспечивает существенное уменьшение расходимости лазерного излучения на ее выходе. В качестве приемной антенны используется зеркально-линзовый телескоп по схеме Манжена, при этом отражающие покрытия нанесены на внешние поверхности зеркал. Использование преломляющих свойств подложек зеркал позволяет в существенной степени сократить осевой габарит телескопа. Полевая диафрагма создает минимальный угол поля зрения в  $0.44$  мрад. Часть лазерного излучения, рассеянного передней поверхностью окуляра, через световод подается в приемную систему, где преоб-

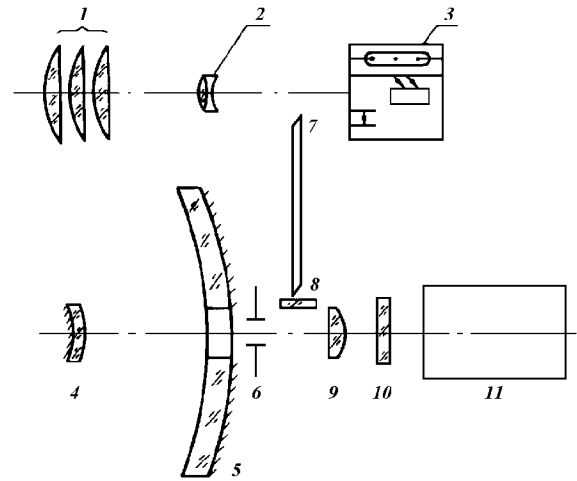


Рис. 3. Оптическая схема лидара БАЛКАН: 1 и 2 — линзы передающей антенны; 3 — лазер, 4 и 5 — зеркала приемной антенны; 6 — полевая диафрагма; 7 — световод; 8 — режекторный светофильтр; 9 — линза Фабри; 10 — интерференционный светофильтр; 11 — фотодетектор

разуется в электрический сигнал и используется в дальнейшем как стартовый импульс при обработке эхосигналов в лидарном и дальномерном каналах. Для отсекаания основной гармоники лазерного излучения используется режекторный светофильтр из стекла СЗС-23.

В качестве излучателя используется лазер на ИАГ: Nd с удвоителем частоты. Для повышения надежности и увеличения ресурса работы применено два передающих канала — основной и резервный. Переключение излучателя лазера с основного на резервный производится либо по команде с пульта управления лидаром, либо автоматически при отсутствии двух излучений подряд, которые фиксируются с помощью датчика наличия генерации. Оба канала излучателя идентичны, и каждый включает в себя задающий генератор, два однопроходных усилителя, удвоитель частоты. Плотная упаковка лазерного блока и отсутствие жидкостного охлаждения ограничивают период посылок зондирующих импульсов величиной  $5.53$  с. При этом максимальное число циклов излучения в сеансе не превышает 80, затем необходим 23-мин перерыв, при 20 циклов в сеансе перерыв не превышает 12 мин.

В фотоприемном блоке (рис. 4) с целью повышения надежности используются два фотоэлектронных умножителя (ФЭУ), на торцах которых для увеличения эффективности регистрации оптиче-

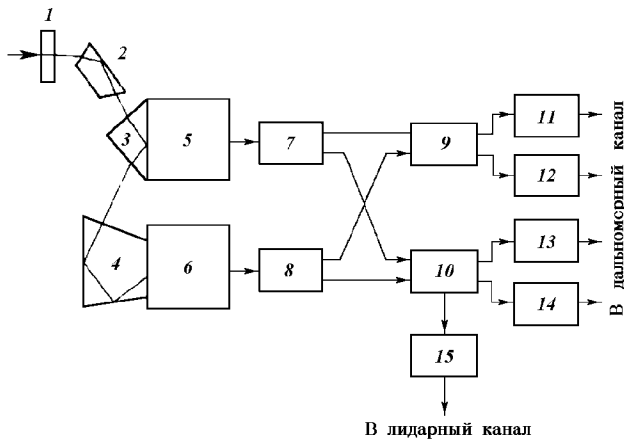


Рис. 4. Блок-схема фотоприемного блока: 1 — интерференционный сфетофильтр; 2 — поворотная призма; 3 и 4 — призмы полного внутреннего отражения; 5 и 6 — ФЭУ; 7 и 8 — усилители; 9 и 10 — сумматоры; 11–14 — пороговые устройства; 15 — эмиттерный повторитель

ского излучения установлены призмы полного внутреннего отражения. После фотоэлектрического преобразования эхосигналы усиливаются и поступают на электронные сумматоры, причем для повышения надежности сигналы на каждый сумматор поступают с обоих фотоумножителей. На выходе каждого сумматора установлено по два пороговых устройства с разными уровнями порогов. При этом отношения пороговых напряжений таковы, что  $U_{п2}/U_{п1} = U_{п4}/U_{п3} = 2.4...3.0$ ;  $U_{п3}/U_{п1} = 1.5...2.0$ ;  $U_{п1} = 140$  мВ, где  $U_{п1}$  — пороговое напряжение соответствующего порогового устройства. Срабатывание порогового устройства происходит как на переднем, так и на заднем фронтах эхосигнала, что позволяет измерять не только время его задержки, но и длительность на заданном уровне  $U_{п1}$  (см. рис. 2, а). Предусмотрены «дневной» и «ночной» режимы работы фотоприемного блока. При работе лидара на теневой стороне Земли возможно увеличение напряжения питания фотоумножителя, при этом коэффициент умножения ФЭУ увеличивается по сравнению с «дневным» значением на 15 дБ. В конечном итоге это позволяет расширить входной динамический диапазон приемной системы лидара при зондировании различных объектов, в том числе при изменении фоновой составляющей сигнала.

В блоке регистрации лидарного сигнала производится измерение амплитуд эхосигнала в фиксированные моменты времени, отсчитываемые с момента посылки импульса излучения. После прихода из фотоприемного блока стартового импульса АЦП закрыт до момента  $t_n$ , который определяет нижнюю

границу его временных ворот. При появлении эхосигнала в пределах временных ворот от  $t_n$  до  $t_k$  производится его оцифровка. 28 амплитудных выборок сигнала заносятся в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), одновременно с этим записываются паспортные данные проведенного измерения. Для этого на ОЗУ поступает информация о номере цикла измерения из пульта управления и 22 бита информации из системы единого времени станции (сутки, часы, минуты, секунды). Кроме того, в паспорт измерения входит информация о дальности до зондируемого объекта, измеренная с погрешностью 12 м (2 байта). Вся эта совокупность данных формируется в ОЗУ в одно информационное слово длиной 31 байт. Если длительность лидарного сигнала превышает 560 нс, выборки амплитуд его остальной части записываются в следующем информационном слове с теми же паспортными данными. После записи восьми информационных слов содержание ОЗУ автоматически переписывается в буферное запоминающее устройство (БЗУ). Максимальный объем памяти БЗУ — 256 слов. Накопленные в БЗУ цифровые массивы телеметрической информации (ТМИ) передаются затем в бортовую информационную телеметрическую систему орбитальной станции для последующей передачи по каналам радиотелеметрической системы (РТС) на Землю. Обмен информацией происходит по специальному протоколу. С целью повышения надежности регистрации лидарных сигналов применено резервирование — второй блок находится в холодном резерве и заменяет основной при выходе его из строя.

Дальномерный канал обеспечивает определение дальности до зондируемого объекта за счет высокоточного измерения временного интервала между передними фронтами старт- и стоп-импульсов в преобразователе время — код (ПВК). Данные об измеренном временном интервале для каждого порога формируются в ПВК в виде 21 разрядного параллельного двоичного кода. Средняя квадратичная ошибка измерения дальности составляет 0.75 м. Информация о длительности эхосигнала на каждом пороговом уровне  $U_{п1}$  формируется в виде 7-разрядного двоичного кода. Для повышения надежности в блоке применено горячее резервирование — используются два ПВК, информация с которых записывается на два проволочных магнитофона, входящих в состав блока. Регистрируемая на них информация, кроме измеренных временных интервалов, включает паспортные данные — номер цикла измерения. В идеальном случае, когда величина эхосигнала превышает величину максимального порога  $U_{п4}$ , формируется совокупность четы-

рех пар значений амплитуда—дальность, из анализа которых можно делать оценки оптических параметров облака (Балин и др. 1995). Дополнительно информация о дальности (19 бит), измеренной по первому пороговому уровню с погрешностью 1.5 м, после каждого цикла измерений в виде сигналов телеметрического контроля поступает в РТС станции. Когда эхосигнал по амплитуде не достигает уровня первого порога, по всем 19 разрядам выдаются единицы. Если случайная импульсная помеха по амплитуде превышает  $U_{п1}$  и по моменту времени появления попадает во временные ворота ПВК, она регистрируется как сигнал, поступивший с соответствующего расстояния.

Пульт управления предназначен для ручного или полуавтоматического управления работой лидара, а также для проведения контроля функционирования всех его составных частей, в том числе автоматического учета последовательности номеров циклов измерений. Через пульт осуществляется подача питающего напряжения на блоки лидара. Для сглаживания помех, поступающих по бортовой цепи питания, используется сетевой фильтр. Он также позволяет сгладить импульсные просадки напряжения, создаваемые лазером при зарядке накопительных емкостей. Информация о включении и работоспособности составных частей и субблоков лидара формируется в пульте управления в виде сигналов телеметрического контроля (параллельно индицируется на его информационном табло) и поступает в РТС станции. Это позволяет осуществлять контроль за работой лидара, а также за правильностью действий оператора-космонавта. Число контролируемых параметров лидара сигналами телеметрического контроля оптимизировано. Пульт позволяет осуществлять зондирование как одиночными импульсами, так и серией (20, 60 или 80 импульсов). После окончания сеанса зондирования с пульта проводится выключение блоков лидара. Снятие напряжения питания с блока регистрации лидарных сигналов заблокировано до момента окончания переписи массивов телеметрической информации из БЗУ этого блока в РТС станции.

#### НАЗЕМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛИДАРА И КОНТРОЛЬНО-ПОВЕРОЧНАЯ АППАРАТУРА

Испытания лидара в процессе разработки и изготовления проводились в несколько этапов в соответствии с программой наземной экспериментальной отработки, которая определяла количество изготавливаемых макетов и образцов отдельных блоков лидара и виды их испытаний. Одновременно

разрабатывалась контрольно-поверочная аппаратура (КПА) и уточнялись технические требования на нее.

Разработанный и изготовленный комплект КПА предназначен для проведения проверок контролируемых технических параметров лидара и его составных частей. Эта аппаратура обеспечивает проверку работоспособности научных космических приборов во время проведения большого цикла наземных испытаний, имитирующих воздействие внешней среды в условиях хранения, подготовки к запуску, в процессе запуска, а также во время космического полета. Кроме того, она имитирует оптические сигналы, получаемые во время космического эксперимента, а также процессы взаимодействия лидара с разными системами станции.

КПА состоит из отдельных стенов и пультов, которые позволяют выполнять как автономные проверки отдельных составных частей лидара, так и проверки лидара в целом или при его неполной конфигурации. Созданный комплект КПА (Balin et al, 1995; Балин и др., 1996) включает:

- стенд для проверки оптических параметров приемопередатчика, позволяющий проверять параллельность оптических осей приемника и передатчика, угол поля зрения приемного объектива и угол расходимости излучения передатчика с погрешностью 05°;
- пульт для проверки энергетических параметров приемопередатчика, с помощью которого измеряются выходная энергия лазерного передатчика и пороговая мощность фотоприемного тракта лидара, проверяется пороговая чувствительность дальномерного канала;
- испытательный пульт для проверки электрических параметров блока регистрации лидарного сигнала, позволяющий принимать, индицировать и контролировать с помощью стандартных измерительных приборов сигналы, выдаваемые этим блоком в РТС станции, а также проводить имитацию работы блока в составе лидара; кроме того, пульт имитирует электрические сигналы, соответствующие зондирующему лазерному импульсу и отраженному лидарному сигналу с различной временной задержкой, длительностью и амплитудой, что позволяет метрологически аттестовать АЦП в составе этого блока;
- испытательный пульт для проверки электрических параметров пульта управления лидаром, предназначенный для приема, индикации и трансляции на стандартные измерительные приборы команд, управляющих работой остальных

ных блоков лидара, и сигналов телеметрического контроля, выдаваемых пультом управления в РТС станции; кроме того, испытательный пульт обрабатывает команды, поступающие в него из пульта управления лидаром, и выдает в последний реакции на эти команды аналогично тому, как это происходит при работе пульта управления в составе лидара;

- оптический имитатор лидарных сигналов для тестирования всего лидара. Этот имитатор, запускаемый лазерным импульсом передатчика, формирует задержанный на несколько миллисекунд оптический импульс, который моделирует эхосигнал, что позволяет контролировать работу дальномерного и лидарного каналов. С помощью этого имитатора проводились все проверки лидара в модуле «Спектр».

В состав стендов и пультов входят стандартные измерительные приборы соответствующих классов точности (осциллографы, импульсные генераторы, вольтметры, частотомеры и т. п.), которые позволяют измерять электрические и оптические характеристики контролируемых параметров лидара. Это намного упрощает структуру КПА.

Кроме того, в состав созданного, но не поставляемого комплекта КПА, используемого при лабораторных и конструкторских испытаниях, входили имитаторы импульсных и гармонических электрических помех, которые могут в соответствии с требованиями технического задания поступать на лидар по цепям бортового электропитания. Первый имитатор обеспечивал формирование набора импульсных электрических помех разной амплитуды и длительности, а второй — гармонических электрических помех разной амплитуды в широком диапазоне спектра от единиц герц до сотен мегагерц.

На заводе, где собирался орбитальный модуль, все блоки лидара при использовании комплекта КПА проходили сначала индивидуальный автономный входной контроль, а затем контроль всего лидара для подтверждения заданных технических характеристик. Только после проведения такого количества испытаний лидар был установлен в орбитальном модуле.

Затем наземные испытания были продолжены в контрольно-испытательной станции РКК «Энергия». Комплексные и совместные испытания лидара включали проверки: его характеристик в составе модуля «Спектр» и технологического комплекта станции «Мир»; возможностей управления по командам и сигналам от систем станции; процессов передачи сигналов ТМИ от блоков лидара в РТС станции. Испытания проводились для основных и

резервных блоков лидара и модуля в различных их сочетаниях, включая дублирующие кабельные сети. Повторно этот цикл испытаний был проведен в конце 1994 г. Последний этап наземных комплексных испытаний лидара в составе модуля с использованием КПА был проведен в монтажно-испытательном комплексе на космодроме.

#### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛИДАРА С СИСТЕМАМИ СТАНЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ ЕГО РАБОТОЙ

Приемопередатчик лидара установлен на кронштейне перед иллюминатором внутри орбитального модуля. Остальные блоки лидара размещены на стенках и панелях модуля. Для предотвращения засветок фотоприемного блока от мощного потока лазерного излучения, переотраженного от четырех оптических поверхностей иллюминатора, оптическая ось лидара отклонена от оси иллюминатора на угол  $1.5^\circ$ . Для защиты глаз космонавтов от бликов переотраженного лазерного излучения пространство между иллюминатором и выходной апертурой приемопередатчика закрыто светозащитной блендой. Для предотвращения запотевания внутренней поверхности стекла иллюминатора предусмотрен его принудительный обдув воздухом.

При проведении сеансов лазерного зондирования в основном используется полуавтоматический режим управления работой лидара. По заранее рассчитанной последовательности времени (циклограмме работ) до начала проведения лидарных измерений бортовая ЭВМ выдает команды на включение вентиляторов обдува иллюминатора, лидара на прогрев термостатирующих устройств, бортовых магнитофонов станции для записи всей телеметрической информации с лидара, команду на открытие внешней крышки иллюминатора модуля. За 5—7 мин до начала измерений производится ориентация осей связанной системы координат станции в заданном направлении и обеспечение стабилизации их положения на время измерений.

За 10 мин до начала эксперимента управление лидаром принимает оператор-космонавт, который с пульта управления проводит контроль функционирования блоков лидара, включает лидар на излучение серий импульсов (возможен также запуск лидара на излучение от бортовой ЭВМ). Затем производит выключение питания блоков лидара. После окончания процесса измерения и выполнения всех завершающих операций, включая закрытие крышки иллюминатора, бортовая ЭВМ выключает магнитофоны РТС, фиксирующие сигналы ТМИ.



Таблица 2. Сравнительные параметры лидаров космического базирования

Параметр	Единица измерения	LITE	БАЛКАН	ALISSA
Длина волны зондирования	нм	355 532 1064	532	532
Выходная энергия	мДж	150 460 500	150	40 (4 лазера)
Длительность импульса излучения	нс	31 27 27	12	15
Расходимость излучения	мрад	0.6 0.6 1.0	0.15	0.5
Частота посылок импульсов	Гц	10 10 10	0.18	50
Световой диаметр приемного телескопа	мм	985	275	400
Угол поля зрения	мрад	1.1	0.44	0.5
Режим работы фотоприемника		аналоговый	аналоговый	счетно-фотонный
Пространственное разрешение по высоте	м	15	3	1500
Потребляемая мощность	Вт	2000	200	3000
Космическая платформа		челнок «Discovery»	орбитальная станция «Мир» модуль «Спектр» модуль «Природа»	
Средняя высота орбиты	км	240	400	400
Угол наклона орбиты	град	57	51.7	51.7
Расстояние между точками измерений	км	0.7	42.6	0.15
Время функционирования		9 сут (сентябрь 1994 г.)	1995—1997 гг.	1996—1997 гг.

#### СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРВЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛИДАРОВ

Три первых космических лидара отличаются своим энергетическим потенциалом и способом регистрации эхосигналов. В табл. 2 для сравнения представлены их основные характеристики. Как видно, лидар БАЛКАН, уступая по энергетическому потенциалу лидару LITE в 150 раз (за счет меньшей энергии излучения, площади приемной антенны и большей высоты орбиты), превосходит лидар ALISSA, который может работать только на теневой стороне Земли, поскольку регистрирует обратно рассеянное излучение в счетно-фотонном режиме работы фотоумножителя. Кроме того, большое энергопотребление лидара ALISSA, работающего на теневой стороне, когда не функционируют солнечные батареи станции, существенно ограничивает длительность его сеансов измерений. Следует отметить, что многие результаты, полученные при разработке, изготовлении, наземных и летных испытаниях лидара БАЛКАН, учитывались при создании лидара ALISSA, штатный образец которого был поставлен для монтажа в орбитальном модуле «Природа» только осенью 1995 г.

К недостаткам лидара БАЛКАН следует отнести малую частоту посылок зондирующих импульсов, что не позволяет проводить непрерывный контроль облачных полей и ПП Земли, так как расстояние между соседними точками измерений составляет 42.6 км при диаметре светового пятна на поверхности Земли не превышающем 100 м. Вместе с этим он обладает лучшей вертикальной пространствен-

ной разрешающей способностью, и наименьшими энергопотреблением и массо-габаритными параметрами, что является немаловажной характеристикой бортовой научной аппаратуры.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первый российский космический лидар БАЛКАН был разработан и изготовлен во второй половине 1980-х годов. Выведенный на орбиту в составе модуля «Спектр» в 1995 г., после пятилетнего хранения, он показал свою работоспособность при проведении с борта орбитальной станции «Мир» сеансов лазерного зондирования подстилающей поверхности Земли и облачных полей. Лидар БАЛКАН является результатом совместной деятельности четырех организаций: Конструкторско-технологического института «Оптика» СО РАН, Института оптики атмосферы СО РАН, Росийского НИИ космического приборостроения РКА, РКК «Энергия».

Авторы признательны всем сотрудникам этих организаций, которые принимали участие в реализации данного проекта. Особую благодарность авторы выражают 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.

Опыт создания лидара БАЛКАН и результаты проведенных экспериментов будут учтены при выполнении следующих проектов по лидарам серии БАЛКАН (Matvienko et al, 1994; Зуев и др., 1995).

- Балин Ю. С., Разенков И. А. Лазерный контроль аэрозольных загрязнений воздушного бассейна промышленных центров // Оптика атмосферы и океана.—1993.—6, № 2.—С. 169—188.
- Балин Ю. С., Знаменский И. В., Зуев В. Е. и др. Российский космический лидар «Балкан-1» // Оптика атмосферы и океана.—1995.—8, № 9.—С. 1332—1343.
- Балин Ю. С., Знаменский И. Е., Мельников В. Е., Тихомиров А. А. Комплекс наземной контрольно-поверочной аппаратуры для российского космического лидара «Балкан-1» // Оптика атмосферы и океана.—1996.—9, № 3.—С. 359—366.
- Герман М. А. Космические методы исследования в метеорологии. — Л.: Гидрометеиздат, 1985.—351 с.
- Захаров В. М. (ред.) Лазерное зондирование атмосферы из космоса. — Л.: Гидрометеиздат, 1988.—215 с.
- Зуев В. Е., Зуев В. В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы // Современные проблемы атмосферной оптики. — С.-Пб.: Гидрометеиздат, 1992.—Т. 8.—232 с.
- Зуев В. Е., Балин Ю. С., Зуев В. В., Матвиенко Г. Г., Тихомиров А. А. Состояние и перспективы развития космических лидаров серии «Балкан» // Оптика атмосферы и океана.—1995.—8, № 12.—С. 1718—1726.
- Кабанов М. В., Тихомиров А. А. Конструкторско-технологическое обеспечение фундаментальных исследований по атмосферной оптике: итоги деятельности КТИ «Оптика» СО РАН за 25 лет // Оптика атмосферы и океана.—1997.—10, № 4.—С. 382—402.
- Кондратьев К. Я., Тимофеев Ю. М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. — Л.: Гидрометеиздат, 1978.—280 с.
- Кренкелл А. П. (ред.) Дистанционное зондирование в метеорологии, океанологии и гидрологии. — М.: Мир, 1984.—535 с.
- Лазарев А. И., Коваленок В. В., Авакян С. В. Исследование Земли с пилотируемых космических кораблей. — Л.: Гидрометеиздат, 1987.—399 с.
- Abstracts 9th Inter. Laser Radar. Conf. — Munich, 1979.—198 p.
- Balin Yu. S., Burkov V. V., Znamenskii I. V., et al. Spaceborne aerosol lidar BALKAN-1 // 15th Inter. Laser Radar. Conf.: Abstracts. — Tomsk, 1990.—Vol. 1.—P. 12—14.
- Balin Yu. S., Mel'nikov V. E., Tikhomirov A. A., et al. Spaceborne aerosol lidar BALKAN-1 // Proc. SPIE.—1994.—2310.—P. 144—151.
- Balin Yu. S., Znamenskii I. V., Mel'nikov V. E., Tikhomirov A. A. Ground support and testing instrumentation complex for Russian spaceborne lidar BALKAN-1 // Proc. SPIE.—1995.—2581.—P. 121—127.
- Curran R. J. Sattelite-borne lidar observation of the Earth: Requirements and anticipated capabilities // Proc. IEEE. — 1989.—77, № 3.—P. 478—490.
- Chazette P., Pelon J., Megie G., et al. Coupling spaceborne backscatter lidar and passive radiometry for meteorological and climatological application // 15th Inter. Laser Radar. Conf.: Abstracts. — Tomsk, 1990.—Vol. 1.—P. 20—23.
- McCormick M. P., Winter D. M., Browell E. V., et al. Scientific investigation planned for the lidar in-space technology experiment (LITE) // Bull. Meteorol. Soc.—1993.—74, N 2.—P. 205—214.
- Matvienko G. G., Zuev V. E., Shamanaev V. S., et al. Lidar BALKAN-2 for space platform "ALMAZ-1B" // Proc. SPIE.—1994.—2310.—P. 161—163.
- Russel P., Morley B. M., et al. Orbiting lidar simulations. 1: Aerosol and cloud measurements by an independent wavelength technique // Appl. Opt.—1982.—21, N 9.—P. 1541—1553.
- Werner Ch., Brand B., Jochim E. F. Doppler lidar on the space station // Proc. SPIE.—1995.—2581.—P. 148—162.
- Winker D. M., McCormick M. P. Observation of aerosol and clouds with LITE // Proc. SPIE.—1995.—2581.—P. 70—78.

---

#### REMOTE LASER SENSING OF THE EARTH FROM SPACE. I. THE RUSSIAN SPACEBORNE BALKAN LIDAR

V. E. Zuev, Yu. S. Balin, A. A. Tikhomirov,  
I. V. Znamenskii, and V. E. Mel'nikov

Description of the first Russian spaceborne single-frequency aerosol lidar BALKAN is presented. The lidar is designed for investigations of clouds and Earth's surface from the orbiting station "Mir". Comparison is made of performance parameters of the Russian lidar BALKAN and the american LITE and Russian-French lidar ALISSA.