

УДК 681.783.25:629.795

## Результаты дальнометрирования океанической поверхности космическим лидаром БАЛКАН

А. А. Тихомиров

Институт оптического мониторингу СО РАН, Томск, Росія

*Надійшла до реакції 21.09.98*

---

Розглянуто особливості дальнометрування лідаром БАЛКАН поверхні Землі для двох режимів орієнтації орбітальної станції «Мир», які використовувались в експериментах 1995—1996 рр., та уточнено деякі результати, представлені раніше. Результати вимірювань порівнюються із значеннями дальності, отриманими при балістичних розрахунках траєкторії орбіти. Для аналізу використано: апріорно розраховані балістичні дані; експериментальні лідарні вимірювання дальності; дані телеметричної інформації про орієнтацію орбітальної станції «Мир», які надійшли з її системи управління. Проаналізовано дані телеметричної інформації про стабільність орієнтації осей зв'язаної системи координат станції та напрямок оптичної осі лідара відносно базової орбітальної системи координат. Оцінено вплив коливання оптичної осі на результати вимірювань. Пояснюються можливі причини розходження розрахункових та вимірних значень нахиленої дальності, а також особливості результатів вимірювань.

---

### ВВЕДЕНИЕ

Некоторые возможные погрешности определения дальности до подстилающей поверхности (ПП) и/или верхней границы облачности (ВГО) с помощью лазерных космических альтиметров и лидаров теоретически рассматривались в [9, 12]. В целом можно выделить следующие источники, вносящие вклад в погрешность измерений: 1) неточное знание высоты полета космического аппарата; 2) неопределенность в ориентации оптической оси прибора; 3) аппаратные погрешности измерителя; 4) методика измерений и обработки результатов и 5) коэффициент преломления атмосферного воздуха и его изменения на трассе распространения лазерного луча [1].

Предварительные результаты лазерного зондирования ПП Земли и ВГО с помощью лидара БАЛКАН [2, 7], установленного на орбитальной станции (ОС) «Мир» были приведены в работах [4, 5].

В данной статье рассматриваются особенности дальнометрирования лидаром БАЛКАН поверхно-

сти Земли для двух режимов полетной ориентации ОС «Мир» [3, 4], которые использовались при проведении экспериментов в 1995—1996 гг., и уточняются некоторые результаты, представленные в [4, 5]. Дальнометрирование океанической поверхности, рассматриваемой на первом этапе измерений в качестве опорной, позволяет оценить вклад вышеперечисленных источников в погрешность измерений.

Результаты измерений сравниваются со значениями дальности, полученными при баллистических расчетах траектории орбиты. При анализе используются: априорные расчетные баллистические данные; результаты лидарных измерений дальности  $D_{л}$ , полученные в экспериментах; данные телеметрической информации (ТМИ) об ориентации ОС «Мир», поступившие из ее системы управления движением. Используемые технические характеристики лидара БАЛКАН [2, 7]: аппаратная погрешность измерения дальности до объекта в дальномерном канале  $\Delta D_{л} = \pm 1.5$  м; диаметр пятна лазерного луча на поверхности Земли  $D_{с}$  не превышает 100 м;

расстояние между центрами соседних пятен  $L_s$ , равное 42.5 км, определяется периодом повторения зондирующих импульсов  $T_n = 5.53 \pm 0.01$  с; число импульсов в сеансе  $N$  равно 20 или 60. Баллистическое обеспечение экспериментов (параметры орбитального движения ОС, расчетная ориентация оптической оси лидара, расчетное значение наклонной дальности  $D_p$  и т. п. [3]) осуществлялось в Группе математического моделирования ЦУП на основе данных радиолокационного контроля параметров орбиты ОС «Мир» с наземных пунктов.

**ОРИЕНТАЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ ЛИДАРА В СЕАНСАХ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Информация о связанной системе координат (ССК) ОС «Мир» и используемых базовых системах координат (БСК) — инерциальной (именуемой ИСК2) и расчетной орбитальной (ОСКр) была представлена в работах [3, 4].

На рис. 1 показаны: надирное направление; взаимная ориентация осей орбитальной БСК — ОСК ( $O_o X_o Y_o Z_o$ ) и ССК ОС ( $O_c X_c Y_c Z_c$ ); направление оптической оси лидара. Последнее в ОСК может быть однозначно задано двумя углами: курса  $\psi$  (угол между осью  $+O_o X_o$ , или параллельной ей осью  $O'_n X'_o$ , и проекцией оптической оси лидара на плоскость  $X_o O_o Z_o$ ) и тангажа  $\nu$  (угол между плоскостью  $X_o O_o Z_o$  и оптической осью лидара). Центры  $O_o$  и  $O_c$  обеих систем координат совпадают и располагаются в центре масс ОС. Ось  $+O_o Y_o$  всегда направлена вдоль радиуса-вектора ОС, который противоположен надиру. Ось  $+O_o X_o$  практически совпадает с вектором скорости ОС (направлением полета). Плоскость  $X_o O_o Y_o$  является плоскостью орбиты ОС.

На рис. 1 также показано продольное сечение модуля «Спектр» третьей четвертью плоскости  $X_c O_c Z_c$ , которая проходит через точку  $O_n$ , соответствующую началу оптической оси лидара. Точка  $O'_n$  является ее проекцией на плоскость  $X_o O_o Z_o$  (плоскость местного горизонта). Угол тангажа связан с углом отклонения оптической оси лидара от надира  $\gamma$  соотношением  $\nu = 90^\circ - \gamma$ . В общем случае оси двух рассматриваемых систем координат могли быть повернуты одна относительно другой на углы Эйлера [8]. В режиме ориентации ОСКр величины этих углов практически постоянны, в ИСК2 — непрерывно изменяются. Угол  $\beta$  характеризует отклонение оптической оси лидара от направления полета ОС.

В режиме дежурной полетной ориентации ИСК2, при привязке осей ССК ОС к инерциальной БСК и постоянной ориентации оси  $+O_c X_c$  в направлении на

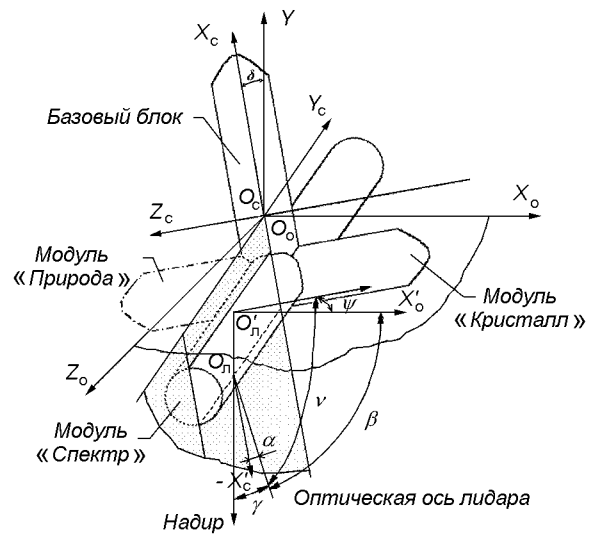


Рис. 1. Взаимная ориентация осей систем координат и оптической оси лидара

Солнце, происходило непрерывное изменение угла  $\gamma$  и, следовательно, вариация наклонной дальности  $D$  от ОС до поверхности Земли (см. рис. 2 в [3]). Угол  $\gamma$  изменялся в интервалах  $-90^\circ \leq \gamma \leq +90^\circ$  на освещенной стороне и  $90^\circ \leq \gamma \leq 270^\circ$  на теневой (положительное направление угла  $\gamma$  отсчитывается против часовой стрелки от надира). В данном режиме ориентации ОС оптическая ось лидара не находилась в плоскости орбиты, а всегда составляла с ней некоторый угол.

В режиме ОСКр ОС специально ориентировали так, чтобы оптическая ось лидара совпадала с надирным направлением ( $\gamma = 0$ ) на любой стороне Земли, при этом измеряемая дальность  $D_n$  до поверхности океана должна соответствовать высоте орбиты  $H$ . Однако такой режим ориентации для несимметрированной ОС «Мир» (до пристыковки к ней модуля «Природа») требовал дополнительного расхода горючего и поэтому был реализован менее чем в половине экспериментов.

Ориентация оптической оси лидара в ССК ОС определена, исходя из ее наземной, заданной конструктивными расчетами, ориентации относительно ССК модуля «Спектр». Оптическая ось параллельна плоскости  $X_c O_c Z_c$  и повернута против часовой стрелки на угол  $\alpha = 1.5^\circ$  от оси  $-O_c X_c$ , если смотреть с направления оси  $-O_c Y_c$  (рис. 1). На основе этих исходных данных для задаваемого интервала времени сеанса измерений баллистикой ЦУП проводился расчет текущих значений углов  $\psi(t)$  и  $\nu(t)$ , а также наклонной дальности  $D_p(t)$  до уровня океана.

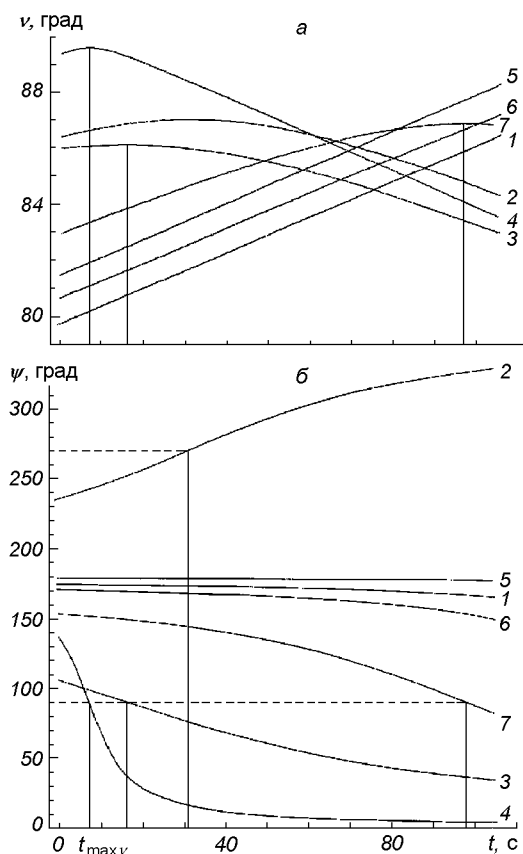


Рис. 2. Изменения углов тангажа (а) и курса (б) оптической оси лидара в сеансах измерений 1995 г. Вертикальными линиями отмечены моменты  $t_{\max\nu}$  достижения экстремума в каждом сеансе: линии 1 — 7 — соответственно 8, 9, 12, 15, 18, 21 и 24 сентября

На рис. 2 показаны расчетные зависимости  $\nu(t)$  и  $\psi(t)$  для сеансов, выполненных в режиме ИСК2. С целью сопоставления результатов по оси абсцисс отложено текущее время каждого сеанса, при этом первому измерению соответствует нулевой момент времени, а 20-му — 105.07 с. Зависимости 2, 3, 4 и 7 представляют эксперименты, в которых зондирование проводилось на интервале, включавшем момент  $t_{\max\nu}$  максимального приближения оптической оси лидара к надиру, когда функция  $\nu(t)$  имела экстремум (рис. 2, а). Однако в каждом из этих сеансов угол  $\nu(t)$  не достигал предельного значения,  $\nu = 90^\circ$ , поскольку в моменты  $t_{\max\nu}$  оптическая ось не совпадала с плоскостью орбиты, а имела относительно нее угол крена  $\gamma(t_{\max\nu}) = 90^\circ - \nu(t_{\max\nu})$ . В эти моменты значение угла  $\psi(t_{\max\nu})$  было равно  $90^\circ$  (кривые 3, 4, 7) или  $270^\circ$  (кри-

вая 2). Правая граница временного интервала сеансов, соответствующих кривым 1, 5, 6, не доходила до экстремальной точки  $t_{\max\nu}$ , и на наблюдаемом временном интервале производная  $dv/dt$  для этих зависимостей имела практически постоянное значение. Разный временной ход кривых  $\nu(t)$  и  $\psi(t)$  в сеансах определялся различной начальной ориентацией осей ССК ОС относительно оси  $+O_0X_0$ .

Ориентация оптической оси лидара в режиме ОСКр задавалась постоянными значениями углов тангажа  $\nu = 90^\circ$  ( $\gamma = 0^\circ$ ) и курса  $\psi = 0^\circ$ , величины которых в течение сеанса стабилизировались системой управления движением ОС. Но и при соблюдении этого условия первоначальная ориентация ССК ОС относительно направления движения (оси  $+O_0X_0$ ) могла быть любой. Детальный анализ данных ТМИ о положении осей ССК ОС относительно осей ОСК представлен ниже.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДО ОКЕАНИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В СЕАНСАХ ЗОНДИРОВАНИЯ

Ряд зависимостей, полученных при лазерном дальнометрировании поверхности Северной Атлантики, показан на рис. 3, а, где сплошные кривые — расчетные значения наклонной дальности  $D_p(t)$ , а горизонтальные отрезки — ее измеренные значения  $D_n(t)$ . Последние изображены в виде отрезков длительностью в 1 с из-за неопределенности расшифровки момента времени измерения по данным ТМИ, составляющей  $\pm 0.5$  с [4, 5]. Номера кривых соответствуют датам сеансов рис. 2. Отсутствие на ряде зависимостей измеренных значений  $D_n(t)$  объясняется малой величиной эхосигнала от ПП.

Как видно из рис. 3, а, в течение сеанса происходило непрерывное изменение наклонной дальности, обусловленное главным образом изменением угла  $\nu(t)$ . Так, за 1 с на участках траектории орбиты, где проводились измерения, изменение высоты  $H$  за счет эллиптичности орбиты составляло от 5 до 15 м, а изменение наклонной дальности  $D$  могло при этом достигать 85 м при  $\gamma \approx 10^\circ$ .

Сравнение момента времени  $t_{\min D}$ , который соответствовал минимальному значению наклонной дальности, и момента  $t_{\max\nu}$  показывает (рис. 3, а и 2, а), что первый всегда отставал от второго на несколько секунд. Это обусловлено тем, что на освещенной стороне Земли угол  $\beta$  (рис. 1), уменьшаясь от  $180^\circ$  до  $0^\circ$ , до момента  $t_{\max\nu}$  всегда превышал  $90^\circ$ , а угол курса  $\psi(t)$  лежал в интервале  $90^\circ < \psi(t) < 270^\circ$  (рис. 2, б). За счет этого в режиме

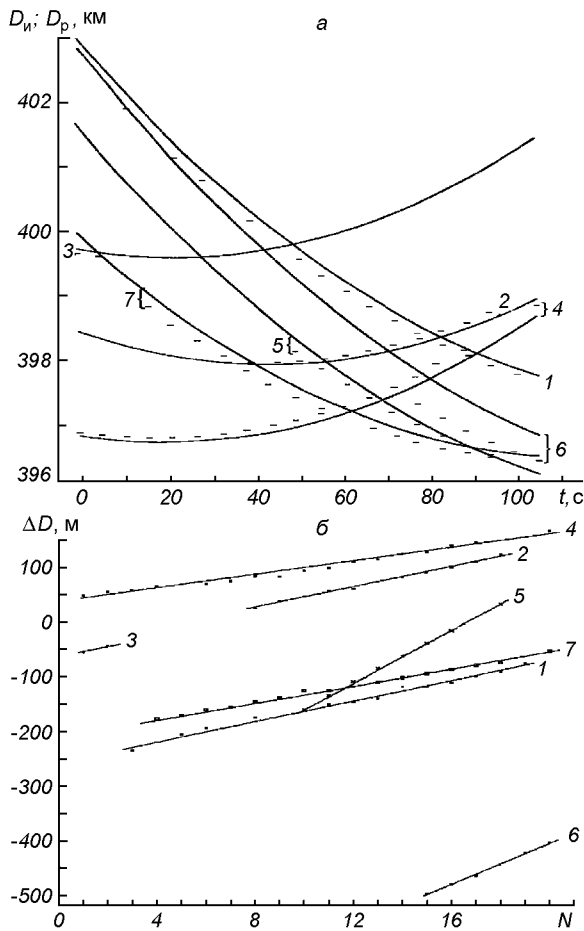


Рис. 3. Результаты дальнометрирования океанической поверхности в сеансах 1995 г. в режиме ориентации ИСК2: а — абсолютные значения; б — разность измеренных и расчетных значений

Таблица 1. Результаты обработки данных при ориентации ИСК2 в 1995 г.

Номер кривой	$\Delta D_{\text{нач}}$ , м	$\Delta D_{\text{кон}}$ , м	$\Delta N$	$\Delta D / \Delta T$ , м/с
1	-235	-76	16	1.797
2	26	-123	10	1.754
3	-56	-41	1	2.170
4	49	167	19	1.123
5	-161	33	8	4.385
6	-498	-403	5	3.435
7	-177	-75	16	1.153

ориентации ИСК2 при положении оптической оси лидара вне плоскости эллиптической орбиты минимум  $D_p(t)$  всегда запаздывал относительно момента времени  $t_{\text{мах}}$ .

На рис. 3, б, где представлены значения разности  $\Delta D(t) = D_n(t) - D_p(t)$ , по оси абсцисс отложен номер

цикла зондирования в сеансе измерений, а значения  $D_p(t)$  интерполированы на период следования лазерных импульсов  $T_{\text{л}}$ , считая, что  $t = 0$  при  $N = 1$ . Прямыми линиями изображены тренды разности  $\Delta D(t)$ . Одна из причин их различного наклона связана с разной ориентацией осей ССК ОС и соответственно оптической оси лидара относительно направления полета в каждом сеансе зондирования.

В табл. 1 представлены некоторые обобщенные результаты рис. 3, б, где  $\Delta D_{\text{нач}}$  и  $\Delta D_{\text{кон}}$  — начальные и конечные значения разности  $D_n(t) - D_p(t)$ , полученные при соответствующих номерах циклов измерений  $N_{\text{нач}}$  и  $N_{\text{кон}}$  на интервале  $\Delta T = \Delta N T_{\text{л}}$ ,  $\Delta N = N_{\text{кон}} - N_{\text{нач}}$ ,  $\Delta D / \Delta T = (\Delta D_{\text{кон}} - \Delta D_{\text{нач}}) / \Delta T$  — средняя скорость изменения  $\Delta D(t)$  в сеансе. Ее значение, как видно из данных табл. 1, от сеанса к сеансу изменяется в несколько раз.

На рис. 4 изображены характерные зависимости, полученные в 1996 г. при дальнометрировании поверхности южных частей Атлантического (кривая 1) и Индийского (кривая 2) океанов. Для рис. 4, а с учетом стабильности периода повторения лазерных импульсов,  $T_{\text{л}} = 5.53$  с, моменты измерений  $D_n(t_i)$  последовательно отсчитаны от момента первого измерения ( $t_1 = 0$ ), который определялся из данных ТМИ, и представлены крестиками и квадратами. При этом, согласно баллистическим расчетам, момент  $t_{\text{мах}}$  опережал время  $t_1 = 0$  на 11 и 7 с для зависимостей 1 и 2 соответственно, а временной ход функций  $\psi(t)$  и  $\nu(t)$  имел примерно одинаковый характер для обоих сеансов (на временном интервале сеанса измерений угол  $\nu(t)$  уменьшался от  $88.4^\circ$  до  $82.3^\circ$ , а угол  $\psi(t)$  увеличивался от  $283^\circ$  до  $348^\circ$ , при этом временная разница  $\Delta t$  между экстремумами функций  $\nu(t)$  и  $D_p(t)$  превысила 30 с).

Рис. 4, в показывает изменения положения осей ССК ОС относительно ОСК, построенные по данным ТМИ от гиродинных датчиков. На рассматриваемом временном интервале наиболее близкой к оси  $O_0X_0$  была ось  $+O_0Z_0$ , т. е. модуль «Кристалл» был противоположен направлению движения (ОС была повернута примерно на  $180^\circ$  вокруг оси  $O_0Y_0$  относительно плоскости рис. 1). В течение сеанса происходило вращение осей ССК ОС вокруг оси  $O_0Z_0$  на угол около  $6.5^\circ$ , при этом значения углов  $\angle X_0O_0Z_0$ ,  $\angle Y_0O_0Z_0$ ,  $\angle Z_0O_0Z_0$ , оставались постоянными, а углы  $\angle Y_0O_0X_0$  и  $\angle Y_0O_0Y_0$  изменялись не более чем на  $0.4^\circ$ . Изменение положения оптической оси лидара относительно надира в сеансе измерений наиболее полно характеризует вариация угла  $\delta = \angle X_0O_0Y_0$ , поскольку оптическая ось лидара

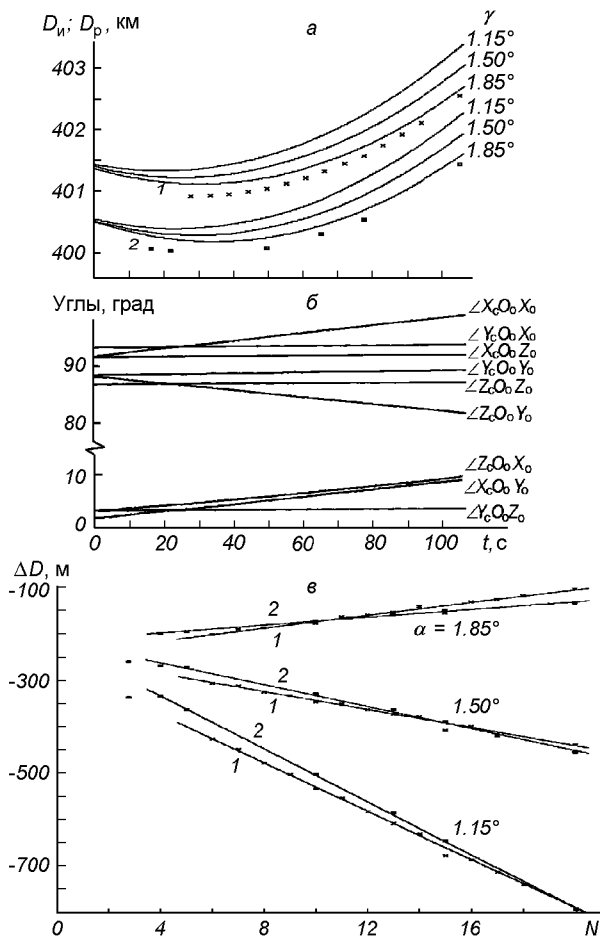


Рис. 4. Результаты дальнометрирования океанической поверхности в 1996 г. в режиме ориентации ИСК2: 1 — 14.02.96; 2 — 15.02.96. а — абсолютные значения наклонной дальности; б — разность измеренных и расчетных значений; в — изменение углов между осями ОСК и ССК ОС в сеансе 15.02.96

наиболее близка к оси  $-O_c X_c$ , а ось  $+O_c Y_c$  противоположна надирному направлению (см. рис. 1).

Рис. 4, а и б иллюстрируют также влияние на  $D_p(t)$  изменения расчетного значения угла  $\alpha$  в пределах  $\pm 0.35^\circ$  в плоскости  $X_c O_c Z_c$  ССК ОС. Уменьшение угла  $\alpha$  приближает момент времени  $t_{\min D}$  к  $t_{\max}$ . Как видно из рис. 4, б, для расчетного значения  $\alpha = 1.85^\circ$  знак производной тренда  $\Delta D(t)$  изменяется, и величина систематической разницы  $\Delta D(t)$  уменьшается. В данной ориентации ОС заданное расчетное значение  $\alpha = 1.15^\circ$  приводило к тому, что оптическая ось лидара удалялась от надира на  $0.35^\circ$ , а при  $\alpha = 1.85^\circ$  — приближалась к нему. Этим объясняется ход зависимости  $\Delta D(t)$  на

Таблица 2. Результаты обработки данных при ориентации ИСК2 в 1996 г.

Дата	$\alpha$ , град	$\Delta D_{\text{нач}}$ , м	$\Delta D_{\text{кон}}$ , м	$\Delta N$	$\Delta D/\Delta T$ , м/с
14.02.96	1.15	-427	-792	14	-4.714
14.02.96	1.50	-306	-439	14	-1.718
14.02.96	1.85	-201	-102	14	+1.279
15.02.96	1.15	-334	-795	16	-5.210
15.02.96	1.50	-268	-455	16	-2.113
15.02.96	1.85	-200	-132	16	+0.768

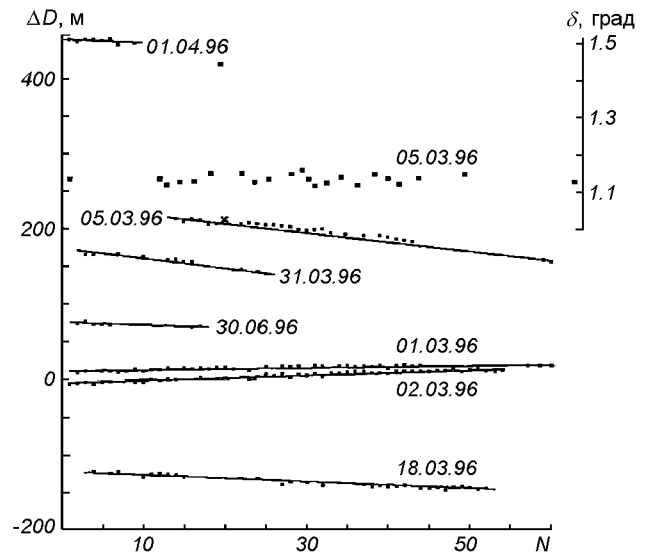


Рис. 5. Результаты дальнометрирования океанической поверхности в режиме ориентации ОСКР

рис. 4, б. В табл. 2 по аналогии с табл. 1 представлены некоторые обобщенные результаты рис. 4, б и добавлены изменения  $\Delta D/\Delta T$  в зависимости от расчетного положения оптической оси лидара (угла  $\alpha$ ) в ССК ОС.

Для сеансов 1995 и 1996 гг. также было характерным прекращение регистрации отраженных сигналов от океанической поверхности при увеличении угла отклонения оптической оси от надира  $\gamma > 10^\circ$ . В этом случае за счет наклонного падения зондирующего луча длительность эхосигнала увеличивается, а его амплитуда уменьшается [9, 12] и при малом значении коэффициента отражения  $\rho$  водной поверхности по сравнению с облаками или пустынной поверхностью [6, 13] становится ниже первого порогового уровня дальномерного канала лидара [2, 7]. Как показывают результаты работы [13], при  $\gamma \geq 10^\circ$  за счет угловой зависимости коэффициента отражения  $\rho(\gamma)$  дополнительно амплитуда эхосигнала уменьшается в 2—3 раза (в

Таблица 3. Результаты обработки данных при ориентации ОСКр

Дата	$\Delta D_{\text{нач}}$ , м	$\Delta D_{\text{кон}}$ , м	$\Delta N$	$\Delta D/\Delta T$ , м/с
01.03.96	9	20	56	0.035
02.03.96	-6	+13	53	0.065
05.06.96	213	156	46	-0.224
18.03.96	-122	-144	48	-0.083
30.03.96	74	70	15	-0.048
31.03.96	165	140	22	-0.205
01.04.96	453	448	8	-0.118

зависимости от скорости ветра и волнения на океанической поверхности).

На рис. 5 точками представлены значения  $\Delta D(t) = D_{\text{н}}(t) - H_{\text{р}}(t)$ , полученные при дальнометрировании южных частей Тихого и Индийского океанов при полете ОС в режиме ориентации ОСКр в 1996 г. (детальную информацию о времени и координатах районов измерений см. в [4, 5]). Пропуски точек на зависимостях  $\Delta D(t)$  обусловлены эхосигналами от ВГО, дальность до которой не входит в масштаб рисунка. По этой же причине не показаны результаты измерений в начале сеанса 5 марта и во второй половине сеансов 30, 31 марта и 1 апреля, когда подстилающей поверхностью был австралийский континент. Сплошной линией показаны тренды  $\Delta D(t)$ . В табл. 3 по аналогии с табл. 1 представлены некоторые обобщенные результаты рис. 5, при этом скорость изменения  $\Delta D(t)$  в сеансе почти на порядок меньше, чем в режиме ориентации ИСК2.

**ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ПОЛОЖЕНИЯ  
ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ ЛИДАРА  
В РЕЖИМЕ ОРИЕНТАЦИИ ОСКр**

На основе анализа ТМИ, поступавшей от гироскопических датчиков системы управления движением ОС, были определены случайные колебания осей ее ССК и соответственно оптической оси лидара относительно осей ОСК на интервале времени каждого сеанса, равном 326.27 с (при 60 зондирующих импульсах). ТМИ содержит данные об углах Эйлера, характеризующих поворот осей ССК ОС относительно двух базовых систем (ИСК и ОСК), а также значения углов между каждыми из осей ССК и ОСК. В различных сеансах 1996 г. имелось от 13 до 23 отсчетов угловых датчиков с неравномерным временным дискретом между ними, составляющим от 6 до 62 с.

Как отмечалось выше, первостепенный интерес

Таблица 4. Изменение угла  $\delta$  в сеансах измерений

Дата сеанса	Число выбо- рок	$\bar{\delta}$ , град	$\overline{\Delta\delta}$ , град	$\Delta\delta_{\text{max}}$ , град
01.03.96	13	1.126	0.036	0.058
02.03.96	16	1.118	0.031	0.055
05.03.96	23	1.132	0.039	0.291
18.03.96	18	1.093	0.032	0.040
30.03.96	18	1.544	0.007	0.043
31.03.96	18	1.548	0.009	0.043

представляют значения угла  $\delta$  между осями  $+O_0Y_0$  и  $+O_0X_0$  (см. рис. 1). В режиме ОСКр расчетная ориентация оптической оси лидара в надири задавалась значениями углов  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\delta = 1.5^\circ$  и соответствующими величинами других углов между осями ССК и ОСК с учетом минимальных затрат топлива на перевод ОС из дежурной ориентации ИСК2 в ОСКр. При этом близким к направлению движения, т. е. к оси  $+O_0X_0$ , мог быть любой из орбитальных модулей. Данные ТМИ о реальном значении угла  $\delta$  и о колебаниях оси  $+O_0X_0$  ССК ОС относительно осей ОСК наиболее полно характеризуют отклонения оптической оси лидара относительно надира в сеансе измерений.

В табл. 4 представлены средние за сеанс значения угла  $\bar{\delta}$  и средние значения отклонений  $\overline{\Delta\delta}$  каждого отдельного отсчета от  $\bar{\delta}$  в течение сеанса, а также зафиксированные максимальные отклонения  $\Delta\delta_{\text{max}}$  между соседними значениями этого угла на интервале проводимых выборок.

Как видно из данных табл. 4, в первых четырех сеансах устанавливаемая ориентация ОС отличалась от расчетной, и систематическое отклонение оптической оси лидара от надира составляло около  $0.4^\circ$ . За счет этого увеличение наклонной дальности не превышало 10 м при средней высоте орбиты 410 км. В течение сеанса средние колебания положения оси составляли 2—3 угловые минуты. Максимальные значения колебаний оптической оси между соседними точками отсчетов на интервале  $6 \div 15$  с (за исключением сеанса 05.03.96) не превышали 3.3'.

В первых четырех сеансах углы между направлением движения ОС и осями ССК составляли  $\angle X_0O_0X_c \approx 88.9^\circ$ ,  $\angle X_0O_0Y_c \approx 86.9^\circ$ ,  $\angle X_0O_0Z_c \approx 176.7^\circ$ , в двух последних —  $\angle X_0O_0X_c \approx 90.4^\circ$ ,  $\angle X_0O_0Y_c \approx 176.9^\circ$ ,  $\angle X_0O_0Z_c \approx 93.1^\circ$ . То есть в сеансах с 1 по 18 марта к направлению оси  $+O_0X_0$  был близок модуль «Кристалл», в остальных — модуль «Спектр». Для каждого из двух направлений ориентации ОС в полете значения вышепере-

численных углов в соседних сеансах измерений отличались не более, чем на  $0.1^\circ$ .

Для примера на рис. 5 квадратами с точкой показаны колебания угла  $\delta$  во время сеанса, выполненного 05.03.96. Моменты временных выборок  $\delta$  приведены к масштабу циклов зондирования  $N$  с погрешностью в 0.5 с. Максимальное отклонение ССК ОС на угол, равный  $\Delta\delta_{\max} = 0.291^\circ$ , зафиксировано в ТМИ угловых датчиков в  $15^{\text{h}}43^{\text{m}}44.5^{\text{s}}$  декретного московского времени (ДМВ) со значением  $\delta = 1.440^\circ$ . В предыдущей (за 7.1 с до этого момента) и последующей (спустя 14.2 с) выборках значения угла  $\delta$  одинаковы и равны  $1.149^\circ$ . Отклонение на  $0.291^\circ$  произошло в основном по углу тангажа в плоскости орбиты (оно зафиксировано также по углам  $\angle X_c O_c X_o$  и  $\angle Z_c O_c Y_o$ ), с небольшим креном (увеличением значения угла  $\angle Y_c O_c Y_o$  на  $0.023^\circ$ ). Этот поворот осей ССК ОС также зарегистрирован лидарным измерением, выполненным спустя 2.6 с, в  $15^{\text{h}}43^{\text{m}}47.1^{\text{s}}$  ДМВ, и давшим увеличение значения  $\Delta D(t)$  на 7—8 м по сравнению со значениями  $\Delta D(t)$  в соседних точках измерений (эта точка отмечена на рис. 5 крестиком). Вместе с тем расчеты показывают, что при средней высоте орбиты, равной в этот момент времени 410.8 км, за счет произошедшего приближения оптической оси лидара к надиру на угол  $\delta = 0.291^\circ$  должно было произойти уменьшение дальности  $D_n$  на 8 м. Несовпадение может быть объяснено тем, что истинное значение угла  $\alpha$  не соответствовало расчетному  $\alpha = 1.5^\circ$ , а было меньше его примерно на  $0.3^\circ$ , в результате чего реально произошло увеличение отклонения оптической оси от надира. Колебания угла  $\delta$  в остальных рассматриваемых сеансах измерений соответствуют примеру, приведенному на рис. 5 за исключением случайного отклонения на  $0.291^\circ$ .

#### К ОЦЕНКЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение измеренных  $D_n(t)$  и расчетных значений  $D_p(t)$  наклонной дальности показывает, что в обоих режимах ориентации ОС «Мир» существует изменяющаяся от сеанса к сеансу (по знаку, величине и углу наклона) систематическая разность между ними (см. рис. 3, б, 4, б, 5 и табл. 1—3). К ее возможным причинам можно отнести: 1) неточное знание положения оптической оси лидара в ССК ОС; 2) ошибки в системе единого времени станции и связанные с ними погрешности определения точного момента лазерного зондирования; 3) ошибки в расчетном баллистическом обеспечении.

Возможные ошибки за счет рефракции атмосферы [11, 12] не рассматриваются в виду их малости по сравнению с аппаратной погрешностью измерителя.

Первая отмеченная 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 него и снаружи [8]. Дополнительная погрешность могла возникнуть в связи с демонтажом лидара с иллюминатора модуля после проведения сеансов 1995 г. и повторной его установкой перед серией сеансов 1996 г. В конечном итоге можно считать, что погрешность определения реального положения оптической оси лидара в ССК ОС находится в конусе, ось которого параллельна плоскости  $X_c O_c Z_c$  и отклонена от оси  $-O_c X_c$  ( $-X'_c O_{cl}$ ) на угол  $\alpha = 1.5^\circ$ . Конус имеет плоский угол при вершине, равный  $\Delta\alpha \approx 0.3^\circ$  (см. кружок вокруг оптической оси лидара на рис. 1). Следует заметить, что погрешность  $\Delta D$ , связанная с неточным знанием положения оптической оси лидара, нелинейно увеличивается с увеличением угла  $\gamma$  (см. рис. 4 в [3]). Во время проводимых сеансов лазерного зондирования звездные датчики ОС «Мир» не функционировали. Это не позволило осуществить более точную привязку оптической оси лидара к ССК ОС. Не удалось также воспользоваться для этих целей системой GPS.

Как отмечено выше, в режиме ОСКр на интервале сеанса измерений в общем случае наблюдались колебания осей ССК ОС относительно осей ОСК в пределах  $\pm 0.04^\circ$ . При зондировании в надирном направлении с высоты 400 км такие угловые смещения приводят к несущественным ошибкам в определении высоты полета станции (до 0.1 м) и перемещению центра пятна излучения на земной поверхности до  $\pm 300$  м. Данные ТМИ угловых датчиков для режима ИСК2 являются недостаточно репрезентативными, поскольку в данном случае ориентация осей ССК ОС относительно осей ОСК непрерывно изменяется, а число угловых выборок в течение сеанса измерений мало.

Фиксация результатов лидарных измерений проводилась в системе единого времени, имеющейся на борту ОС. При записи сигналов ТМИ лидарных измерений на бортовые магнитофоны станции использовалась односекундная шкала времени и, при периоде  $T_n = 5.53$  с, момент регистрации  $D_n(t)$  осуществлялся с погрешностью  $\pm 0.5$  с. Из-за эллиптичности орбиты это приводило к ошибкам в

определении величины  $\Delta D$  при сравнении  $D_i(t)$  и  $D_p(t)$  в моменты времени, смещенные на 0.5 с. Кроме этого, временная привязка всех баллистических расчетов также осуществляется с погрешностью, достигающей 1 с.

Основное различие между значениями  $D_i(t)$  и  $D_p(t)$  возникало из-за систематической погрешности в значениях  $D_p(t)$ , рассчитываемых на основе данных системы радиолокационного контроля орбиты ОС. По сведениям Группы математического моделирования ЦУП для северного полушария погрешность в расчетном значении высоты орбиты  $H_p(t)$  могла составлять 150 м. В южном полушарии, где пункты радиоконтроля орбиты отсутствуют, величина погрешности увеличивалась. Поскольку все баллистические расчеты привязываются к моменту времени  $T_0$  и долготе  $L_0$ , при которых проекция траектории орбиты пересекает земной экватор, то ошибки в 1 с приводят к дополнительной погрешности величины  $H_p(t)$  в 5÷15 м (за счет эллиптичности орбиты), и соответственно к увеличению наклонной дальности, при  $\gamma \neq 0$ . Существует также постоянная систематическая погрешность, связанная с тем, что центры ССК ОС и лидара смещены по высоте примерно на 5 м.

Таким образом в проведенных сеансах дальнометрирования океанической поверхности лидаром БАЛКАН основной причиной расхождений между измеренными и расчетными значениями наклонной дальности до океанической поверхности следует считать неточные изначальные значения  $\alpha$  и  $H_p(t)$ . Первые вызывают различный наклон трендов  $\Delta D(t)$  (см. рис. 4, б). Вторые влияют как на величину постоянного смещения тренда, так и на угол его наклона относительно оси абсцисс на рис. 3, б, 4, б и 5.

Среди полученных результатов следует отметить наблюдаемые на этих рисунках волнообразные колебания значений  $\Delta D(t) = D_i(t) - D_p(t)$  относительно соответствующих трендов. Колебания не являются чисто гармоническими, их пространственный период составляет в среднем 150—250 км, а амплитуда равна 5—7 м для ориентации ОСКр и достигает 11 м в ориентации ИСК2, что не может быть обусловлено рассмотренными выше колебаниями оптической оси лидара относительно надирного направления. По мнению автора, существуют две причины наблюдаемых колебаний  $\Delta D(t)$ . Первая — возможные неровности океанической поверхности, обусловленные внутренними волнами в океане [10], вторая — возможные колебательные флюктуации высоты орбиты ОС «Мир».

В последних сообщениях о разрабатываемом американском проекте геодезического лазерного альти-

метра GLAS [11, 14] приведены оценки различных источников, вносящих вклад в погрешность лазерного космического дальнометрирования, и определены допустимые отклонения оптической оси лидара от надира для дистанционного измерения высоты ледяных щитов в Арктике и Антарктике с погрешностью 20 см при высоте орбиты космического аппарата 600 км.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные космические эксперименты по лазерному зондированию океанической поверхности показали возможности лидара БАЛКАН для определения высоты орбиты ОС «Мир» с достаточно высокой точностью (1.5 м). По данным ТМИ, полученной от гиродинных датчиков ОС, проведен анализ стабильности ориентации оптической оси лидара в сеансах измерений. Дана оценка возможных причин систематических расхождений между расчетными баллистическими данными и результатами измеренных значений наклонной дальности для двух режимов ориентации ОС. Полученные данные о возможных колебаниях осей системы координат станции во время полета необходимо учитывать при разработке алгоритмов обработки информации космического доплеровского лидара [15].

Разгерметизация модуля «Спектр», произошедшая летом 1997 г., не позволила продолжить эксперименты по зондированию поверхности Земли и облачных полей с помощью лидара БАЛКАН.

Автор особенно признателен сотрудникам Группы математического моделирования ЦУП и ее ведущему специалисту Манжелеву А. И. за составление программ баллистического обеспечения экспериментов и проведенные расчеты, а также экипажам космических экспедиций ЭО-19, ЭО-20, ЭО-21 и всем сотрудникам ЦУП, участвовавшим в и проведении космических экспериментов по лазерному зондированию.

1. Алексеев А. В., Кабанов М. В., Куштин И. Ф., Нелюбин. Оптическая рефракция в земной атмосфере (наклонные трассы). — Новосибирск: Наука, 1983.—230 с.
2. Балин Ю. С., Знаменский И. В., Зуев В. Е. и др. Российский космический лидар БАЛКАН-1 // Оптика атмосферы и океана.—1995.—8, № 9.—С. 1332—1343.
3. Балин Ю. С., Тихомиров А. А. Лазерное зондирование Земли из космоса. II. Методологические основы лидарных измерений с борта орбитальной станции // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 1—2.—С. 26—33.
4. Балин Ю. С., Тихомиров А. А., Самойлова С. В. Предварительные результаты зондирования облаков и подстилающей поверхности Земли лидаром БАЛКАН // Оптика атмосферы и океана.—1997.—10, № 3.—С. 333—352.



5. Балин Ю. С., Тихомиров А. А., Самойлова С. В. Лазерное зондирование Земли из космоса. III. Результаты космических экспериментов по зондированию подстилающей поверхности и облаков лидаром БАЛКАН // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 1/2.—С. 1—7.
6. Захаров В. М., Костко О. К., Павлов В. И., Фаина В. П. Экспериментальные исследования отражающих свойств земной поверхности и атмосферных образований при лазерном зондировании // Тр. ЦАО.—1973.—Вып. 105.—С. 80—83.
7. Зуев В. Е., Балин Ю. С., Тихомиров А. А. и др. Лазерное зондирование Земли из космоса. I. Российский лидар космического базирования БАЛКАН // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 1—2.—С. 16—25.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1968.—720 с.
9. Лазерное зондирование атмосферы из космоса // Под ред. В. М. Захарова. — Л.: Гидрометеиздат, 1988.—215 с.
10. Нелепо Б. А., Гришин Г. А., Киенко Ю. П., Коваль А. Д. Оптические методы спутниковой гидрофизики: Исследование окружающей среды с автоматических ИСЗ. — Киев: Наук. думка, 1986.—160 с.
11. Abshire J. B., Schutz B. E., Smith J. C. The geoscience laser altimeter system (GLAS) // Abstracts 19-th ILRS.—1998.—P. 211—214.
12. Bufton J. L. Laser altimetry measurements from aircraft and spacecraft // Proc. IEEE.—1989.—77, N 3.—P. 463—477.
13. Bufton J. L., Hoge F. E., Swift R. N. Airborne measurements of laser backscatter from the ocean surface // Appl. Opt.—1983.—22, N 17.—P. 2603—2618.
14. Millar P. S., Sirota J. M. Laser pointing determination for the geoscience laser altimeter system // Abstracts 19-th ILRS.—1998.—P. 215—218.
15. Werner Ch., Brand B., Jochim E. F. Doppler lidar on the space station // Proc. SPIE.—1995.—2581.—P. 148—162.

---

#### SOME RESULTS OF THE RANGING OF THE OCEAN SURFACE WITH THE SPASE-BASED LIDAR BALKAN

A. A. Tikhomirov

Some peculiarities in the ranging of the Earth surface with the space-based lidar BALKAN are considered for two modes of the space station «Mir» orientation which were used during measurement experiments in 1995—1996, and some results that were presented earlier are refined. Measurement results are compared with the slant range values obtained from ballistic calculations of the space trajectory. In analysis we use: a priori calculated ballistic data; range values measured in lidar sessions; telemetry reports of the space station «Mir» orientation obtained from its traffic control system. We have analyzed the telemetry reports on the orientation of the space station-fixed coordinate system axes and, consequently, the lidar optical axis direction relative to the basic orbital coordinate system in several measurement sessions. We have also estimated the influence of the lidar optical axis fluctuations on the measurement results. We have explained some possible causes of the discrepancy between the calculated and measured values of the slant range as well as some peculiarities of the measurement results.