

## АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 681.783.25: 629.795

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

## К ОЦЕНКЕ НАКЛОННОЙ ДАЛЬНОСТИ, ИЗМЕРЯЕМОЙ ЛИДАРОМ «БАЛКАН» С БОРТА ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ «МИР»

Рассмотрены особенности дальнометрирования космическим лидаром «Балкан» океанической поверхности в двух режимах полетной ориентации орбитальной станции «Мир», которые использовались при проведении сеансов лазерного зондирования. Проанализированы закономерности и случайные флуктуации изменения ориентации оптической оси лидара в этих сеансах. Приведена оценка возможных причин систематических расхождений между расчетными баллистическими данными и результатами измеренных значений наклонной дальности в обоих режимах полета станции.

## Введение

Возможные погрешности определения дальности с помощью лазерных космических альтиметров рассмотрены ранее в работе [1]. Некоторые предварительные результаты дальнометрических измерений поверхности Земли с помощью лидара «БАЛКАН» были представлены нами в [2–4].

В данной статье рассматриваются особенности дальнометрирования космическим лидаром «БАЛКАН» океанической поверхности в двух режимах полетной ориентации орбитальной станции «Мир», которые использовались при проведении экспериментов лазерного зондирования в 1995–1996 гг. [2, 3, 5]. В режиме дежурной полетной ориентации станции, именуемом ИСК2, при привязке связанной системы координат станции к базовой инерциальной системе координат происходило непрерывное изменение угла  $\gamma$  между оптической осью лидара и надиром и, соответственно, изменение наклонной дальности зондирования  $D$  (рис. 1, а). На освещенной стороне Земли этот угол менялся в пределах  $-90^\circ \leq \gamma \leq +90^\circ$ , а на теневой стороне угол  $\gamma$  все время превышал  $90^\circ$ . Таким образом, зондирование Земли (в пределах дальности действия лидара) было возможно только на освещенной стороне в середине света на витке, когда направление оптической оси лидара близко к надирному.

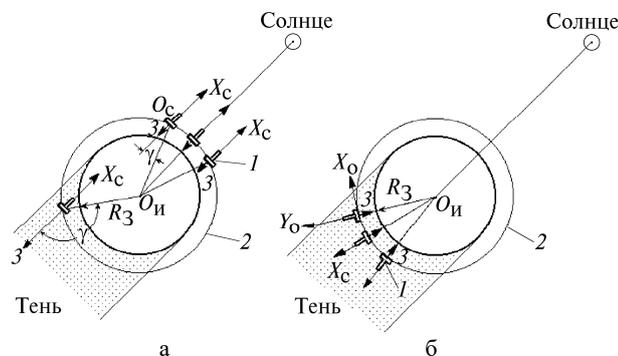


Рис. 1. Упрощенное изображение режимов ориентации станции «Мир» и оптической оси лидара на орбите: 1 – станция; 2 – траектория орбиты; 3 – оптическая ось лидара; O<sub>и</sub> – центр ИСК (Земли); R<sub>3</sub> – радиус-вектор Земли; а – режим ориентации ИСК2; б – режим ориентации ОСКр

В режиме расчетной орбитальной ориентации станции, именуемом ОСКр, станция специально ориентировалась таким образом, чтобы в течение всего сеанса зондирования оптическая ось лидара совпадала с надиром, при этом возможно зондирование земной поверхности как на освещенной, так и на теневой стороне Земли (рис. 1, б). При точной установке оптической оси лидара в надир измеряемая дальность  $D_{и}$  должна соответствовать расчетному значению высоты орбиты  $H_p$ .

Аппаратная погрешность измерения дальности до объекта в дальномерном канале лидара «БАЛКАН» составляет  $\pm 1,5$  м [6]. На основании анализа результатов, полученных при зондировании океанической поверхности лидаром, данных телеметрической информации из системы управления движением орбитальной станции и расчетных баллистических данных оцениваются возможные причины расхождений рассчитанных  $D_p$  и измеренных  $D_{и}$  значений наклонной дальности.

## Ориентация станции «Мир» и оптической оси лидара в сеансах лазерного зондирования

При анализе результатов лидарных космических экспериментов нами использовалась телеметрическая информация об углах ориентации связанной системы координат станции относительно двух базовых систем координат (инерциальной и орбитальной), получаемая от угловых датчиков системы управления движением орбитальной станции, и расчетные значения положения оптической оси лидара в орбитальной системе координат. Краткая информация о базовых системах координат орбитальной станции «Мир» была изложена нами в [2, 3, 5].

На рис. 2 показана взаимная ориентация базовой орбитальной системы координат O<sub>0</sub>X<sub>0</sub>Y<sub>0</sub>Z<sub>0</sub> и связанной системы координат станции O<sub>c</sub>X<sub>c</sub>Y<sub>c</sub>Z<sub>c</sub>, а также надирного направления и углов курса  $\psi$  и тангажа  $\nu$  оптической оси лидара. Центры обеих систем координат O<sub>0</sub> и O<sub>c</sub> совпадают и располагаются в центре масс орбитальной станции, находящемся внутри ее базового блока. В общем случае оси двух координатных систем повернуты одна относительно другой

на углы Эйлера [7]. В режиме ориентации ОСКр величины этих углов должны быть практически постоянными, а в режиме ИСК2 – непрерывно изменяются во время полета. При этом ось « $+O_oY_o$ » всегда направлена вдоль радиуса вектора станции, который противоположен надирному направлению. Ось « $+O_oX_o$ » практически совпадает с вектором скорости станции. На рис. 2 также показано продольное сечение модуля «Спектр» третьей четвертью плоскости  $X_cO_cY_c$ , которая проходит через точку  $O_n$ , соответствующую началу оптической оси лидара. Точка  $O_{\ddot{X}}$  является проекцией точки  $O_n$  на плоскость  $X_oO_oZ_o$  (плоскость местного горизонта).

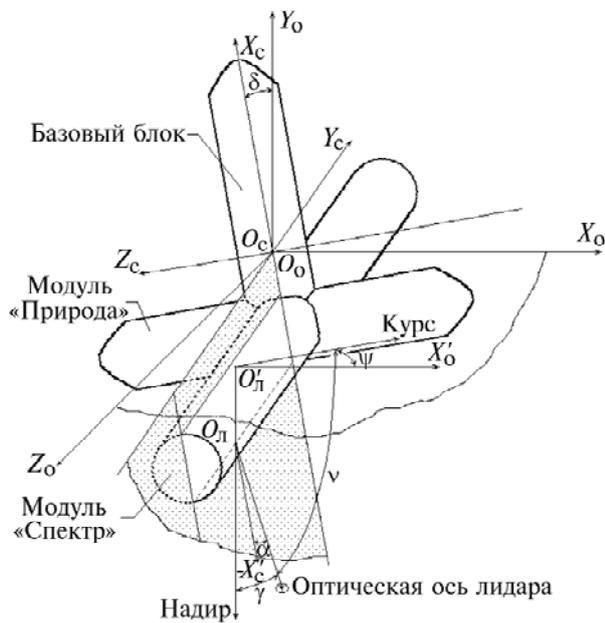


Рис. 2. Взаимная ориентация осей систем координат и оптической оси лидара

Известна изначальная (наземная), определяемая конструктивными расчетами, ориентация оптической оси лидара относительно связанной системы координат станции. Оптическая ось параллельна плоскости  $X_cO_cZ_c$  связанной системы координат станции и повернута против часовой стрелки на угол  $\alpha \approx 1,5^\circ$  от оси « $-X_cO_c$ », если смотреть с направления оси « $-O_cY_c$ » (см. рис. 2). На основе исходной ориентации оси лидара, баллистиками ЦУП проводился посекундный расчет текущих значений углов курса  $\psi(t)$  (угол между вектором скорости станции и проекцией оптической оси на плоскость  $X_oO_oZ_o$ ) и тангажа  $v(t)$  (угол между плоскостью  $X_oO_oZ_o$  и оптической осью лидара), а также текущего значения наклонной дальности  $D_p(t)$  до уровня океана для временного интервала сеанса лазерного зондирования. Угол тангажа оптической оси лидара связан с углом ее отклонения от надира  $\gamma$  соотношением  $v = 90^\circ - \gamma$ .

Зависимости изменения расчетных значений величин углов  $\psi(t)$  и  $v(t)$  в семи сеансах зондирования,

выполненных осенью 1995 г. в режиме ориентации ИСК2, представлены на рис. 3.

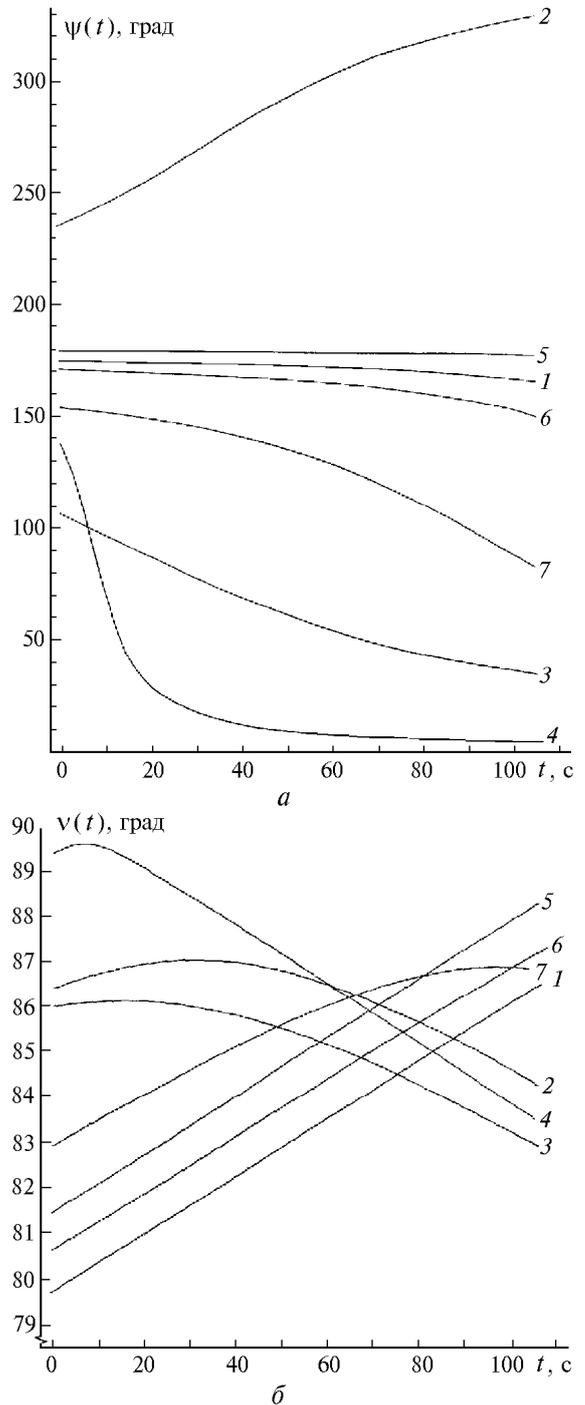


Рис. 3. Изменения углов курса  $\psi(t)$  и тангажа  $v(t)$  оптической оси лидара в сеансах измерений в 1995 г.: 1 – 8 сентября; 2 – 9-го; 3 – 12-го; 4 – 15-го; 5 – 18-го; 6 – 21-го; 7 – 24-го

По оси абсцисс отложено текущее время сеанса. Для сопоставления результатов различных сеансов зондирования первому измерению соответствует нулевой момент времени, а 20-му – 105 с. Кривые 2, 3, 4 и 7 соответствуют случаям, когда зондирование

проводилось на интервале, в который попадает момент времени максимально возможного приближения оптической оси лидара к надирному направлению (в этом случае функция  $v(t)$  имеет экстремум), остальные кривые (1, 5, 6) – только при приближении к этой точке. Следует отметить, что скорость изменения величины угла курса  $d\psi/dt$  зависит от производной  $dv/dt$ , и вблизи экстремума функции  $v(t)$  величина  $d\psi/dt$  является максимальной (зависимости 2, 3, 4, 7 на рис. 3, а).

В течение сеанса зондирования направление оптической оси лидара относительно надира изменялось по сложной зависимости, даже в отсутствие случайных флуктуаций в ориентации станции «Мир». Как видно из рис. 3, а, вблизи плоскости орбиты, которой соответствует угол курса 0 или 180°, оптическая ось лидара располагалась только в сеансе зондирования 18.09.95 (кривая 5), а также в конце сеанса 15.09.95 (кривая 4) после прохождения экстремальной точки по углу тангажа.

Расчетная ориентация оптической оси лидара в режиме ОСКр задавалась постоянным значением угла тангажа, равным  $\nu = 90^\circ$  ( $\gamma = 0^\circ$ ). Детальный анализ значений углов ориентации связанной системы координат  $O_c X_c Y_c Z_c$  относительно базовой орбитальной  $O_o X_o Y_o Z_o$  по телеметрическим данным гиродинных датчиков системы управления движением орбитальной станции представлен ниже.

### Результаты измерений наклонной дальности в режиме ориентации ИСК2

Некоторые данные об измеренных  $D_n(t)$  и расчетных  $D_p(t)$  значениях наклонной дальности, полученные в режиме полета ИСК2 в сеансах 1995 г., были представлены нами ранее в [2–4]. На рис. 4 показан ряд зависимостей  $D_n(t)$  и  $D_p(t)$ , полученных при зондировании океанической поверхности Северной Атлантики, где сплошные кривые – расчетные значения  $D_p(t)$ , горизонтальные отрезки – измеренные значения  $D_n(t)$  (номера кривых на рис. 4 соответствуют датам сеансов рис. 3). Изображение значений  $D_n(t)$  в виде отрезков длительностью в 1 с связано с неопределенностью момента времени измерения, который по данным телеметрической информации расшифровывался с погрешностью  $\pm 0,5$  с [2–4]. Отсутствие на ряде кривых измеренных значений  $D_n(t)$  объясняется малой величиной эхосигнала из-за наличия облачности.

Сравнение моментов времени  $t_{\max v}$ , при котором функция  $v(t)$  достигает своего максимального значения, и  $t_{\min D}$ , при котором достигается минимального значения наклонная дальность  $D_p(t)$  (см. рис. 3, б и 4), показывает, что они смещены на  $5 \div 20$  с. Это связано с тем, что минимальное значение наклонной дальности  $D_p(t)$  не всегда достигается при максимальном значении угла тангажа оптической оси лидара  $v(t)$ , поскольку функция  $D_p(t)$  дополнительно

зависит от знака производной изменения высоты орбиты во времени. В проведенных сеансах зондирования разница  $\Delta t = t_{\max v} - t_{\min D}$  была положительной. В табл. 1 приведены значения  $\Delta t$  для кривых рис. 3 и 4, определенные из баллистических данных.

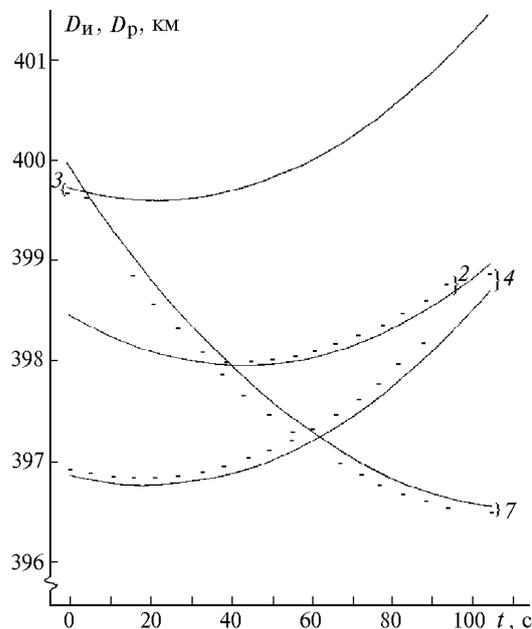


Рис. 4. Измеренные и расчетные значения наклонной дальности в сеансах зондирования в 1995 г.

Таблица 1

Номер кривой	3	2	4	7
$\Delta t$ , с	5	11	11	6

На рис. 5, а показаны две характерные зависимости, полученные в 1996 г. при зондировании океанической поверхности в южных частях Атлантического (кривая 1) и Индийского (кривая 2) океанов в режиме ориентации ИСК2. При этом согласно баллистическим расчетам оптическая ось лидара была близка к надирному направлению в самом начале сеанса зондирования (см. рис. 5, б), а временная разница  $\Delta t$  между экстремумами функций  $v(t)$  и  $D_p(t)$  достигает 30 с. Существенным для этих сеансов является увеличение разности  $\Delta D = D_p(t) - D_n(t)$  до значений  $300 \div 400$  м, в то время как в сеансах зондирования 1995 г. величина  $\Delta D$  не превышала  $150 \div 200$  м и была знакопеременной от сеанса к сеансу (см. рис. 4). Возможные причины расхождения значений  $D_p(t)$  и  $D_n(t)$  обсуждаются ниже.

В сеансах 1995 и 1996 гг. характерным было прекращение регистрации отраженных сигналов от океанической поверхности при увеличении угла отклонения оптической оси от надира более  $10^\circ$ . В этом случае за счет наклонного падения длительность эхосигнала возрастала, а его амплитуда уменьшалась и становилась ниже первого порогового уровня дальномерного канала лидара [6].

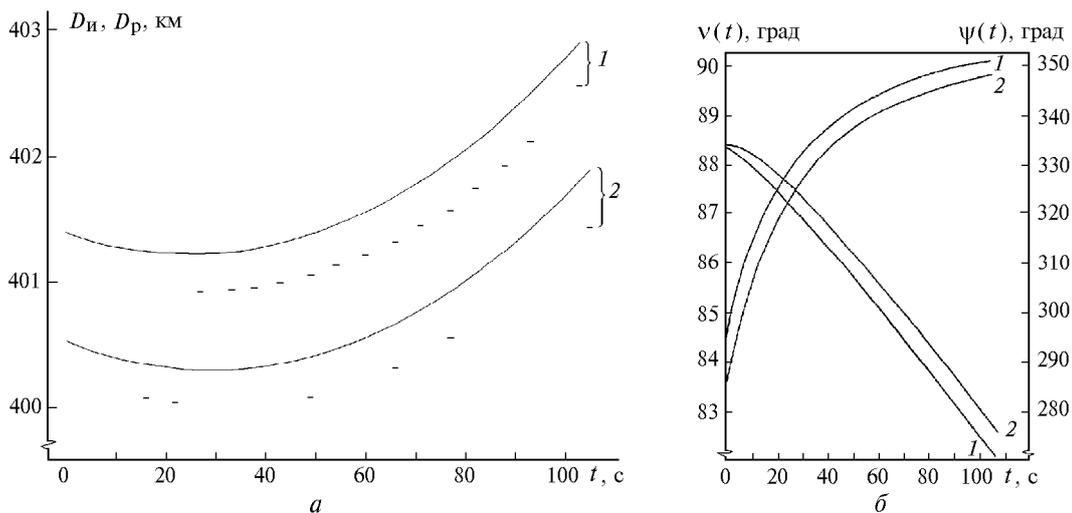


Рис. 5. Результаты дальнометрирования океанической поверхности в 1996 г. в режиме ориентации ИСК2: 1 – 14.02.96; 2 – 15.02.96; а – изменение наклонной дальности; б – изменение углов курса и тангажа оптической оси лидара

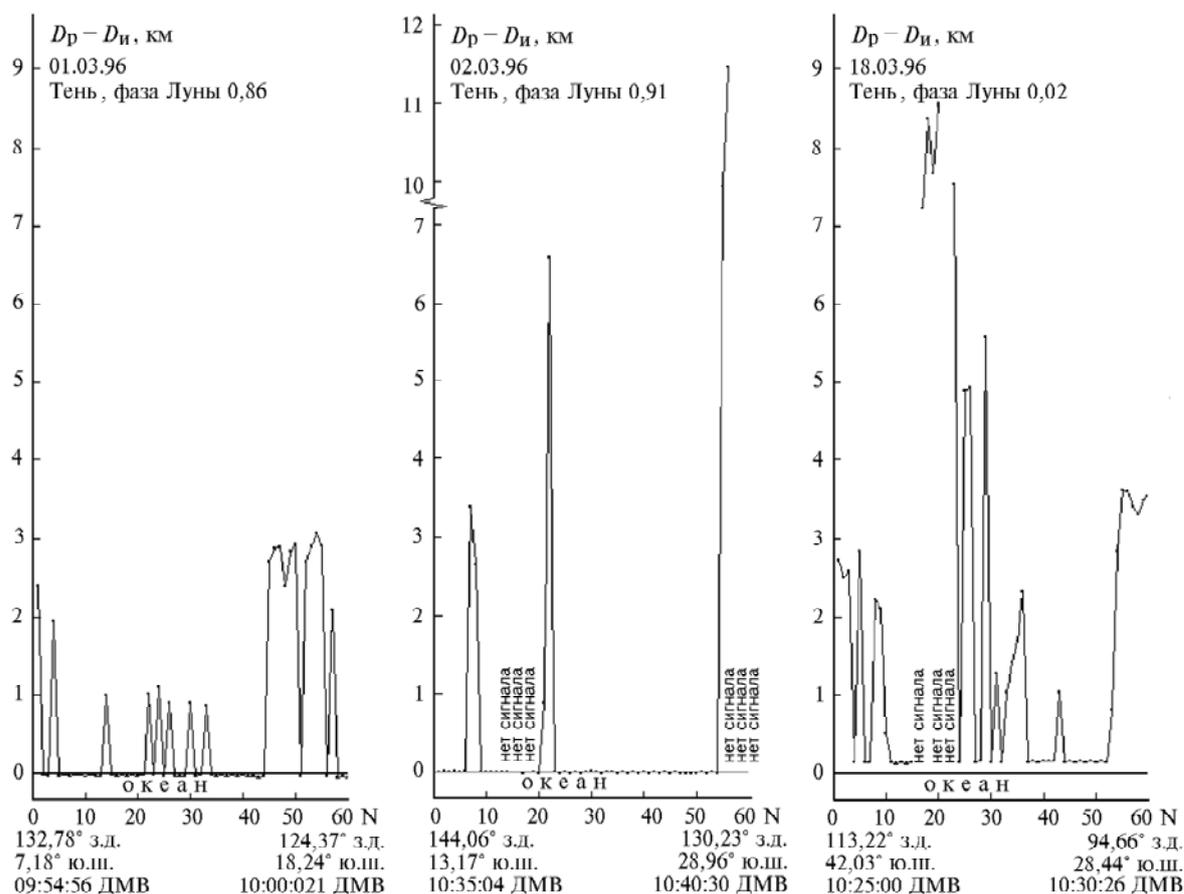


Рис. 6. Результаты зондирования океанической поверхности в Тихом океане в режиме ориентации ОСКр

### Результаты измерений наклонной дальности и положения оптической оси лидара в режиме ориентации ОСКр

Как отмечалось выше, при полете станции в режиме привязки ее связанной системы координат к базовой орбитальной системе  $O_o X_o Y_o Z_o$  обеспечивается практически постоянное направление оптической оси

лидара в надир в сеансе зондирования. На рис. 6 представлены результаты зондирования океанической поверхности и попадающихся облачных полей на теневой стороне Земли в южной части Тихого океана. По оси абсцисс отложены номера лазерных вспышек в сеансе. Ниже указаны географические координаты начальной и конечной подспутниковых точек и декретное московское время (ДМВ) начала и конца сеанса

зондирования. Из этих рисунков видно, что величина разности  $\Delta D = D_p(t) - D_n(t)$  меняется от сеанса к сеансу как по величине, так и по знаку.

Телеметрическая информация от угловых датчиков ориентации станции «Мир» содержит данные об углах Эйлера, характеризующих поворот связанной системы координат относительно двух базовых систем (ИСК и ОСК), а также значения углов между каждыми отдельными осями этих систем. По результатам сеансов 1996 г. нами проанализированы случайные колебания связанной системы координат станции и соответственно оптической оси лидара относительно осей базовой орбитальной системы координат на интервале времени каждого сеанса зондирования. На временном интервале длительностью 326 с (60 зондирующих импульсов) в различных сеансах имелось от 13 до 23 те-

леметрических данных отсчетов угловых датчиков с временным дискретом между ними от 6 до 25 с.

Для проводимого анализа в режиме ориентации ОСКр наибольший интерес представляют значения угла  $\delta$  между осями « $+O_cY_c$ » и « $+X_cO_c$ » (см. рис. 2). Этот угол наиболее полно характеризует положение оптической оси лидара, поскольку она отклонена от оси « $-X_cO_c$ » на небольшой угол  $\alpha = 1,5^\circ$ , а направление оси « $+O_cY_c$ » противоположно надирному направлению. Значение угла  $\delta = 1,5^\circ$  при соответствующих значениях других углов между осями систем координат  $O_cX_cY_cZ_c$  и  $O_cX_cY_cZ_c$  обеспечивало расчетную ориентацию оптической оси лидара в надир. А колебания оси « $+X_cO_c$ » связанной системы координат относительно базовой орбитальной наиболее полно характеризуют колебания оси лидара относительно надира в сеансе измерений.

Таблица 2

Дата	01.03.96	02.03.96	05.03.96	18.03.96	30.03.96	31.03.96
$\bar{\delta}$ , град.	1,126	1,118	1,132	1,093	1,544	1,548
$\Delta\bar{\delta}$ , град.	0,036	0,031	0,039	0,032	0,007	0,009
$\Delta\delta_{\max}$ , град.	0,048	0,055	0,291	0,040	0,043	0,038

В табл. 2 представлены средние по сеансу значения угла  $\bar{\delta}$  и средние значения отклонений  $\Delta\bar{\delta}$  каждого отдельного отсчета от  $\bar{\delta}$  в течение сеанса, а также зафиксированные максимальные отклонения  $\Delta\delta_{\max}$  между соседними значениями этого угла на интервале проводимых выборок.

Как видно из табл. 2 по данным угловых датчиков, только в последних двух сеансах расчетное положение оптической оси лидара было ориентировано в надир с погрешностью  $\approx \pm 3'$ . В первых четырех сеансах систематическое отклонение оси от надира составляло чуть менее  $0,4^\circ$ . В течение сеанса средние колебания положения оси не превышали 2–3 угл. мин. Максимальные значения колебаний оптической оси между соседними точками отсчетов на интервале 6÷15 с (за исключением сеанса 05.03.96) не превышали  $3,3'$ . Произошедший 5 марта скачкообразный поворот осей станции на угол, равный  $\Delta\delta_{\max} = 0,291^\circ$ , был зафиксирован в телеметрической информации угловых датчиков в 15:43:44 ДМВ и показал в этот момент значение угла  $\delta = 1,440^\circ$ . В предыдущей (за 7 с до этого времени) и последующей (спустя 14 с) выборках значения угла  $\delta$  одинаковы и равны  $1,149^\circ$ . Поворот произошел в основном по углу тангажа (т.е. в плоскости траектории орбиты), с небольшим креном (с увеличением угла  $Y_cO_cY_c$  на  $0,017^\circ$ ). «Качок» осей станции был также зарегистрирован лидарным измерением, выполненным спустя 2 с в 15:43:46 и давшим уменьшение величины  $\Delta D = D_p(t) - D_n(t)$  на 20 м по сравнению со значениями  $\Delta D$  в соседних точках измерений. Расчетное значение изменения дальности  $D_n$  за счет увеличения угла  $\delta$  на  $0,291^\circ$  при средней высоте орбиты, равной 410,8 км, составляет 17 м. Это, с учетом временной разницы в 2 с между

измерениями в двух разных системах, является хорошим совпадением данных лидарных измерений и телеметрической информации угловых датчиков ориентации орбитальной станции.

### Пространственно-временные неопределенности результатов измерений

Сравнение измеренных значений наклонной дальности  $D_n$  при зондировании океанической поверхности с расчетными баллистическими значениями  $D_p(t)$  показывает, что в обоих режимах ориентации станции существует знакопеременная систематическая разность между ними. К возможным причинам систематических расхождений между расчетными баллистическими данными и результатами измеренных значений наклонной дальности можно отнести: 1) неточное знание положения оптической оси лидара в связанной системе координат станции; 2) ошибки в системе единого времени станции и связанные с ними погрешности определения точного момента лазерного зондирования; 3) ошибки в расчетном баллистическом обеспечении.

Первая причина связана с суммарным набегом конструктивных допусков на места крепления приемопередатчика лидара к иллюминатору модуля «Спектр», модуля к переходному стыковочному узлу, переходного стыковочного узла к станции, а также за счет некоторого «раздува» модуля на орбите из-за разницы давлений внутри его и снаружи. В конечном итоге погрешность в определении реального положения оптической оси лидара в связанной системе координат станции лежит в конусе, ось которого отклонена от оси « $-X_cO_c$ » на угол  $\alpha = 1,5^\circ$  и который имеет плоский угол при вершине, равный  $\Delta\alpha \approx 0,3^\circ$  (см. рис. 2).

Анализ обработанной телеметрической информации угловых датчиков системы управления движением станции при полете в режиме ОСКр показал, что на интервале 10 мин в общем случае наблюдаются колебания направления осей связанной системы координат относительно осей базовой системы в пределах  $\pm 0,04^\circ$ . При зондировании строго в надирном направлении такая погрешность приводит к незначительным ошибкам в определении высоты полета станции (до  $\pm 0,5$  м) и значительному смещению центра пятна излучения на земной поверхности (до  $\pm 300$  м). В [2, 3] нами было показано, что при одной и той же величине систематической ошибки  $\Delta\alpha$  величина  $\Delta D$  существенно возрастает с ростом угла  $\gamma$ , особенно при  $\gamma > 3^\circ$ . При этом из-за неопределенности величины  $\Delta\alpha$  реальные координаты точки пересечения лазерного луча с поверхностью Земли на уровне океана будут смещены относительно расчетных значений географических координат.

Неоднозначность в пространственной привязке данных зондирования возникает и за счет погрешностей, связанных с временной привязкой цикла измерения. Временная привязка результатов измерений эхосигналов производится к системе единого времени, имеющейся на борту станции (декретное московское время). При записи сигналов телеметрического контроля на бортовые магнитофоны станции используется односекундная шкала времени. Поскольку период излучения лазерных импульсов составляет 5,53 с, то время регистрации сигнала  $D_n$  осуществляется в телеметрической системе с минимальной погрешностью  $\pm 0,5$  с. Это сразу дает пространственную неопределенность в наземных координатах траектории подспутниковой точки в  $\pm 3,85$  км. Максимальная погрешность может достигать 1 с из-за накопления временных задержек на релейных схемах, через которые проходят сигналы телеметрического контроля от составных частей лидара.

Дополнительная ошибка между значениями  $D_p$  и  $D_n$  возникает из-за погрешностей в системе радиолокационного контроля орбиты станции, исходные данные которой являются основой для баллистических расчетов параметров траектории орбиты. Для Северного полушария погрешность в расчетном значении высоты орбиты  $H_p(t)$  может составлять 150 м, в Южном полушарии, где пунктов радиоконтроля орбиты нет, величина погрешности увеличивается. Поскольку все баллистические расчеты привязываются к моменту времени  $T_0$  и долготе  $L_0$ , при которых проекция траек-

тории орбиты пересекает земной экватор, то ошибки в 1 с приводят к дополнительной погрешности величины  $H_p(t)$  в  $10 \div 20$  м (за счет эллиптичности орбиты) и смещению географических координат подспутниковой точки до 7,7 км.

### Заключение

Выполненные лидарные космические эксперименты показали возможности лидара «БАЛКАН» для определения высоты орбиты станции «Мир» с достаточно высокой точностью. Проведен анализ стабильности ориентации оптической оси лидара в сеансах измерений. Приведена оценка возможных причин систематических расхождений между расчетными баллистическими данными и результатами измеренных значений наклонной дальности для двух режимов ориентации орбитальной станции.

Полученные данные о возможных колебаниях осей системы координат станции во время полета необходимо учитывать при разработке алгоритмов обработки информации доплеровского лидара [8]. Накопленный в процессе выполненных экспериментов опыт позволит более оптимально планировать последующие эксперименты.

Авторы выражают глубокую благодарность экипажам космических экспедиций ЭО-19, ЭО-20 и ЭО-21 за их квалифицированную и качественную работу с лидаром «БАЛКАН-1» на орбитальной станции «Мир». Особую признательность авторы выражают сотрудникам группы математического моделирования ЦУП и ее ведущему специалисту А.И. Манжелего за составление программ баллистического обеспечения экспериментов и проведенные расчеты, а также всем сотрудникам ЦУП, участвовавшим в организации и проведении космических экспериментов по лазерному зондированию.

1. *Byfton J.L.* // Proc. IEEE. 1989. V. 77. N 3. P. 463–477.
2. *Балин Ю.С., Тихомиров А.А., Самойлова С.В.* // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. N 3. С. 333–352.
3. *Balin Yu.S., Samoilova S.V., Tikhomirov A.A.* // Proc. SPIE. 1996. V. 2956. P. 8–18.
4. *Балин Ю.С., Тихомиров А.А., Самойлова С.В.* // Космічна наука і технологія. 1998. Т. 4. N 1–2. С. 1–7.
5. *Балин Ю.С., Тихомиров А.А.* // Космічна наука і технологія. 1997. Т. 3. N 1–2. С. 26–33.
6. *Балин Ю.С., Знаменский И.В., Зуев В.Е. и др.* // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 9. С. 1332–1343.
7. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1968. 720 с.
8. *Werner Ch., Brand B., Jochim E.F.* // Proc. SPIE. 1995. V. 2581. P. 148–162.

Институт оптического мониторинга СО РАН, Томск  
Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск  
Ракетно-космическая корпорация «Энергия», г. Королев Московской обл.

Поступила в редакцию  
18 февраля 1998 г.

#### *A.A. Tikhomirov, Yu.S. Balin, V.E. Melnikov. To Estimation of Slant Range Measured by Lidar «BALKAN» from Space Station «Mir».*

We consider some peculiarities in ranging ocean surface from space-based lidar «BALKAN» for two modes of the space station «Mir» orientation. To demonstrate the peculiarities, we have analyzed regular and random fluctuation of the lidar optical axis position in space occurred during measurement sessions. Analysis made allows us to discuss possible causes of the systematic difference between the ballistic calculated data on range and the values of slant range measured with the lidar in both modes of the station orientation.