

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 53.089.6:629.78:535.8

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

КОМПЛЕКС НАЗЕМНОЙ КОНТРОЛЬНО-ПОВЕРОЧНОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ РОССИЙСКОГО КОСМИЧЕСКОГО ЛИДАРА «БАЛКАН-1»

Описывается комплекс наземной контрольно-поверочной аппаратуры, созданной для полного цикла наземных испытаний космического лидара «Балкан-1», включающих конструкторско-доводочные испытания опытных образцов и заводские приемосдаточные испытания штатных образцов; входной контроль перед монтажом лидара на модуль «Спектр» орбитальной станции «Мир»; предстартовые испытания в составе модуля на космодроме.

1. Введение

Обеспечение высокой степени надежности научной аппаратуры, предназначенной для размещения на пилотируемой орбитальной станции, требует проведения большого цикла ее наземных отработочных испытаний. Для выполнения этих работ необходимо создание контрольно-поверочной аппаратуры (КПА), которая позволяет проверять технические параметры бортовой аппаратуры как при воздействии различных внешних факторов (механических, климатических, электромагнитных и др.), так и после их воздействия. Необходимо также проверять отработку взаимодействия научной аппаратуры с телеметрической системой станции, через которую оперативно передаются результаты измерений на Землю. Поэтому требования к КПА достаточно широки. Она должна также имитировать сигналы и команды при дистанционном режиме управления бортовой научной аппаратурой и анализировать ее работоспособность по сигналам телеметрического контроля о выполнении команд управления. Кроме того, КПА должна имитировать процесс взаимодействия со средой, в которой проводятся измерения и формируются лидарные сигналы, чтобы обеспечить проверку функционирования и измерение точностных характеристик научной аппаратуры.

2. Назначение и состав контрольно-поверочной аппаратуры лидара «Балкан-1»

Созданная в процессе разработки и изготовления лидара «Балкан-1» КПА предназначена для проведения конструкторско-доводочных испытаний при отработке конструкторско-технологической документации в процессе создания лидара, приемосдаточных испытаний блоков лидара после их изготовления и сборки, входного контроля перед монтажными работами в орбитальном модуле и проведения комплексных испытаний в составе модуля на контрольно-испытательной станции РКК «Энергия» и в монтажно-испытательном комплексе перед запуском модуля на орбиту. КПА позволяет также проводить регламентные проверки на всех этапах наземной эксплуатации лидара «Балкан-1».

Поскольку лидар «Балкан-1» состоит из нескольких функционально-законченных блоков – приемопередатчика, блока точного измерения дальности, системы регистрации лидарных сигналов (СРЛС), пульта управления лидаром (ПУЛ) [1–3], то при разработке КПА было принято решение делать ее из составных частей, с помощью которых можно было бы проводить проверку как отдельных блоков лидара, так и всего лидара в целом.

Проверка основных электрических параметров блоков лидара представляет собой чисто электронную инженерную задачу, поэтому в статье основное внимание уделяется описанию составных частей КПА, предназначенных для проверки оптических и оптико-электронных блоков лидара, а также для проверки всего оптико-электронного тракта лидара, включая лазерный передатчик, оптико-электронный приемный тракт и СРЛС. Последняя выдает в циф-

рованном виде информацию о зарегистрированном лидарном сигнале в бортовую телеметрическую систему для последующей передачи на Землю, где производятся окончательный анализ и обработка полученных лидарных сигналов [3].

В состав комплекса контрольно-поверочной аппаратуры входят следующие приборы и стенды: стенд для проверки погрешности юстировки оптических осей, прибор для измерения энергетических характеристик приемопередатчика, испытательные пульта для проверки электрических характеристик СРЛС и ПУЛ, оптический имитатор лидарных сигналов. Три последних прибора предназначены для проведения проверок как отдельных блоков лидара, так и лидара в целом, а имитатор лидарных сигналов позволяет проводить также проверки лидара в составе орбитального модуля «Спектр».

Кроме перечисленных выше испытательных стендов, приборов и пультов были созданы имитаторы импульсных и широкодиапазонных периодических электрических помех, которые могут поступать на лидар от бортового источника электропитания, и устройство, позволяющее контролировать уровень помех, создаваемых лидаром на входных цепях питания. Испытания лидара проводились при изменении напряжения электропитания в диапазоне от 24 до 32 В. Средняя потребляемая мощность лидара не превышала 340 Вт.

Для контроля и измерения параметров оптических и электрических сигналов, выдаваемых блоками лидара, использовались стандартные измерительные приборы и генераторы, которые входили в состав испытательных пультов и стендов КПА. Механоклиматические испытания блоков лидара проводились на ударных и вибрационных стендах и в термо-барокамерах контрольно-испытательной станции КТИ «Оптика» и на других предприятиях г. Томска.

3. Работа КПА и ее составных частей

3.1. Стенд для проверки погрешности юстировки оптических осей

Проверка рассогласования оптических осей приемника и передатчика производится на стенде, изображенном на рис. 1. Приемопередатчик лидара 1 на специальном юстировочном приспособлении устанавливается на двух параллельно стоящих оптических скамьях (ОСК-2). При этом фотодетекторный блок и интерференционный светофильтр демонтируются с приемопередатчика. На оптических скамьях размещены коллимационные трубы 9 и 10 с фокусным расстоянием 1600 мм и диаметром выходной апертуры 160 мм. Эти трубы устанавливаются параллельно оптической оси приемной антенны 4. Для этой цели приемопередатчик имеет специальное плоское юстировочное зеркало 5, оптическая ось которого жестко связана с оптической осью приемной антенны при заводской сборке. Используя это зеркало, устанавливают с помощью юстировочных приспособлений плоскопараллельную пластину 8 так, чтобы ее плоскость была параллельна плоскости зеркала 5.

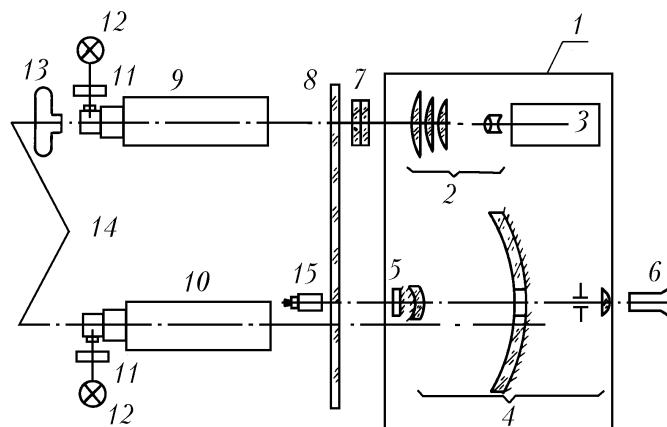


Рис. 1. Стенд для проверки погрешности юстировки приемопередатчика лидара: 1 – приемопередатчик; 2 – передающая оптическая антенна; 3 – лазер; 4 – приемная оптическая антенна; 5 – юстировочное зеркало; 6 – диоптрийная трубка; 7 – ослабляющий нейтральный светофильтр; 8 – плоскопараллельная пластина; 9, 10 – коллиматоры; 11 – интерференционные светофильтры; 12 – осветители; 13 – микрофотонасадка; 14 – оптические оси оптических скамей; 15 – зрительная труба

Чтобы исключить хроматические aberrации, подсветку сеток коллиматоров производят через интерференционные светофильтры 11. Диоптрийную трубку 6 используют для наблюдения диафрагмы поля зрения приемной антенны с изображением в ней сетки коллиматора 10. С помощью юстировочных приспособлений (на рис. 1 не изображены) добиваются, чтобы центр перекрестия сетки коллиматора 10 был совмещен с центром диафрагмы поля зрения. По числу делений сетки коллиматора, укладываемых в диафрагме поля зрения приемной оптической антенны, определяют угол зрения, который не должен превышать 0,45 мрад.

Проверка параллельности оптической оси приемной антенны и диафрагмы направленно-сти лазерного передатчика производится с помощью микрофотонасадки 13. Для этого одновременно фотографируются автоколлимационное изображение сетки коллиматора 9 от плоскопараллельной пластины 8 и вспышки излучения лазерного передатчика. Для ослабления плотности лазерного излучения между плоскопараллельной пластиной 8 и передающей оптической антенной устанавливается нейтральный светофильтр 7. Полученные фотоснимки позволяют оценить угол разъюстировки оптических осей приемопередатчика. Для этого производят статистическую обработку фотоснимков, сделанных при нескольких вспышках лазерного излучения. Кроме того, цикл измерений повторяют после переворачивания нейтрального светофильтра 7 на 180°, чтобы исключить его влияние. Учитывая масштаб перевода (отношение цены младшего деления сетки коллиматора к расстоянию между штрихами автоколлимационного изображения сетки на фотоснимке), из среднего значения отклонения центра излучения от центра перекрестия коллиматора вычисляют значение непараллельности оптических осей. Проверка производится для основного и резервного каналов лазерного передатчика. Допускаемая погрешность разъюстировки оптических осей приемной и передающей оптических антенн после заводской сборки не превышает ± 5 угл.с.

3.2. Пульт для измерения энергетических характеристик приемопередатчика лидара

Пульт предназначен для проверки функционирования приемопередатчика лидара и измерения следующих его характеристик: выходной энергии лазерного передатчика, пороговой мощности приемного тракта, пороговой чувствительности дальнометрического канала. Схема измерительного пульта приведена на рис. 2.

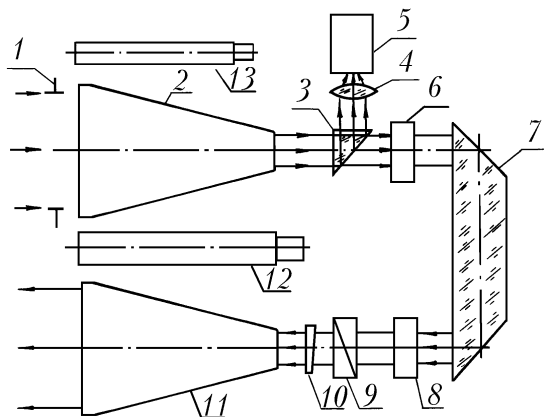


Рис. 2. Прибор для измерения энергетических характеристик приемопередатчика: 1 – диафрагма ($D=75$ мм); 2 – телескопическая система; 3 – призма; 4 – конденсатор; 5 – чувствительный элемент измерителя энергии; 6 – постоянный оптический ослабитель; 7 – поворотная призматическая система; 8 – переменный оптический ослабитель; 9 – клиновидный компенсатор юстировки приборов; 10 – компенсатор aberrаций скорости; 11 – телескопическая система; 12 – коллиматор; 13 – визир

В режиме измерения энергии излучения лазерного передатчика диафрагма 1 исключается, а призма 3 устанавливается таким образом, чтобы лазерное излучение, прошедшее через телескопическую систему 2, попадало на конденсатор 4, а затем на чувствительный элемент измерителя энергии 5, в качестве которого используется прибор ИКТ-1М (максимальная погрешность измерения энергии $\pm 15\%$). Входной диаметр телескопической системы 2 составляет при этом 145 мм, что допускает работу при разъюстировках до ± 3 угл.мин относительно оси передающей оптической антенны и точности установки по визирю ± 5 мм. При этих измерениях

учитывается коэффициент потерь в оптическом тракте измерителя энергии, который составляет 0,5. Выходная энергия лазерного передатчика 0,2 Дж.

При измерении пороговой мощности приемного тракта и пороговой чувствительности дальнометрического канала призма 3 выводится из хода лучей. Перед объективом телескопической системы 2 устанавливается диафрагма 1. Диафрагмирование предусмотрено с целью исключения некалиброванного виньетирования в приемной оптической антенне лидара. В этом режиме работы диапазон изменения коэффициента пропускания измерительного тракта составляет $0,2 \cdot 10^{-12} \div 0,2 \cdot 10^{-15}$ с дискретностью установки пропускания не более 25% (максимальная погрешность установки ослабления измерительного тракта $\pm 10\%$). Подбирая коэффициент ослабления лазерного излучения (переменный оптический ослабитель 8), определяют пороговую мощность приемного тракта, а также уровни порогов срабатывания дальнометрического канала [3]. Погрешность проверки чувствительности составляет $\pm 30\%$. Коллиматор 12, закрепленный на корпусе прибора, позволяет осуществлять его установку относительно приемопередатчика лидара таким образом, чтобы оптическая ось пульта была параллельна оптической оси приемной системы лидара с погрешностью не более ± 10 угл.с.

3.3. Испытательный пульт для проверки электрических характеристик системы регистрации лидарных сигналов

Испытательный пульт предназначен для приема, индикации и трансляции на стандартные измерительные приборы сигналов, поступающих из СРЛС. Пульт также имитирует электрические сигналы, соответствующие зондирующему лазерному импульсу и отраженному лидарному сигналу с различной временной задержкой, длительностью и амплитудой, что позволяет метрологически аттестовать аналого-цифровой преобразователь СРЛС. Кроме того, с помощью пульта имитируются сигналы единого времени и номера цикла измерения, которые необходимы для паспортизации лидарного сигнала [2, 3], и команды управления, поступающие с пульта управления лидаром. Испытательный пульт имеет индикаторное табло формата 8×31, на котором для контроля высвечивается информационная строка зарегистрированного сигнала (см. [3, рис. 6]), передаваемая затем в радиотелеметрическую систему орбитальной станции.

При проверках всего лидара с помощью этого пульта он также позволяет имитировать процесс обмена информацией между СРЛС и радио-телеметрической системой.

3.4. Испытательный пульт для проверки электрических характеристик пульта управления лидаром

Испытательный пульт предназначен для приема, индикации и трансляции на стандартные измерительные приборы сигналов и команд, поступающих из ПУЛ. Кроме того, испытательный пульт обрабатывает команды, поступающие из ПУЛ, и выдает в него реакции на эти команды аналогично тому, как это производится при работе ПУЛ в составе лидара. Для этого испытательный пульт имитирует сигналы от составных частей лидара, электрически связанных с ПУЛ, а также команды и сигналы от систем и устройств орбитального модуля. В состав испытательного пульта входит устройство, позволяющее осуществлять его проверку и само-тестирование. При проведении испытаний пульт может работать в двух режимах: а) режиме измерения параметров импульсов и сигналов, вырабатываемых ПУЛ; б) режиме имитации работы лидара по командам и сигналам ПУЛ.

При проверках всего лидара данный испытательный пульт имитирует работу систем устройств орбитального модуля по выдаче команд управления на лидар и приему сигналов телеметрического контроля об обработке этих команд.

3.5. Оптический имитатор лидарных сигналов

Оптический имитатор предназначен для формирования оптических лидарных сигналов при автономных проверках, испытаниях и контроле функционирования лидара «Балкан-1», а также при проверках лидара в составе орбитального модуля. Оптический имитатор позволяет генерировать два сигнала: сигнал, имитирующий импульс зондирующего лазерного излучения, и задержанный лидарный сигнал. Мощность оптического лидарного сигнала может ступенчато изменяться в диапазоне от $5 \cdot 10^{-8}$ до $2 \cdot 10^{-7}$ Вт (4 ступени) с погрешностью $\pm 30\%$. Кро-

ме того, имеется возможность регулирования длительности как самого импульса, так и его переднего и заднего фронтов, что на уровне 0,1 от амплитуды импульса обеспечивает диапазон изменения его длительности от 400 до 1500 нс с дискретностью 50 нс, а на уровне 0,5 – от 500 до 1100 нс с той же дискретностью. Время задержки лидарного сигнала относительно лазерного импульса ступенчато регулируется от 1,2 до 3,0 мс (4 ступени). Погрешности установки временных параметров имитационного сигнала $\pm 10\%$.

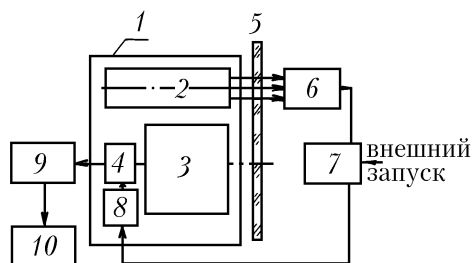


Рис. 3. Схема проверки лидара с помощью оптического имитатора лидарных сигналов: 1 – приемопередатчик; 2 – лазерный передатчик; 3 – приемная оптическая антенна; 4 – фотодетекторный блок с интерференционным светофильтром; 5 – иллюминатор орбитального модуля; 6 – фотоприемник; 7 – электронный генератор; 8 – блок излучателя; 9 – СРЛС; 10 – испытательный пульт для проверки СРЛС

Схема проверки лидара с помощью оптического имитатора приведена на рис. 3. Запуск электронного генератора 7 может осуществляться тремя способами: а) от лазерного импульса передатчика лидара; б) от внешнего электрического сигнала, в) от кнопки на передней панели имитатора. При автономных проверках лидара крышка с фотоприемником 6 имитатора крепится на выходную апертуру передающей антенны лидара, а при проверках в составе орбитального модуля – на его иллюминатор 5, напротив передающей антенны. Блок оптического излучателя 8 – светодиодная матрица – устанавливается в специальном технологическом окне фотодетекторного блока 4 лидара. После запуска лазерного передатчика оптический сигнал, принимаемый фотоприемником 6, преобразуется в электронный и поступает в генератор 7, где задерживается на временной интервал, соответствующий прохождению сигнала от орбитальной станции до Земли и обратно, и формируется в лидарный сигнал заданной формы. Поступающий затем на блок излучателя 8 оптический сигнал позволяет проверить работу всего приемно-регистрирующего тракта лидара. Сигнал с выхода системы регистрации лидарных сигналов фиксируется либо на информационном табло измерительного пульта 10, либо поступает в радиотелеметрическую систему орбитальной станции. Таким образом, осуществляется проверка функционирования всего лидара, и проверяются точностные характеристики СРЛС (при известной форме имитационного оптического сигнала).

Наличие излучателя, имитирующего лазерный сигнал, позволяет также проводить проверки приемного оптико-электронного тракта лидара без включения лазерного передатчика, что сохраняет ресурс лазерных вспышек.

4. Заключение

Созданная контрольно-поверочная аппаратура позволила привести весь цикл испытаний лидара «Балкан-1» по программе наземной экспериментальной отработки, которая включала лабораторные отработочные испытания электрического макета лидара и его составных частей, приемосдаточные и конструкторско-доводочные испытания опытных образцов лидара, приемосдаточные испытания штатных образцов лидара. Проведенные испытания подтвердили соответствие лидара требованиям, предъявляемым к космической технике, и пригодность его для установки на борт орбитального модуля «Спектр». Лидар устойчиво работает в воздушной среде со следующими параметрами: давление 510–970 Торр; температура от +5 до +35°C; относительная влажность от 30 до 70% при температуре +20°C; содержание кислорода до 40%, содержание гелия 0,01%, содержание водорода до 2%. Лидар сохраняет свои характеристики после воздействия: вакуума до 10^{-4} Торр, атмосферного воздуха при температуре от минус 50 до +50°C, а также после воздействия механических нагрузок: синусоидальной вибрации до 10 g в диапазоне частот от 5 до 2000 Гц в течение 600 с и 100 импульсных ударных нагрузок до 40 g по каждой из трех осей координат, после воздействия акустических нагрузок 145 дБ в диапазоне частот 200–2000 Гц.

Надежность и работоспособность лидара подтверждены также выполнением программы обеспечения надежности аппаратуры и безопасности экипажа. Разработан перечень возможных нештатных ситуаций при эксплуатации лидара и рекомендации по выходу из них. В 1990 г. лидар был установлен на модуле «Спектр», в составе которого были проведены наземные комплексные испытания. Проверена также электромагнитная совместимость лидара с приборами и аппаратурой других систем модуля.

В 1994 г. лидар «Балкан» был демонтирован из орбитального модуля и с помощью КПА были проведены повторные автономные проверки всех его блоков, а затем комплексные испытания в составе модуля «Спектр». Испытания подтвердили работоспособность лидара после консервации и хранения. В составе модуля лидар транспортировался на космодром Байконур, где в апреле 1995 г. были проведены его последние предстартовые испытания с использованием имитатора оптических сигналов. В составе модуля «Спектр» лидар выведен на орбиту и состыкован со станцией «Мир» в мае 1995 г.

Отдельные части КПА разрабатывались и изготавливались в КТИ «Оптика» СО РАН и РНИИ космического приборостроения. Сотрудникам, принимавшим участие в создании КПА, авторы выражают глубокую признательность.

Особую благодарность авторы выражают В.С. Ефимкину, Ю.Н. Грачеву, В.С. Ильичевскому, П.П. Ваулину, В.А. Бересневу и В.Л. Оленникову, принимавшим активное и постоянное участие в разработке КПА и наземных испытаниях лидара «Балкан-1».

1. Balin Yu. S., Burkov V. V., Znamenskii I. V. et al. // 15th Inter. Laser Radar Conf. Abstracts of paper. Tomsk, USSR. 1990. V. 1. P. 12–14.
2. Balin Yu. S., Mel'nikov V. E., Tikhomirov A. A. et al. // Proc. SPIE. 1994. V. 2310, ser. Lidar Techniques for Remote Sensing. P. 144–151.
3. Балин Ю.С., Знаменский И.В., Зуев В.Е. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 9. С. 1332–1343.

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск
КТИ «Оптика», Томск

Поступила в редакцию
25 июля 1995 г.

Yu. S. Balin, I. V. Znamenskii, V. E. Mel'nikov, A. A. Tikhomirov. A Set of Instrumentations for Russian Space Lidar «Balkan-1».

The ground-based instrumentations designed for full-scale ground test of the space lidar «Balkan-1» are described in the paper: operational development of the pilot samples and factory approval tests of the commercial products; acceptance inspection before installation of the lidar into the «Spectr» module of the orbital station «Mir»; site check of the lidar as a part of the module in the spaceport before start.