

Ю.С. Балин, А.А. Тихомиров, С.В. Самойлова

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ОБЛАКОВ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ЛИДАРОМ «БАЛКАН»

Приводятся предварительные результаты лазерного зондирования земной поверхности и облачных полей, полученные с помощью первого российского космического лидара «Балкан» в 1995–1996 гг. Лидар установлен на орбитальной станции «Мир» и с августа 1995 г. работает в стационарном режиме. Приведены параметры лидара и станции, влияющие на результаты измерений, а также основы методологического обеспечения сеансов космических экспериментов. Дано краткое описание сеансов зондирования поверхности океана, облачных полей и участков суши, проведенных в различных регионах земного шара при разной светотеневой обстановке в двух режимах ориентации орбитальной станции.

1. Введение

Первые результаты по лазерному зондированию Земли и ее атмосферы из космоса получены с помощью американского космического лидара, работавшего по программе LITE [1] в сентябре 1994 г. на челноке «Discovery». Космические эксперименты по лазерному зондированию (КЭЛЗ) с помощью лидара «Балкан» [2] с пилотируемой станции «Мир» проводились в августе–сентябре 1995 г. орбитальными экспедициями ЭО-19 (Н. Бударин, А. Соловьев) и ЭО-20 (Ю. Гидзенко, С. Авдеев). Затем в феврале 1996 г. продолжены экспедицией ЭО-20 и в марте–апреле 1996 г. экспедицией ЭО-21 (Ю. Онуфриенко, Ю. Усачев) при непосредственном участии в организации и сопровождении экспериментов из Центра управления полетами (ЦУП) авторами данной статьи.

Основная цель программы выполненных сеансов лазерного зондирования заключалась в технологической проверке работоспособности лидара, отработке методик проведения космического и подспутникового экспериментов, проверке и модернизации существующих баллистических методик ориентации станции «Мир», получении массива лидарных сигналов от облачных образований и подстилающей поверхности и разработке методик их обработки.

2. Режимы ориентации станции «Мир» и лидара на орбите

Для работы пилотируемой станции «Мир» в 1995–1996 гг. были взяты следующие параметры орбиты: высота в перигее 393 км, в апогее 413 км; средний период обращения вокруг Земли 92,41 мин; угол наклона орбиты к плоскости экватора 51,74°; средняя скорость движения по орбите 7,7 км/с.

Подробно технические характеристики лидара «Балкан» представлены в [3,4], поэтому далее приводятся те параметры, которые необходимо учитывать при проведении КЭЛЗ. Период повторения лазерных импульсов (циклов измерений) равен 5,53 с; число лазерных импульсов в одном сеансе измерений 20, 60 или 80 с последующим периодом охлаждения 12 или 25 мин соответственно.

Расходимость излучения лазерного передатчика составляет 0,15 мрад, что обеспечивает с высоты орбиты 400 км диаметр пятна излучения на поверхности Земли не более 100 м. При этом расстояние между центрами отдельных зондируемых точек составляет 42,58 км, а максимальная длина контролируемой трассы – до 3400 км. Регистрация эхосигналов проводится при аналоговом режиме работы ФЭУ в двух параллельно работающих устройствах [3,4]: в дальномерном канале – при превышении сигналом заданных пороговых уровней, с погрешностью измерения дальности 1,5 м, и в лидарном канале – при оцифровке сигнала в шестирядном АЦП с временным дискретом 20 нс (3 м).

Управление работой лидара либо полностью ручное, либо полуавтоматическое (включение блоков и устройств лидара на прогрев осуществляется заранее по командам от ЭВМ орбитальной станции, а при проведении непосредственно сеанса измерений требуется участие оператора-космонавта).

Для задания положения элементов конструкции орбитальной станции, расположенных на ней приборов и ориентации станции при движении на орбите используется ряд правых систем координат [5]: связанная система координат (ССК) и базовая система координат (БСК). ССК по своему определению связана со станцией и предназначена для задания направления ее осей и модулей, положений научных приборов и направления их осей, центр ССК располагается в центре масс станции. При этом ось $+O_b X_b$ совпадает с осью симметрии базового блока (самой станции) и направлена в сторону, противоположную направлению полета при выведении станции на орбиту, ось $+O_b Y_b$ лежит в плоскости поперечного сечения станции и направлена в сторону одного из стабилизаторов, направление оси $+O_b Z_b$ определяет правую систему координат (рис. 1). Подобным образом строится ССК орбитальных модулей.

Привязка направления оси зондирования лидара к системе координат станции «Мир» и модуля «Спектр» показана на рис. 1. Относительно системы координат базового блока ось лидара лежит в плоскости $X_b O_b Z_b$ и повернута по часовой стрелке на угол $\alpha = 1,5^\circ$ от оси « $-O_b X_b$ », если смотреть навстречу направлению оси $+O_b Y_b$. Такое рассогласование осей лидара и станции предусмотрено первоначальной конструктивной установкой приемопередатчика относительно иллюминатора модуля для предотвращения засветок фотоприемного блока от мощного потока лазерного излучения, переотраженного от четырех оптических поверхностей иллюминатора, через который выводится лазерное излучение. При этом направление оси зондирования составляет угол $1,5^\circ$ с осью иллюминатора, последняя, в свою очередь, параллельна оси $+O_m Y_m$ модуля или оси « $-O_b X_b$ » станции.

БСК предназначена для задания ориентации ССК в инерциальном пространстве. При описании движения станции по орбите используются две системы координат. Инерциальная система координат (ИСК) – согласованная экваториальная ИСК с началом отсчета в центре масс Земли. Ось $+O_i X_i$ направлена в среднюю точку весеннего равноденствия на эпоху 3 ч декретного московского времени 1 января 1985 г., ось $+O_i Z_i$ перпендикулярна плоскости среднего экватора и направлена в сторону Северного полюса Земли, ось $+O_i Y_i$ дополняет систему до правой. Орбитальная система координат (ОСК) – начало отсчета располагается в центре масс станции, ось $+O_o X_o$ направлена по проекции вектора скорости станции на плоскость местного горизонта, ось $+O_o Y_o$ направлена по радиусу-вектору станции (радиусу-вектору Земли), ось $+O_o Z_o$ дополняет систему до правой.

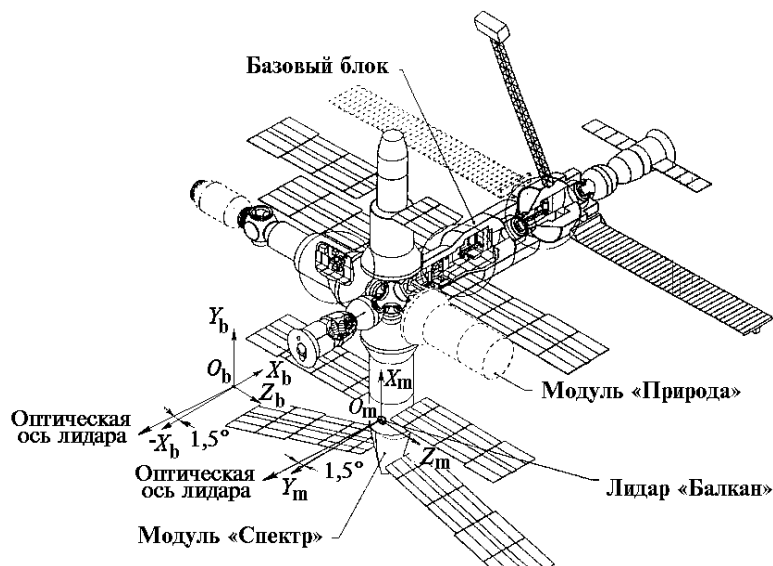


Рис. 1. Схема размещения лидара «Балкан» на модуле «Спектр» орбитальной станции «Мир» и привязка оптической оси лидара к связанной системе координат модуля и базового блока станции. Центры систем координат станции $O_b X_b Y_b Z_b$ и модуля $O_m X_m Y_m Z_m$ для наглядности изображены из соответствующих центров масс

Для выполнения космических экспериментов осуществляют специальные виды режимов ориентации станции, когда оси ССК станции либо совмещают с осями БСК, либо разворачивают относительно БСК на заданные углы. Существует несколько модификаций режимов ориентации станции в ИСК и ОСК, в зависимости от углов разворота систем координат ССК и БСК [5]. Во время работы лидара «Балкан» использовались два режима ориентации, обозначаемые как ИСК2 и ОСКр (р – расчетное). Основным режимом ориентации станции в полете является ИСК2, что связано с ее энергообеспечением через солнечные батареи, при этом ось $+O_bX_b$ совмещается с проекцией направления на Солнце в плоскости орбиты, а направление оси $+O_bY_b$ определяется из условий перпендикулярности к плоскости орбиты и минимальности значения угла между этой осью и направлением на Солнце.

Упрощенно режим полета станции в ИСК2 показан на рис. 2,а. За счет того, что в режиме ИСК2 ось $+O_bX_b$ станции все время направлена в одну точку пространства (на Солнце), при полете в этой ориентации угол между направлением оптической оси лидара и надиром все время изменяется. За счет этого осуществляется произвольное сканирование лазерным пучком в плоскости орбиты, и соответственно – постоянное изменение наклонной дальности зондирования. Ось лидара оказывается наиболее близкой к надирному направлению только в краткие моменты времени – в середине света на витке, когда ось $+O_bX_b$ близка к радиусу-вектору Земли (с учетом величины угла $\alpha = 1,5^\circ$). Однако в этом случае условия работы лидара оказываются наихудшими по фоновым засветкам (наибольшая высота Солнца над местным горизонтом). Из рисунка видно, что зондировать подстилающую поверхность и атмосферу Земли на теневой стороне невозможно, поскольку при ориентации оси $+O_bX_b$ на Солнце ось лидара направлена вне земной поверхности.

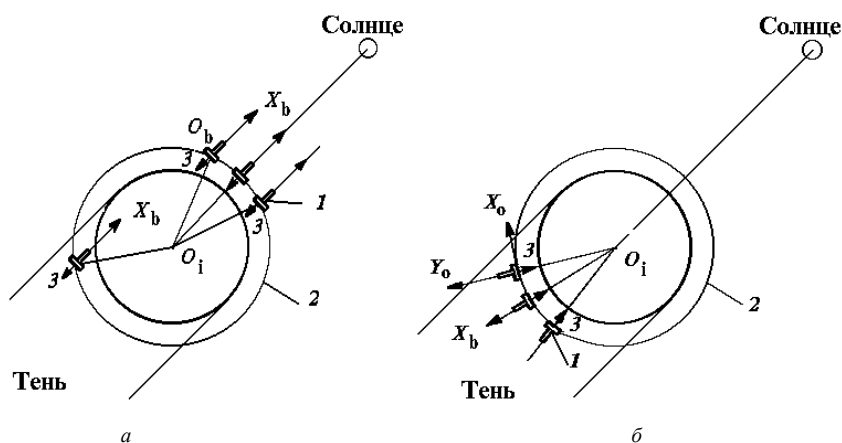


Рис. 2. Режимы ориентации станции на орбите: 1 – станция; 2 – траектория орбиты; 3 – оптическая ось лидара; O_i – центр инерциальной системы координат (Земли); $O_oX_oY_oZ_o$ – орбитальная система координат. а – режим ориентации ИСК2; б – режим ориентации ОСКр

В режиме расчетной орбитальной системы координат (ОСКр) с заданного момента времени осуществляется требуемая ориентация осей станции относительно осей ОСК, а затем поддерживается стабилизация режима полета в этой ориентации на время проведения КЭЛЗ, после чего станция снова возвращается в режим ориентации ИСК2. Режим ОСКр позволяет установить и удерживать ориентацию оси лидара в надир на любом выбранном участке траектории полета (рис. 2,б). В этом случае ось лидара во время проведения КЭЛЗ направлена вдоль оси « $-O_oY_o$ » ОСК, а ось станции $+O_bX_b$ отклонена от оси $+O_oY_o$ на угол $1,5^\circ$. Однако такой режим полета требует дополнительных затрат горючего на переориентацию станции, ее дальнейшую стабилизацию и последующий возврат в исходную ориентацию и является энергетически невыгодным для ЦУП.

3. Методологическое обеспечение сеансов зондирования

3.1. *Планирование космического эксперимента.* Наземное обеспечение сеансов КЭЛЗ включает: 1) перспективное, долгосрочное и краткосрочное планирование в ЦУП;

2) планирование сопутствующих подспутниковых измерений; 3) подготовку сопутствующих фотометрических измерений или видеосъемки с борта станции.

При детерминированности полета орбитальной станции перспективное планирование (от нескольких месяцев до 5 суток) заключается в выборе географических районов проведения эксперимента и выполнении баллистических расчетов в ЦУП для определения моментов времени пролета станции над этими районами с допустимым отклонением от географических координат исследуемых районов и расчета светотеневой обстановки в эти моменты (угловая высота Солнца и Луны, а также ее фаза). Необходимо при этом учитывать режим дня космонавтов (сон, прием пищи, отдых).

Долгосрочное планирование осуществляется не менее чем за 5 суток, с учетом графика загрузки космонавтов штатными работами по станции. В связи с проводимыми корректировками орбиты уточняется до 1 с время пролета над исследуемым районом, определяются моменты времени перевода станции в режим ОСКр и временной интервал полета в этом режиме, который связан с числом импульсов зондирования. Запрашивается в Гидрометцентре прогноз метеобстановки над районом проведения КЭЛЗ (возможное наличие облачности).

Краткосрочное планирование (за двое суток) включает подготовку исходных данных на моменты выдачи команд от бортовой ЭВМ на включение-выключение систем и устройств станции, задействуемых при проведении КЭЛЗ. Составляется и передается радиограмма для космонавтов, в которой указываются точное время начала сеанса измерений (момент запуска лазера), число циклов измерений в сеансе, нештатные отклонения от работы по бортовой инструкции и т.п.

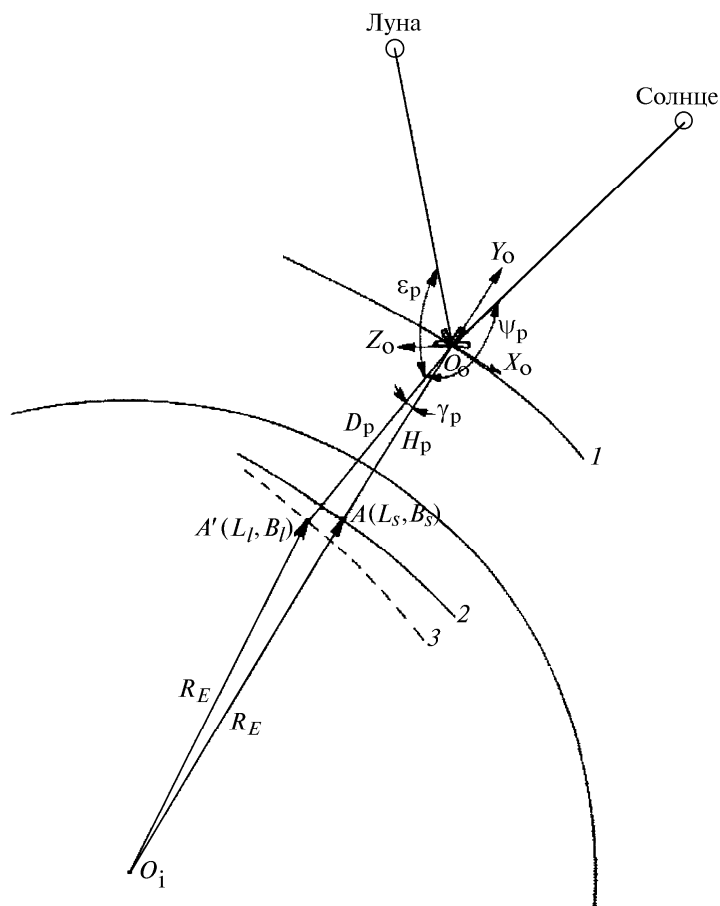


Рис. 3. Параметры орбиты станции и ориентации лидара: 1 – траектория орбиты; 2 – расчетная проекция траектории на поверхности Земли; 3 – расчетная траектория движения лазерного луча по поверхности Земли; $O_o X_o Y_o Z_o$ – орбитальная система координат; O_i – центр Земли; R_E – радиус-вектор Земли

3.2. Расчетное баллистическое обеспечение КЭЛЗ. Рис. 3 поясняет некоторые, используемые в дальнейшем, расчетные параметры орбитального движения станции, ориентации лидара и зондируемых участков на земной поверхности. В центре Земли располагается центр инерциальной системы координат O_i , центр орбитальной системы координат $O_o X_o Y_o Z_o$ распо-

лагается в центре масс станции. Траектория движения оптической оси лидара по поверхности Земли в общем случае не совпадает с проекцией траектории орбиты даже при полете станции в режиме ОСКр из-за неточного знания истинного направления оси лидара относительно ССК станции, ошибок в ее ориентации, флуктуаций ориентации. В ЦУП имеются программы для вычисления текущих расчетных значений высоты траектории орбиты над уровнем океана $H_p(t)$ (отрезок O_oA') с учетом формы геоида; текущих значений географических координат подспутниковой точки A – долготы $L_s(t)$ и широты $B_s(t)$; расчетной наклонной дальности $D_p(t)$ (отрезок O_oA') для расчетного значения угла γ_p между осью лидара и надирным направлением; географических координат точки пересечения оси лидара с поверхностью Земли $A' - L_1(t)$ и $B_1(t)$; текущих расчетных значений углов между осью лидара и направлением на Солнце $\psi_p(t)$ и на Луну $\varepsilon_p(t)$. Расчеты выполняются на основе данных по радиолокационному контролю параметров орбиты с наземных пунктов, получаемых ежедневно. Вышеперечисленные расчетные параметры используются в дальнейшем для оценки полученных результатов зондирования.

3.3. Сопутствующие подспутниковые измерения. Чтобы однозначно интерпретировать получаемые при зондировании из космоса отраженные сигналы, необходимо проводить сопутствующие, так называемые подспутниковые, измерения параметров атмосферы, облачных полей и характеристик подстилающей поверхности. В первоначальной программе работ предусматривалось проведение подспутниковых синхронных измерений со специальных самолетов или кораблей, находящихся в районе выполнения КЭЛЗ. Для этих целей был создан специальный самолетный лидар [6]. Теперь приходится, в основном, ограничиваться информацией Гидрометцентра. Тем не менее в сентябре 1995 г. удалось совместить КЭЛЗ по зондированию океана и облачных полей над одним из районов Северной Атлантики с подспутниковыми измерениями, которые проводились с борта научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» группой сотрудников ИОА СО РАН.

Кроме подспутниковых измерений, оценка метеообстановки (наличие и балльность облачности) на подспутниковой траектории полета может проводиться вторым космонавтом визуально через иллюминатор другого модуля станции или путем автоматической видеосъемки с помощью имеющейся на борту видеокамеры. Проведение таких наблюдений также планируется заранее, но они могут быть выполнены только на освещенной стороне Земли, когда фоновые условия для лазерного зондирования менее благоприятны.

Недостаточно большой угол наклона орбиты не позволил задействовать для проведения сопутствующих подспутниковых измерений лидарные станции, расположенные выше 52° с.ш. (в Томске на 600 км и в Минске на 200 км севернее крайних участков подспутниковой траектории). Кроме того, территория, прилегающая к данным географическим пунктам, не попадала в подспутниковые районы в периоды времени, выделенные ЦУП для проведения сеансов КЭЛЗ.

Гидрометцентр обеспечивает ЦУП метеопрогнозами (краткосрочными) накануне проведения КЭЛЗ и метеосводками (после его проведения) о состоянии атмосферы в районе выполнения экспериментов. В последнем случае в получаемой метеосводке для заданных моментов времени в заданных географических участках подспутниковой траектории полета указываются: тип, балльность и высота нижней границы облачности, скорость и направление ветра. Однако информация по полю облачности является слишком глобальной относительно редких точек измерений, проводимых лидаром.

3.4. Проведение сеансов КЭЛЗ. Начиная с космической экспедиции ЭО-19, все экипажи станции «Мир» проходят обучение на тренажерном макете лидара и сдают соответствующий зачет по знанию основных принципов работы лидара. Кроме того, детально временная последовательность действий оператора-космонавта при проведении сеанса измерений в КЭЛЗ отражена в бортовой инструкции, которая предусматривает действия космонавта с основными и резервными блоками лидара, а также действия при возникновении некоторых типичных нештатных ситуаций. Дополнительно оператор-космонавт руководствуется текстом радиogramмы на проведении КЭЛЗ.

При полуавтоматическом режиме оператор-космонавт принимает управление работой лидара за 10 мин до начала эксперимента и с пульта управления проводит контроль функционирования блоков лидара, в заданный момент времени включает лидар на излучение одиночными или серией импульсов, затем последовательно выключает блоки лидара, предварительно переписав накопленные цифровые массивы лидарных сигналов на бортовые магнитофоны радиотелеметрической системы станции.

3.5. Телеметрическая информация. Телеметрическая информация (ТМИ) лидара «Балкан» состоит из двух частей: цифровых массивов ТМИ, содержащих оцифрованные выборки амплитуд лидарных сигналов с паспортными данными цикла измерений и аналоговых сигналов телеметрического контроля, свидетельствующих о работоспособности отдельных систем и устройств лидара. В состав последних входит также информация об измеренной дальности D_n , определяемая по первому пороговому уровню дальномерного канала лидара [3,4].

В сеансе измерений цифровые массивы ТМИ накапливаются в буферном запоминающем устройстве лидарного канала. Сигналы телеметрического контроля фиксируются на бортовые магнитофоны станции при каждом цикле измерений, что позволяет объективно оценивать работоспособность составных частей лидара и действия оператора-космонавта по управлению лидаром, выполняемые в процессе сеанса.

Передача на Землю через радиотелеметрическую систему всей информации, полученной в сеансе КЭЛЗ, производится во время пролета станции над одним из наземных измерительных комплексов, затем ТМИ передается в ЦУП. В общем случае предварительно расшифрованная службами ЦУП ТМИ поступает в распоряжение постановщика эксперимента спустя 1,0–1,5 ч после проведения измерений.

3.6. Получение и обработка результатов измерений. При оперативной обработке всего массива ТМИ, поступившего в ЦУП в сеансе связи со станцией, из него первоначально выделяется информация, относящаяся к лидару «Балкан». Аналоговые сигналы телеметрического контроля функционирования лидара после обработки ЦУП выдаются постановщику эксперимента в виде распечаток, которые позволяют проводить анализ последовательности включения и работы составных частей лидара во время проведения эксперимента. Цифровые массивы ТМИ формируются в виде файлов. Разработана специальная программа, которая позволяет оперативно проводить обработку полученного цифрового массива и выделять искомую информацию о паспортных данных каждого цикла измерения и о форме отраженного сигнала в этом цикле в виде графика и временной последовательности цифровых значений его амплитуды.

Предварительная обработка результатов каждого сеанса КЭЛЗ по дальномерному каналу включает сопоставление полученных измеренных значений дальности D_n с расчетными значениями наклонной дальности $D_p(t)$ для соответствующих моментов времени, исключение из них сигналов ложного срабатывания от фоновых засветок. Ложное срабатывание пороговой системы дальномерного канала лидара происходит в том случае, когда импульс помехи по амплитуде превышает уровень первого порога и попадает во временные ворота преобразователя время-код. Оно определяется по двум критериям: либо D_n полученного сигнала превышает D_p более чем на величину систематической ошибки измерений, либо D_n меньше, чем $(D_p - 12 \text{ км})$, что может соответствовать сигналу от объектов, расположенных на высотах более 12 км от поверхности Земли.

Результаты выполненных КЭЛЗ показывают, что помеховые срабатывания наиболее часты при работе лидара на освещенной стороне Земли в режиме ИСК2 (до 50% в сеансе измерений). Наблюдались они также в режиме ОСКр на теневой стороне при фазах Луны более 0,9 (не более 3%). От облаков с малой оптической плотностью и малым градиентом коэффициента рассеяния амплитуда эхосигнала обычно не превышает первый пороговый уровень, что фиксируется как отсутствие сигнала. В этом случае не регистрируется и эхосигнал от поверхности Земли.

При проведении экспериментов над материком дополнительно уточняются результаты метеосводок Гидрометцентра о наличии облачности в районе выполнения эксперимента и точная география координат движения лазерного луча, чтобы учесть рельеф местности, так как значения D_p рассчитываются для уровня океана.

Предварительная обработка файлов ТМИ включает выделение лидарных сигналов из всего большого цифрового массива, которые ограничены контрольными калибровочными сигналами, записываемыми до начала и после окончания сеанса КЭЛЗ. Далее из выделенной части цифрового массива выбираются сигналы, которые по дальности и паспортным данным совпадают с сигналами дальномерного канала. Полученные оцифрованные значения дискретных выборок амплитуды лидарного сигнала используются для последующего определения характеристик рассеивающего объекта при обработке сигнала по заданным алгоритмам [4].

3.7. Пространственно-временная привязка результатов измерений. Рассмотренная в [7] процедура пространственной привязки измерений значительно упростилась в связи с развитием персональных компьютеров (см. п.3.2). Сравнение измеренных значений наклонных дальностей D_n при дальнометрировании океанической поверхности с расчетными баллистическими значениями $D_p(t)$ показывает, что существует систематическая погрешность в определении

величины угла α , которая составляет $\Delta\alpha \cong 0,3^\circ$, т.е. реальное значение этого угла равно $(1,5 \pm 0,3)^\circ$. На рис. 4 представлена расчетная зависимость приращения наклонной дальности $\Delta D = D_p - H_p$ от угла отклонения оси зондирования от надирного направления γ для реальной высоты орбиты $H_p = 400$ км. При этом значение D_p кроме величины $H_p/(1/\cos \gamma - 1)$ включает приращение наклонной дальности, связанное со сферичностью Земли, которое начинает существенно сказываться при $\gamma > 3^\circ$.

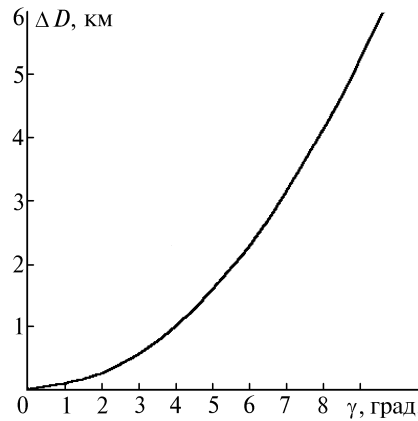


Рис. 4. Увеличение наклонной дальности зондирования в зависимости от угла отклонения оси лидара от надира

Анализ данных по стабильности ориентации ОС при полете в режимах ИСК2 и ОСКр показал, что в течение 10 мин наблюдаются колебания направления осей ССК относительно осей БСК в пределах погрешностей угловых датчиков станции, составляющих $\pm 0,1^\circ$. При зондировании в надирном направлении такая погрешность приводит к несущественным ошибкам в определении высоты полета станции (до $\pm 0,5$ м) и значительному смещению центра пятна излучения на земной поверхности (более ± 600 м). Как видно из рис. 4, при одной и той же величине систематической ошибки $\Delta\alpha$ величина ΔD существенно возрастает с ростом угла γ . Из-за неопределенности величины $\Delta\alpha \cong 0,3^\circ$ реальные координаты точки пересечения лазерного луча с поверхностью Земли на уровне океана будут смещены относительно расчетных значений $L_1(t)$ и $B_1(t)$ (см. рис. 3).

Неоднозначность в пространственной привязке данных зондирования возникает и за счет погрешностей, связанных с временной привязкой цикла измерения. Временная привязка результатов измерений лидарных сигналов производится к системе единого времени, имеющейся на борту станции (декретное московское время) [3]. При записи массивов сигналов телеметрического контроля на бортовые магнитофоны используется односекундная шкала времени, что сразу дает пространственную неопределенность в наземных координатах подспутниковой точки в $\pm 3,9$ км. Поскольку период излучения лазерных импульсов составляет 5,53 с, то время регистрации цикла измерений (сигнала D_{ii}) осуществляется в телеметрической системе с минимальной погрешностью $\pm 0,5$ с. Максимальная погрешность может достигать 1 с из-за накопления временных задержек сигналов телеметрического контроля на релейных схемах, через которые проходят сигналы.

Дополнительная ошибка между значениями D_p и D_{ii} возникает из-за погрешностей в системе радиолокационного контроля орбиты станции. По информации, полученной у баллистиков ЦУП, для Северного полушария погрешность в величине H_p может составлять 150 м, в Южном полушарии, где пунктов радиоконтроля орбиты нет, величина погрешности увеличивается. Поскольку все баллистические расчеты привязываются к моменту времени T_e и долготе L_e , при которых проекция траектории орбиты пересекает земной экватор, то ошибки в 1 с приводят к погрешностям расчетной высоты орбиты до 20–30 м и смещению географических координат подспутниковой точки до 8 км.

Детальный анализ погрешностей пространственно-временной привязки результатов измерений сеанса КЭЛЗ требует дополнительных уточнений и выходит за рамки данной статьи. Некоторые оценки погрешности таких измерений, связанные с наклоном отражающей поверхности и отклонением направления зондирования, приведены в [8].

4. Алгоритмы интерпретации лидарных сигналов

Общая схема обработки лидарных сигналов включает в себя последовательные решения следующих задач:

- 1) фильтрация (выделение полезного сигнала);
- 2) классификация (распознавание типа зондируемых объектов);
- 3) оценка параметров объектов.

В качестве элементов классификации были выбраны существенные независимые признаки лидарного сигнала, достоверно характеризующие зондируемые объекты: длительность переднего фронта импульса, дальность до объекта, интегральное значение S -функции лидарного сигнала. Эти характеристики несут информацию о физическом состоянии исследуемого объекта, поскольку их значения представляют интерес для метеорологии, климатологии, а также для отработки методики расчета параметров орбиты. Среди таких характеристик можно назвать высоту верхней границы облаков (ВВГО) или дальность до поверхности Земли, оптические параметры облаков и подстилающей поверхности. Например, интеграл S -функции напрямую связан с отражающими свойствами облаков и подстилающей поверхности.

В предположении линейного нарастания коэффициента рассеяния $\sigma(z)$ имеем

$$\frac{d\sigma}{dz} = \frac{1}{2(z_m - z_0)^2} = \ln \frac{(z_2 - z_0)}{(z_1 - z_0)} [(z_2 - z_0)^2 - (z_1 - z_0)^2]^{-1},$$

что подразумевает связь функции $\sigma(z)$ с градиентом $d\sigma/dz$. Устойчивая оценка последнего может быть получена по методу наименьших квадратов, т.е.

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

где z_0 и z_m – дистанции, соответствующие началу и максимуму отраженного сигнала; z_1 и z_2 – дистанции, соответствующие уровню равных амплитуд сигнала на переднем и заднем фронтах ($z_1 < z_2$).

Как показывают модельные расчеты и подтверждают экспериментальные результаты, стабильность полученного решения ухудшается, если при обработке используется задний фронт лидарного сигнала. Если дополнительно принять во внимание тот факт, что эта часть лидарного сигнала содержит помехи, связанные с многократным рассеянием, то можно рекомендовать использовать только параметры переднего фронта для оценки среднего значения коэффициента рассеяния облака.

Как отмечалось выше, система регистрации лидара «Балкан» имеет дальномерный канал, который работает параллельно с лидарным каналом. Его работа, основанная на многопороговом принципе [3, 4], позволяя, используя аппроксимацию, реконструировать форму лидарного сигнала и затем использовать эти данные при обработке. Следует заметить, что сигнал, отраженный от облаков и водной поверхности, имеет несимметричную форму, в то время как сигнал, отраженный от твердой поверхности, обычно симметричен. Однако если направление зондирования отклоняется от надира или лазерный луч попадает на наклонную поверхность, то форма отраженного сигнала становится слегка несимметричной. Как показано в [8], уширение сигнала дает информацию о наклоне поверхности, а значение амплитуды – о коэффициенте отражения.

5. Общее описание проведенных космических экспериментов

Исходя из режимов ориентации станции «Мир» в полете и графика загрузки космонавтов другими работами, выбор районов зондирования был ограничен. На рис. 5 представлены географические районы проведения КЭЛЗ в 1995–1996 гг. Для примера на нем также изображена проекция на земную поверхность одного витка, начинающегося при долготе экватора 103° , пунктиром показано продолжение следующего витка. Сплошными отрезками изображены проекции участков орбит, где выполнялись эксперименты по зондированию осенью 1995 г. (не считая обязательных тестовых включений лидара, проведено 16 сеансов КЭЛЗ, из них только 3 в режиме ориентации ОСКр). Штрихпунктирные отрезки соответствуют экспери-

ментам 1996 г. (проведено 17 сеансов КЭЛЗ, из них 8 в ОСКр на теневой стороне Земли). Осенью 1995 г. наибольшее число экспериментов выполнено над районом юго-восточнее п-ва Лабрадор, где проводились сопутствующие подспутниковые синхронные измерения атмосферы и океана во время пролета станции. В 1996 г. зондировались атмосфера и подстилающая поверхность пустынной Австралии и различные участки поверхности океана в Южном полушарии.

Т а б л и ц а 1

Описание экспериментов 1995 г.

N п/п	Дата сеанса	Время ДМВ начало конец	Количество циклов	Д.изм. л.срб. (сигн. от обл.)	Ориентация станции	Координаты		Облачность	Угол места, град. Солнца*	Примечания
						B_s , град.	L_s , град.			
1	10.08.95	09:11:29 09:13:14	20	19/0 (0)	ОСКр	48,67 45,91	312,37 321,10	средняя	< -15,0	Повышено питание ФЭУ
2	11.08.95	08:13:55 08:15:40	20	20/0 (11)	»	51,72 50,82	298,80 309,13	»	< -15,0	»
3	13.08.95	08:01:30 08:03:15	20	20/0 (4)	»	49,74 47,36	307,34 316,53	сильная	< -15,0	»
4	27.08.95	21:04:00 21:05:45	20	??	ИСК2а	-27,73 -19,65	251,64 256,13	-	-	ТМИ не получена
5	31.08.95	20:33:55 20:35:40	20	9/2 (2)	»	-22,04 -16,88	237,98 242,29	средняя	41÷48	-
6	08.09.95	16:48:22 16:50:07	20	16/0 (2)	ИСК	39,50 43,35	306,37 313,45	сильная	48÷49	-
7	09.09.95	22:20:19 22:22:04	20	11/2 (0)	»	44,16 40,43	305,73 313,01	»	28÷23	-
8	12.09.95	18:01:09 18:02:54	20	4/8 (1)	»	50,93 49,15	327,67 337,47	слабая	42÷20	-
9	15.09.95	20:01:46 20:03:31	20	18/0 (0)	»	42,90 39,00	307,81 314,78	сильная	45÷44	-
10	18.09.95	18:51:31 18:53:16	20	9/0 (0)	»	43,84 40,07	305,58 312,79	»	48÷50	-
11	21.09.95	17:41:42 17:43:27	20	7/3 (1)	»	43,75 39,97	305,55 312,73	средняя	45÷50	-
12	24.09.95	16:32:26 16:34:10	60	16/1 (0)	»	43,05 39,21	306,74 313,68	»	39÷46	-
13	26.09.95	11:59:59 12:05:25	60	5/8 (2)	»	-15,47 -31,11	63,90 78,29	»	65÷43	-
14	27.09.95	17:16:00 17:21:26	60	4/19 (3)	»	-17,18 32,59	339,08 353,82	»	69÷47	-
15	28.09.95	16:25:56 16:31:20	60	1/16 (1)	»	-28,86 -42,29	357,41 16,05	»	57÷34	-
16	29.09.95	15:29:57 15:35:22	60	0/14	»	-23,40 37,91	359,80 16,42	»	68÷46	Лазер не прогрет

* В первых экспериментах данные по Луне не оценивались.

В табл. 1 представлено краткое описание КЭЛЗ, проведенных в 1995 г. В ней указаны: дата; время проведения (декретное московское – часы:минуты:секунды) и количество циклов измерений в сеансе; отношение полученного числа достоверных измерений (в дальномерном канале) в проведенном сеансе к числу ложных срабатываний от фоновых помех (Д.изм./л.срб.). В скобках указано число сигналов, отраженных от облаков в данном сеансе. Сумма числителя и знаменателя в большинстве случаев меньше общего числа циклов измерений. Это объясняется тем, что в некоторых циклах измерений эхосигналы по амплитуде не достигали уровня первого порога дальномерного канала и не регистрировались, т.е. в этом случае лазерные импульсы попадали на слабо рассеивающие облака.

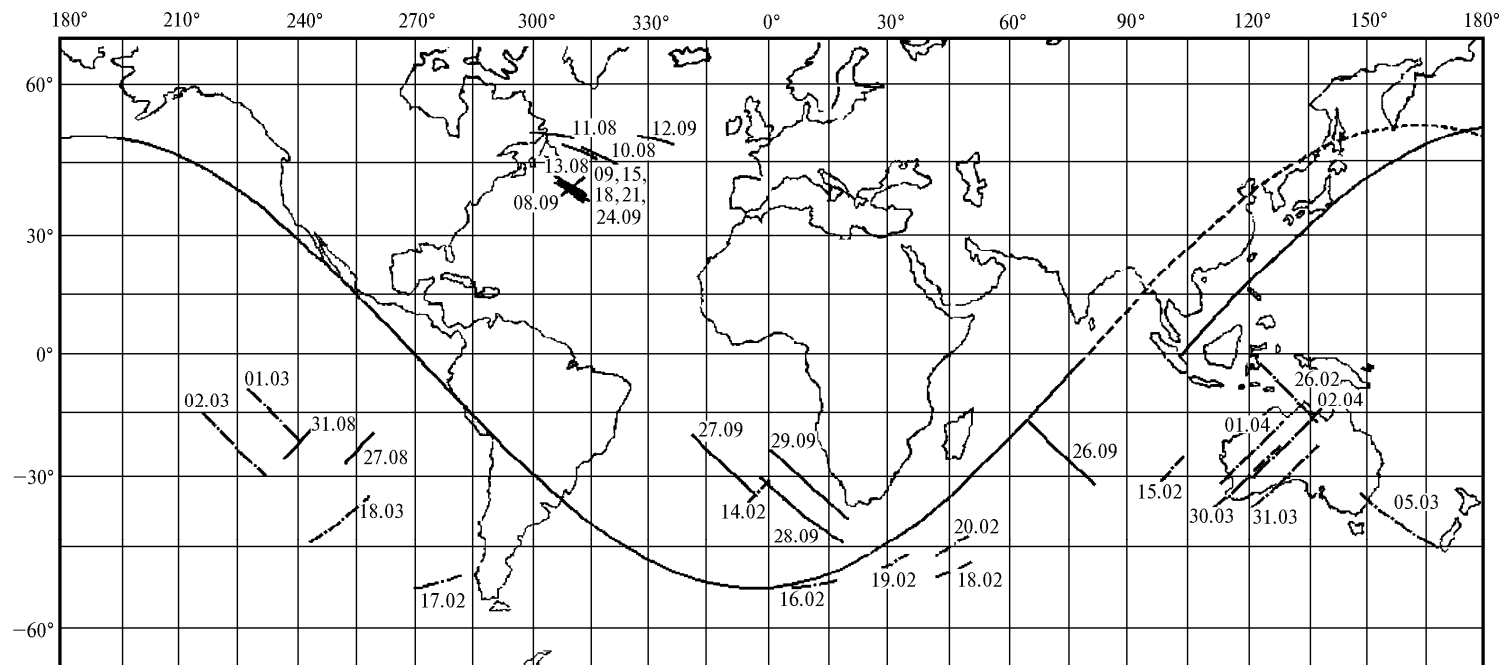


Рис. 5. Проекция участков трасс полета станции «Мир» при проведении сеансов лазерного зондирования

Указаны также режим ориентации станции при проведении КЭЛЗ, начальные и конечные координаты (широта и долгота) подспутниковых точек сеанса (см. рис. 3). Данные о типе, балльности и высоте нижней границы облачности в районе измерений брались из сводок Гидрометцентра (в таблице представлены обобщенные данные). Для оценки фоновых ситуаций приведены величины начального и конечного значений угловой высоты Солнца или Луны (при измерениях на теневой стороне Земли) над местным горизонтом во время пролета станции. В примечаниях указаны отклонения от штатных ситуаций.

Таблица 2

Описание экспериментов 1996 г.

N п/п	Дата сеанса	Время ДМВ начало конец	Количество циклов	Д.изм. л.срб. (сигн. от обл.)	Ориентация станции	Координаты		Облачность	Угол места, град.		Примечания
						B_s , град.	L_s , град.		Солнца	Луны фаза	
1	13.02.96	13:26:00 13:27:45	20	??	ИСК2а	-41,51 -38,25	45,58 51,01	средняя	< -15,0	-	ТМИ не получена
2	14.02.96	17:12:00 17:13:45	20	14/2 (0)	»	-34,36 -29,80	353,81 359,14	»	60÷58	-	-
3	15.02.96	10:09:30 10:10:49	20	8/3 (2)	»	-31,77 -26,97	98,69 103,81	сильная	61÷60	-	-
4	16.02.96	12:07:59 12:09:44	20	2/6 (1)	»	-51,74 -50,88	5,50 15,83	»	38÷44	-	Помехи по каналу РТС
5	17.02.96	18:58:00 18:59:44	20	0/8 (0)	»	-50,34 -48,25	269,80 279,17	»	42÷48	-	-
6	18.02.96	10:23:26 10:25:10	20	??	ИСК	-48,83 -46,35	42,09 50,72	»	45÷51	-	ТМИ не получена
7	19.02.96	11:02:01 11:03:46	20	1/10 (0)	»	-48,39 -45,55	28,06 36,66	»	43÷49	-	-
8	20.02.96	10:09:01 10:10:46	20	0/0 (1)	»	-46,62 -43,34	41,54 49,51	»	44÷51	-	Неисправность дальномерного канала
9	26.02.96	18:08:03 18:13:29	60	6/0 (1)	ОСКр	-4,56 39,00	123,79 136,27	»	< -70	12÷-6 0,50	-
10	01.03.96	09:54:56 10:00:21	60	60/0 (19)	»	-7,18 -23,36	227,22 240,01	средняя	< -55	66÷42 0,86	Повышено питание ФЭУ
11	02.03.96	10:35:04 10:40:30	60	54/0 (6)	»	-13,17 -28,96	215,94 229,77	»	< -50	63÷44 0,91	»
12	05.03.96	15:42:02 15:47:28	60	54/1 (2)	»	-35,29 -46,92	143,17 165,24	»	< -37	43÷40 1,00	»
13	18.03.96	10:25:00 10:30:26	60	57/0 (24)	»	-44,09 -28,44	242,54 265,34	»	< -43	-42 0,0	»
14	30.03.96	14:57:58 15:03:24	60	53/0 (11)	»	-38,79 -24,41	111,37 128,30	слабая	< -17	37÷54 0,80	»
15	31.03.96	14:03:56 14:09:22	60	58/0 (12)	»	-38,10 -23,57	120,25 136,88	средняя	< -15	34÷54 0,87	»
16	01.04.96	14:44:14 14:49:40	60	45/2 (13)	»	-32,39 -16,96	112,16 126,83	слабая	< -17	34÷55 0,93	»
17	02.04.96	13:50:59 13:56:26	60	56/1 (11)	»	-29,44 -13,64	123,27 137,24	»	< -16	28÷46 0,97	»

При 20 импульсах в сеансе измерений его длительность составляет 105 с, при 60 – 326 с. Во время проведения сеансов измерений на теневой стороне Земли чувствительность лидара повышалась за счет увеличения напряжения питания ФЭУ [4]. Используемый в некоторых сеансах КЭЛЗ модифицированный режим ориентации станции ИСК2а отличается от ИСК2 тем, что ось станции $+O_b X_b$ не лежит в плоскости орбиты, а отклонена от нее на дополнительный угол, могущий составлять несколько десятков градусов. Это периодически делается для того, чтобы обеспечить более равномерный солнечный обогрев элементов станции с боков и улучшить тепловой режим внутри станции. Такая ориентация ухудшала условия проведения сеансов КЭЛЗ, поскольку даже в середине света на витке (см. рис. 2,а), когда наклонная дальность зондирования минимальна, ось лидара отклонена на угол (обычно равный $5 \div 10^\circ$) от надирного направления. Все это приводит к увеличению дальности зондирования в режиме полета ИСК2а и, соответственно, к уменьшению амплитуды отраженного сигнала. В последнем сеансе

се измерений лазер не вышел на рабочий режим, поэтому в системе регистрации зафиксированы только помеховые сигналы (предположительно фоновые помехи).

В феврале 1996 г. работы с лидаром на борту станции возобновились. Краткие сведения о выполненных сеансах КЭЛЗ представлены в табл. 2. Наибольшее число достоверных измерений получено при полете станции в режиме ОСКр на теневой стороне Земли при повышенном напряжении питания ФЭУ. В ряде сеансов телеметрическая информация не была получена из-за организационных неувязок между службами ЦУП.

Следует отметить, что при полнолунии или фазах Луны более 0,9 на теневой стороне Земли наблюдались единичные ложные срабатывания от фоновых помех в дальномерном канале. Зондирование Земли в режиме полета ИСК2 на участках орбиты, близких к высоким широтам (более 45°), в условиях значительной балльности облачности (по данным Гидрометцентра) и большой высоте Солнца дало мало репрезентативных результатов даже в дальномерном канале лидара.

6. Некоторые предварительные экспериментальные результаты

В качестве примера ниже представлены предварительно обработанные наиболее характерные данные измерений. На рис. 6 показаны результаты дальнометрирования океанической поверхности в 1995 г., которые разделены на две группы. Левая часть соответствует измерениям вблизи надирного направления зондирования, правая – при приближении к нему. Для сопоставления результатов различных сеансов КЭЛЗ по оси абсцисс отложена временная шкала сеанса измерений, в которой первому измерению соответствует нулевой момент времени, а 20-му – 105 с. Расчетные значения наклонной дальности $D_p(t)$ показаны сплошными кривыми, горизонтальными черточками – зарегистрированные значения измеренной дальности D_n , которые при расшифровке ТМИ имеют временную неопределенность в 1 с (из-за нецелого значения периода посылки зондирующих импульсов). Детальный анализ зависимости величины D_p от t показывает, что она изменяется под действием двух факторов. Во-первых, за счет эллиптичности орбиты (высота $H_p(t)$ за 1с изменяется примерно на 10 м); во-вторых, при полете в режиме ориентации ИСК2, за счет постоянного изменения угла отклонения γ оптической оси лидара от надирного направления (см. рис. 2,а и 3). Действие этих двух факторов приводит к тому, что минимальное значение расчетной наклонной дальности $D_p(t)$ достигается не при минимальном значении γ . Знак производной $dH_p(t)/dt$ зависит от того, на какой части витка орбиты производятся измерения, поэтому экстремум функции $D_p(t)$ может опережать или отставать от экстремума функции $\gamma(t)$ на $5 \div 10$ с.

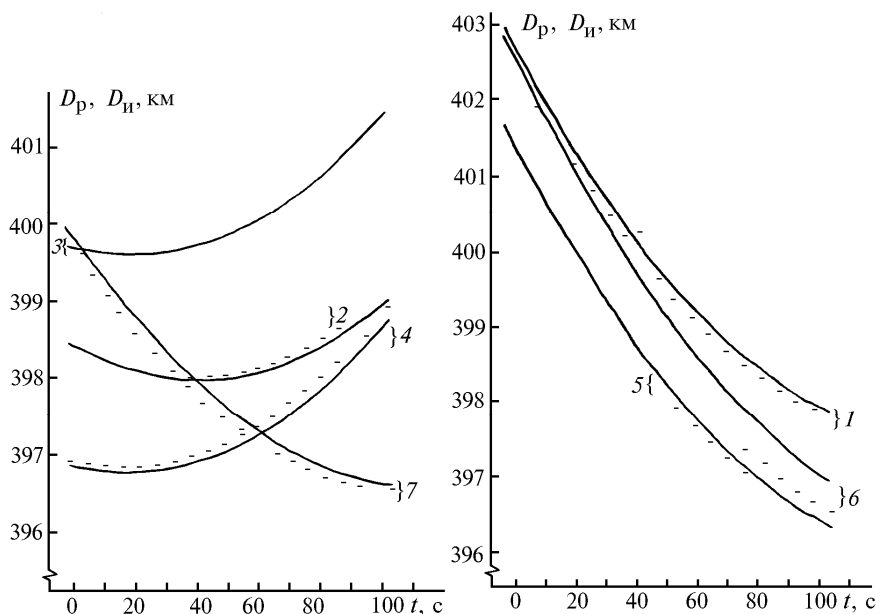


Рис. 6. Сравнение результатов дальнометрирования океанической поверхности с расчетной наклонной дальностью в режиме ориентации ИСК2: 1 – 08.09.95; 2 – 09.09.95; 3 – 12.09.95; 4 – 15.09.95; 5 – 18.09.95; 6 – 21.09.95; 7 – 24.09.95

Систематическая ошибка в результатах измерений связана, во-первых, с тем, то D_n отсчитывается от плоскости первой линзы оптической антенны передатчика, а D_p от центра масс станции,

что дает погрешность в 12 м; во-вторых, с неточным знанием истинного направления оси лидара относительно связанной системы координат станции ($\Delta\alpha \approx 0,3^\circ$), что в соответствии с рис. 4 в зависимости от величины угла γ дает меняющуюся величину ошибки; в-третьих, с погрешностью расчетного значения D_p , которое, исходя из данных радиолокационного контроля параметров орбиты, может достигать 150 м (по информации баллистиков ЦУП). Пересечение тренда D_n с кривой $D_p(t)$ в двух сеансах КЭЛЗ (кривые 2 и 5) говорит о том, что в эти моменты времени истинное и расчетное значения направления оси лидара находились по разные стороны от плоскости орбиты станции и составляли с ней одинаковый угол.

Характерные примеры измеренных профилей высоты верхней границы облачности (ВВГО) и подстилающей поверхности при зондировании южной части Тихого океана представлены на рис. 7,а,б, где по шкале абсцисс отложен номер цикла измерения в сеансе КЭЛЗ, а точками отмечены результаты измерений. В первом случае (см. рис. 7,а) наблюдаются поля редкой низкой облачности, которая на последнем участке становится почти сплошной. По данным метеосводки, в начале трассы была кучевая облачность (5–8 баллов с ВНГО 600–1000 м), в середине трассы – слоисто-кучевая (5–8 баллов, ВНГО 600–1000 м), в конце трассы – слоисто-кучевая (3–6 баллов, ВНГО 1000–1500 м). Облака нижнего и верхнего ярусов наблюдались лидаром 18.03.96 (рис. 7,б), причем в конце первой половины трассы зондирования облачность была высокой. По данным Гидрометцентра, в начале трассы облачность слоисто-кучевая (6–9 баллов, ВНГО 300–600 м), в середине – кучевая (3–6 баллов, ВНГО 600–1000 м), в конце – отдельные кучевые облака (0–3 балла, ВНГО 1000–1500 м). С учетом глобальности метеоданных и различием в оцениваемых показателях границы облачности (лидар–верхняя, метеоданные–нижняя) относительное совпадение результатов можно считать удовлетворительным. В отдельных циклах измерений уровень отраженного сигнала не превышал первого порога и не регистрировался, что отмечено на рисунке словом «нет». Это характерно для облачности с большим значением ВВГО.

На рис. 7,в представлены данные зондирования Австралийского материка с последующим выходом трассы зондирования на морскую поверхность (см. рис. 5 и данные табл. 2). В центральной части континента и в северной его части наблюдались поля высокой облачности с ВНГО около 10 км. При высокой Луне в фазе, близкой к полнолунию, было одно ложное срабатывание в дальномерном канале от фоновой помехи над морской поверхностью. По данным Гидрометцентра, в начале трассы перистые облака (0–3 балла ВНГО более 2,5 км), в середине – слоисто-кучевые (1–4 балла, ВНГО 1000–1500 м), в конце трассы – кучево-слоистые облака (3–6 баллов, ВНГО 600–1000 м). В этом сеансе КЭЛЗ расхождение между данными лидара и метеосводкой большие. В качестве интересного момента следует отметить фиксирование устойчивых облачных полей на высотах от 7 до 12 км над пустынной территорией Австралии, которые наблюдались в течение четырех дней подряд: 30, 31 марта и 1, 2 апреля 1996 г.

Как видно из рис. 7 и результатов других сеансов КЭЛЗ, величина систематической ошибки (разница между D_p и D_n по уровню океана) менялась от одного сеанса измерений к другому как по величине, так и по знаку, по причинам, изложенным выше. Кроме того, детальный анализ результатов дальнометрирования показывает, что и в течение одного сеанса измерений имеется некоторый градиент величины систематической ошибки.

В других сеансах измерений соответствие между результатами зондирования облачных полей и метеоданными примерно такое же, как и рассмотренных выше. Следует также отметить, что ложные срабатывания в дальномерном канале при работе на теневой стороне Земли наблюдались на участках подспутниковой трассы, соответствующих прибрежной океанической поверхности.

На рис. 8 представлены некоторые обработанные лидарные сигналы от различных отражающих поверхностей (облака, морская поверхность, суша). Рис. 8,а показывает отраженные сигналы, записанные в лидарном канале, рис. 8,б – в дальномерном. По оси абсцисс на этих рисунках отложены расстояния в пределах отраженного сигнала, по оси ординат – амплитуда сигнала в относительных единицах. Для сигналов дальномерного канала показаны также четыре пороговых уровня. Как видно из рис. 8, сигналы от облаков и земной поверхности являются более интенсивными. Амплитуда сигналов от морской поверхности находится между уровнями второго и третьего порогов. Большинство лидарных сигналов из атмосферы получено от плотных облачных полей, что хорошо иллюстрируется значениями коэффициентов рассеяния, которые приведены на рисунке. Это обуславливает малое число отсчетов в лидарном сигнале, что требует применения специальных алгоритмов обработки.

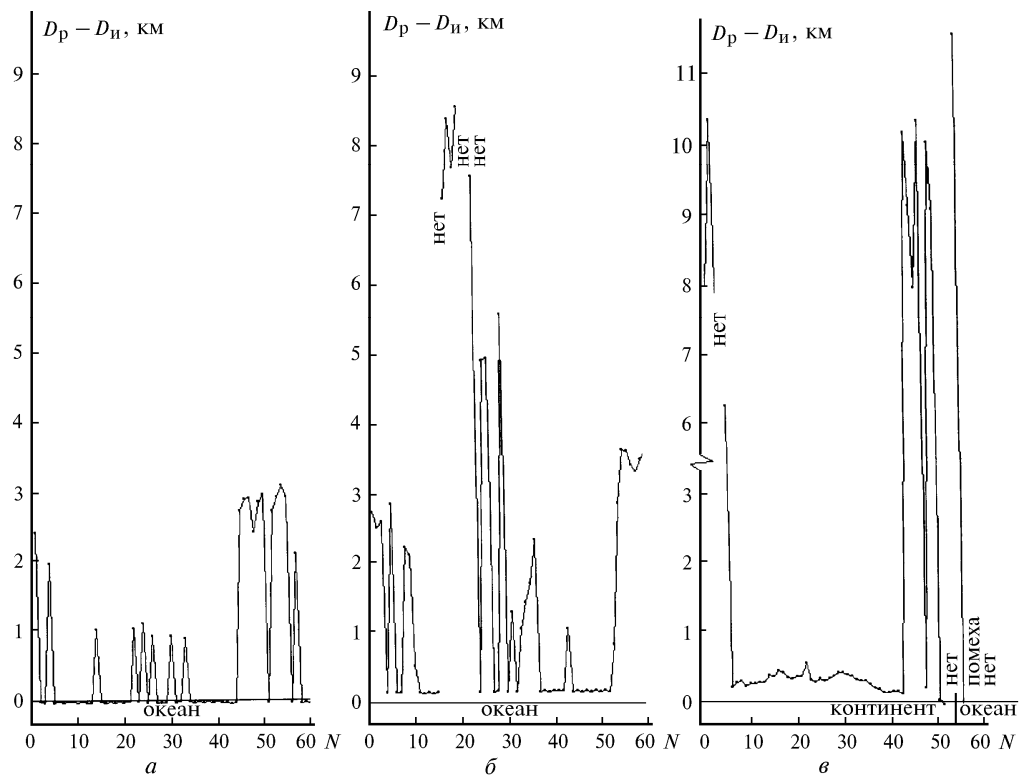


Рис. 7. Профили ВВГО и подстилающей поверхности, измеренные в режиме ориентации ОСКр: а – 01.03.96; б – 18.03.96; в – 02.04.96

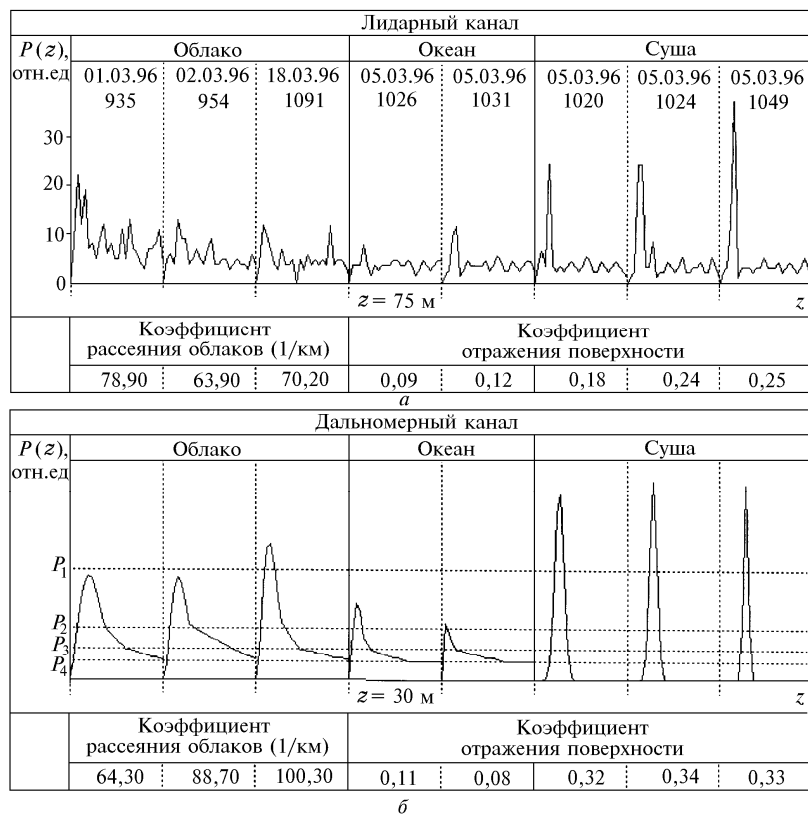


Рис. 8. Примеры некоторых эхосигналов от различных рассеивающих объектов, реконструированные из данных лидарного (а) и дальномерного (б) каналов

7. Заключение

Выполненные лидаром «Балкан» с борта орбитальной станции «Мир» сеансы КЭЛЗ показали его работоспособность. Экспериментально определены рабочие характеристики лидара, которые в целом соответствуют расчетным. Вертикальное пространственное разрешение составляет 3 м, что является рекордным для существующих средств дистанционного космического зондирования. Использование дальномерного канала с погрешностью измерений $\pm 1,5$ м позволяет более чем на порядок повысить точность определения высоты полета орбитальной станции по сравнению с существующими радиолокационными методами контроля высоты орбиты.

Отработаны методические вопросы, связанные с планированием и организацией сопровождения сеансов КЭЛЗ из ЦУП. Накопленный в процессе их выполнения опыт позволит в дальнейшем правильно планировать проведение последующих экспериментов и сопутствующих подспутниковых измерений. Опыт создания лидара «Балкан» и результаты проведенных экспериментов будут учтены при выполнении будущих проектов по лидарам серии «Балкан» [9].

Авторы признательны космонавтам экспедиций ЭО-19, ЭО-20 и ЭО-21 за успешную работу с лидаром во время проведения сеансов КЭЛЗ, сотрудникам группы математического моделирования ЦУП за составление программ и проведение баллистических расчетов, в частности ведущему специалисту в этой области А.И. Манжелею, а также всем службам ЦУП, участвующим в подготовке и проведении сеансов КЭЛЗ с первым российским лидаром «Балкан».

1. McCormick M. P., Winker D. M., Browell E. V. et al. // *Bul. Meteorol. Society*. 1993. V. 74. N 2. P. 205–214.
2. Balin Yu. S., Burkov V. V., Znamenskii I. V. et al. // 15-th Inter. Laser. Radar Conf. Abstracts. Tomsk, 1990. V. 1. P. 12–14.
3. Balin Yu. S., Mel'nikov V. E., Tikhomirov A. A. et al. // *Proc. SPIE. Lidar Techniques for Remote Sensing*. 1994. V. 2310. P. 144–151.
4. Балин Ю. С., Знаменский И. В., Зуев В. Е. и др. // *Оптика атмосферы и океана*. 1995. Т. 8. N 9. С. 1332–1343.
5. Методика П24586–117. Ч. 1. Кн. 1. НПО «Энергия», 1986. 48 с.
6. Абрамочкин А. И., Пеннер И. Э., Шаманаев В. С. // *Оптика атмосферы*. 1991. Т. 4. N 3. С. 264–265.
7. Лазерное зондирование атмосферы из космоса / Под ред. В. М. Захарова. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 215 с.
8. Vufton J. L. // *Proc. IEEE*. 1989. V. 77. N 3. P. 463–477.
9. Зуев В. Е., Балин Ю. С., Зуев В. В. и др. // *Оптика атмосферы и океана*. 1995. Т. 8. N 12. С. 1718–1726.

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск
Конструкторско-технологический институт «Оптика» СО РАН, Томск

Поступила в редакцию
26 ноября 1996 г.

Yu. S. Balin, A. A. Tikhomirov, S. V. Samoilova. **Tentative Results on Clouds and Underlying Surface Sounding with Lidar «Balkan».**

The results of tentative processing of the data on laser sounding of the Earth surface and cloudy fields, obtained from the first Russian spaceborne lidar «Balkan», are discussed in the paper. The lidar is set upon the orbital station «Mir» and operates in the steady state since August, 1995. The parameters of the station and lidar, affecting the measurements, and the methodology basis of the experiments are presented. The sounding of the marine and terrestrial surfaces and cloudy fields in various regions under various light and shadow conditions at two orientational regimes of the station is described.