

УДК 520.874.7

О. В. Болотина, Ю. М. Глущенко, М. М. Медведский,
Н. Н. Перетятко, В. Р. Суберляк, Д. Я. Яцкив

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины,
03680, Киев, ГСП, ул. Академика Заболотного, 27

Лазерный спутниковый дальномер «Голосиив-Киев». Технические характеристики и результаты наблюдений 2001 года

Приведены основные технические характеристики лазерного спутникового дальномера «Голосиив-Киев». Описаны принцип работы и программный комплекс дальномера. Указаны особенности наведения и сопровождения ИСЗ телескопом, проведения калибровки измерений. Приведены результаты и анализ наблюдений ИСЗ, оценки точности измерений дальностей. Уточнены координаты реперной точки дальномера по лазерным наблюдениям спутников LAGEOS-1 и LAGEOS-2 за период 24.01.01—17.06.01. Приведены результаты сравнения полученных методом SLR и вычисленных по геодезическим измерениям координат ЛСД и анализ их разностей.

ЛАЗЕРНИЙ СУПУТНИКОВИЙ ДАЛЕКОМІР «ГОЛОСІІВ—КИЇВ». ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ І РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ 2001 РОКУ, Болотина О. В., Глущенко Ю. М., Медведський М. М., Перетятко М. М., Суберляк В. Р., Яцкив Д. Я. — Приведено основні технічні характеристики лазерного супутникового далекоміра (ЛСД) «Голосіів-Київ». Описано принцип роботи та програмний комплекс далекоміра. Вказано на особливості наведення і супроводу ІСЗ телескопом, процедури калібрування вимірювань. Приведені результати та аналіз спостережень ІСЗ, оцінки точності вимірювань дальностей. Уточнено координати реперної точки далекоміра за лазерними спостереженнями супутників LAGEOS-1 і LAGEOS-2 за період 24.01.01—17.06.01. Приводяться результати порівняння отриманих SLR-методом і обчислених за геодезичними вимірюваннями координат ЛСД та аналіз їхніх різниць.

SATELLITE LASER RANGING STATION «HOLOSIIV-KYIV». TECHNICAL CHARACTERISTICS AND RESULTS OF 2001 OBSERVATIONS, by Bolotina O. V., Gluschenko Yu. M., Medvedskij M. M., Peretyatko N. N., Suberlyak V. R., Yatskiy D. Ya. — Basic characteristics of the satellite laser ranging station «Holosiiv-Kyiv» (SLR) are presented. The principle of operation and the field system software of the station are described. Some peculiarities of the satellite tracking system and the calibration of measurements are discussed. The results and the analysis of observations and accuracy

estimations of distance measurements are given. The coordinates of the SLR station reference point are improved on the basis of LAGEOS-1 and LAGEOS-2 observations over the period 24.01.01—17.06.01. The coordinates obtained with the SLR method and calculated on the basis of geodetic measurements are compared, and their differences were analyzed.

ВСТУПЛЕНИЕ

Лазерный спутниковый дальномер (ЛСД) «Голосиив-Киев» создан на базе передвижного лазерного телескопа серии «Крым» (ТПЛ-1) и предназначен для определения расстояния между спутником, оснащенным уголковым отражателем, и реперной точкой дальномера (точкой пересечения механических осей вращения телескопа) в единой шкале времени (UTC GPS). ЛСД «Голосиив-Киев» был смонтирован в 1985 г. для проведения экспериментальных исследований в области спутниковой дальнометрии. В 1997 г. было принято решение проводить регулярные ночные наблюдения ИСЗ в составе украинской и международной сетей лазерных дальномеров. В 1999 г. дальномер был зарегистрирован в международной сети ILRS (International Laser Ranging Service), и с начала 2000 г. результаты наблюдений передаются по сети Internet в международный центр обработки данных EDC (EuroLas Data Center, Мюнхен, Германия) для последующего исследования параметров вращения Земли, уточнения координат станций лазерной локации ИСЗ, навигации космических миссий геодинамического характера.

АППАРАТУРА И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Общая блок-схема комплекса ЛСД «Голосиив-Киев» представлена на рис. 1. Его основными подсистемами являются:

- лазер;
- приемно-передающая система:
 - фотоприемники сигналов «старт», «стоп»,
 - подсистема оптического согласования телескопа с лазерным передатчиком и фотоприемниками;
- система управления телескопом:
 - телескоп серии ТПЛ-1,
 - шаговые двигатели,
 - датчики положения;
- система сбора информации и управления комплексом ЛСД;
- служба времени и частоты;
- система визуального контроля:
 - гид-телескоп,
 - электронно-оптический преобразователь,
 - ПЗС-камера.

К основным техническим характеристикам дальномера относятся:

- абсолютная точность одного измерения 7.2 см
- рабочий диапазон измерений расстояний до ИСЗ 750—8300 км
- частота посылки зондирующих импульсов 10 Гц
- телескоп:
 - оптическая система (катадиоптрическая предфокальная система, где первичное зеркало — сфера, а вторичное — сфера с корректирующей линзой): с фокусом куда
 - диаметр главного зеркала 1 м
 - эквивалентное фокусное расстояние 21 м
 - монтажная альт-азимутальная
 - погрешность наведения < 20"

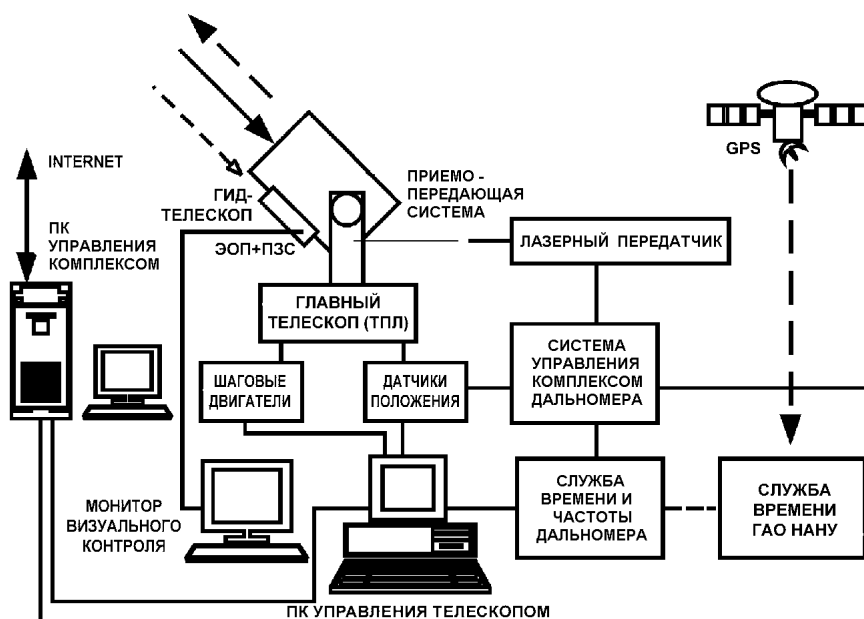


Рис. 1. Общая блок-схема комплекса ЛСД «Голосив-Киев»

максимальная скорость сопровождения объектов	2.5°/с
— лазер:	
длина волны излучения	532 нм
энергия импульса	0.01—0.03 Дж
длительность импульса	0.4 нс
управляемое изменение расхождения лазерного луча на выходе телескопа	8—60"
— служба времени	1 мкс, GPS-синхронизация
— режим работы дальномера	полуавтоматический, ночной

Детальные технические характеристики отдельных электронно-оптических узлов приведены в работе [11].

ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЙ ДО ИСЗ

Подготовка поисковых эфемерид. Для наведения и сопровождения ИСЗ телескопом вычисляются координаты спутника в горизонтальной системе координат (азимут A и высота h) на заданные моменты времени с помощью пакета программ «PC-TIVAS» [10], рекомендованного международной службой ILRS и адаптированного в ГАО НАНУ. Расчет поисковой эфемериды осуществляется в два этапа:

- по известным эфемеридам в TIRV-формате (Tuned Inter-Range Vector) [10] определяются геоцентрические координаты X , Y , Z и скорости V_x , V_y , V_z ИСЗ;
- определяются фаза (степень освещенности спутника Солнцем относительно наблюдателя) и поисковые координаты A , h ИСЗ на заданный момент.

Эфемериды ИСЗ уточняются ежедневно по результатам наблюдений на дальномерах ILRS и распространяются в TIRV-формате по сети Internet.

Для преобразования геоцентрических координат ИСЗ в горизонтальные используется рекомендованная IIRS модель гравитационного поля Земли GEM10N [10].

Наведение и сопровождение ИСЗ телескопом. Для успешного проведения локации необходимо точное наведение на спутник и его сопровождение на протяжении всего сеанса наблюдений. Это обеспечивается предвычислением поисковых координат A, h на каждую секунду прохождения и скоростей их изменения A, h , которые задают скорость ведения ИСЗ телескопом. Моменты времени определяются по внутренним часам компьютера, синхронизированным с часами дальномера с точностью 0.01 с.

Из-за влияния ряда инструментальных погрешностей оптическая ось телескопа отклоняется от направления на объект наблюдения, в связи с чем возникает необходимость учета в видимых координатах спутника поправок азимута и высоты. Для их определения используется численная модель погрешностей наведения телескопа [4]. Она обеспечивает точность наведения порядка 20". Такой предел точности обусловлен некачественным изготовлением азимутальной платформы телескопа. Однако этого достаточно для локации ИСЗ, находящихся в тени Земли, и ИСЗ с яркостью, меньшей проникаемой способности гида телескопа, что существенно повышает эффективность ЛСД.

Во время сеанса локации проводится визуальный контроль сопровождения видимых ИСЗ из наблюдений объекта через гид телескопа, оснащенный видеокамерой и электронно-оптическим усилителем (рис. 1). В случае значительной погрешности эфемериды спутника имеется возможность проводить ручную коррекцию движения телескопа при помощи джойстика (рис. 2).

Управление и проведение лазерных измерений. Принцип работы дальномера иллюстрирует рис. 2, на котором представлена его функциональная блок-схема. Короткий лазерный импульс через систему оптического согласования попадает в телескоп, который коллимирует лазерный луч и направляет его на уголкового отражателя ИСЗ. Часть лазерного импульса отводится на лавинный фотодиод и преобразуется в электрический импульс «старт». Отраженный от уголкового отражателя ИСЗ и принятый телескопом световой сигнал через систему оптического согласования направляется в фотоприемник, который преобразует его в электрический импульс «стоп». С помощью дискриминатора с плавающим порогом этот сигнал привязывается к одной точке фронта электрического импульса и не зависит от его амплитуды. При многократном повторении лазерных посылок образуется последовательность импульсов «старт»—«стоп», поступающая для обработки в систему сбора информации и управления комплексом дальномера. Система производит выделение отраженного сигнала из шумов (система «временных ворот»), измеряет локационную задержку (время распространения лазерного импульса до цели и обратно) с помощью измерителя временных интервалов; осуществляет контроль и управление системами дальномера, а также регистрацию информации о результатах измерений.

Используя основную формулу лазерной локации

$$R = \frac{ct}{2} + \Delta r(t, p, B, h),$$

можно определить расстояние R между спутником и регистрирующей системой дальномера, зная локационную задержку t . Здесь c — скорость света в вакууме, Δr — поправка за атмосферную задержку, являющуюся функцией высоты ИСЗ и метеопараметров: температуры t , атмосферного давления p и влажности воздуха B ; h — высота спутника над горизонтом. Эти параметры измеряются вблизи реперной точки дальномера и использу-

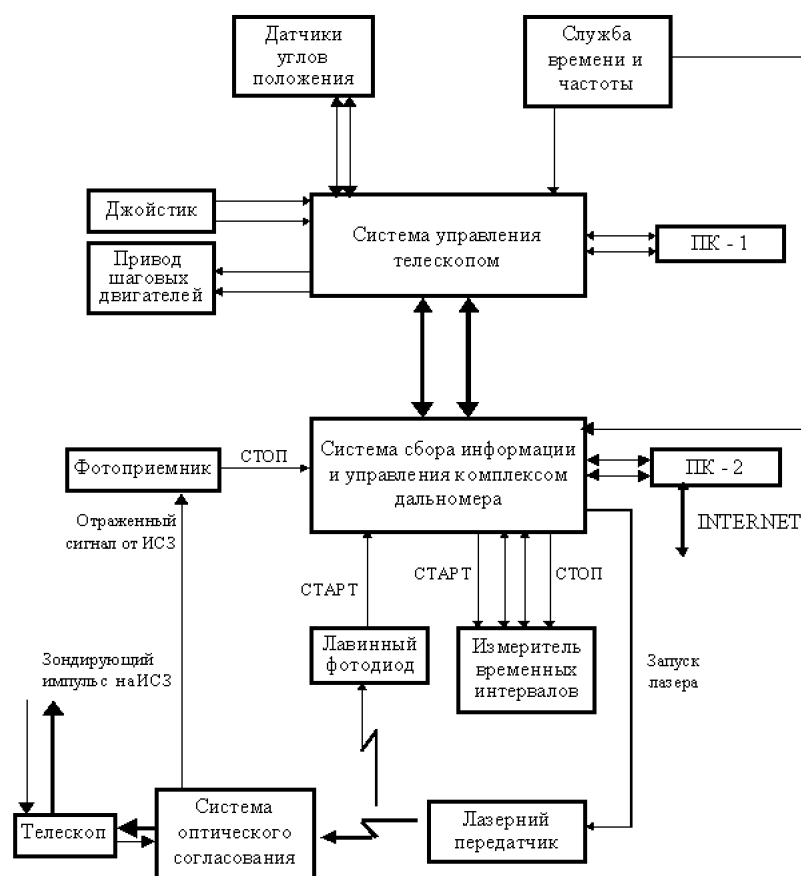


Рис. 2. Функциональная блок-схема ЛСД «Голосиив-Киев»

ются в модели атмосферы [6], согласно которой вычисляется поправка Δr . Величина Δr существенно зависит от h , B и изменяется в пределах 5–30 м.

Калибровка проведенных измерений. В качестве реперной точки ЛСД принята точка пересечения осей вращения телескопа. Для измерения локационной задержки относительно реперной точки необходимо определить аппаратную задержку, т. е. прокалибровать систему измерений. Для калибровки ЛСД используется внешняя мишень, оформленная в виде уголкового отражателя. Расстояние между мишенью и реперной точкой R_m измерено геодезическим методом с миллиметровой точностью и составляет 121.0196 м [3]. Аппаратная задержка τ_a определяется формулой

$$\tau_a = \tau_m - 2R_m n/c,$$

где τ_m — измеренное время распространения лазерного импульса до мишени и обратно, n — показатель преломления света воздухе для длины волны 532 нм. Показатель преломления n является функцией метеопараметров и может обуславливать изменение τ_a на 200–500 пс [1]. После предварительной обработки результатов из полученных нормальных измерений вычитается найденная аппаратная задержка для их приведения к реперной точке отсчета.

Программный комплекс дальномера. Управление ЛСД «Голосиив-Киев» осуществляется с помощью разработанного и реализованного на языке программирования С под операционной системой DOS программного

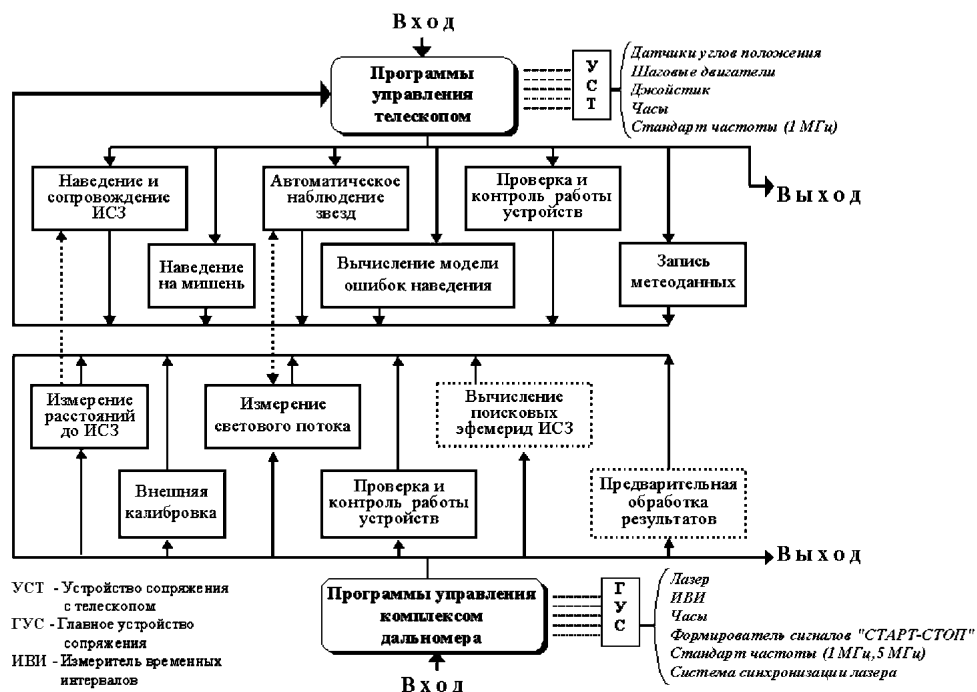


Рис. 3. Структурная блок-схема пакета программ управления ЛСД «Голосиив-Киев»

комплекса (рис. 3). Связь между персональными компьютерами (ПК) и аппаратурой обеспечивается посредством интерфейсных систем управления телескопом и комплексом дальномера. Программный комплекс состоит из пакетов программ управления телескопом и комплексом дальномера, работающих в режиме реального времени, за исключением программ для подготовки поисковых эфемерид ИСЗ, вычисления модели ошибок наведения телескопа и предварительной обработки результатов измерений.

Основной в пакете управления комплексом дальномера является программа измерения расстояний до ИСЗ, взаимодействие которой с приемопередающей системой показано на рис. 4. Она состоит из следующих процедур:

- 1) передача поисковой эфемериды ИСЗ в программу наведения и сопровождения ИСЗ телескопом (рис. 3);
- 2) определение временных задержек «стоп—старт» измерителем временных интервалов (ИВИ) и фиксация моментов «старт» с помощью часов;
- 3) запись накопленных результатов в соответствующий файл данных.

Процедура 1 выполняется один раз в начале работы программы, после чего ведение ИСЗ и его локация проводятся независимо. Процедуры 2 и 3 выполняются циклически до окончания прохождения ИСЗ или поступления команды принудительной остановки.

Процедура измерения временных задержек имеет следующую особенность. Фотоприемник сигналов «стоп» рассчитан на работу как с одно-, так и с многофотонным сигналом. Следствием такого динамического режима является регистрация шумовых импульсов (ложных «отражений» от ИСЗ). Для выделения истинных отражений на фоне ложных используются так называемые программируемые «временные ворота» (рис. 4). Они стробируют канал приема сигналов «стоп» ИВИ в расчетное для каждого измерения время. Дискретность установки «временных ворот» составляет 1 мкс и

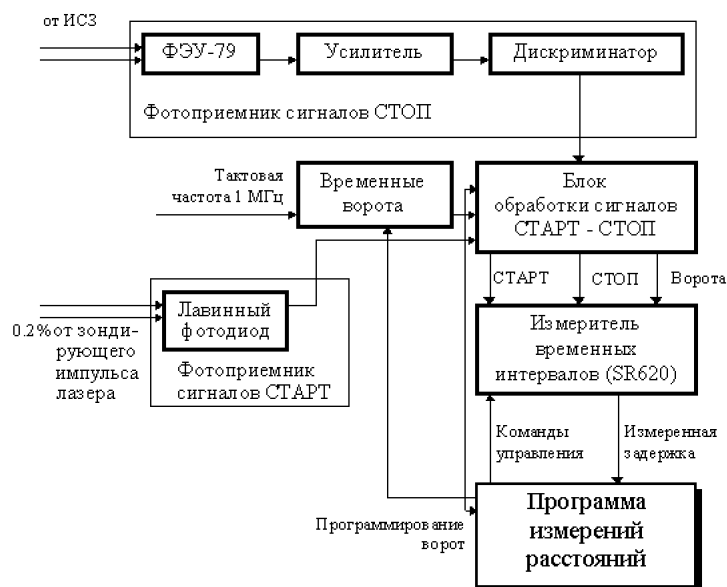


Рис. 4. Схема взаимодействия программы измерения расстояний до ИСЗ с приемо-передающей системой

допускает их коррекцию во время работы программы в диапазоне от 1 мкс до 14 мкс.

Для взаимодействия данной программы с блоком обработки сигналов «старт» и «стоп» используются специально разработанные интерфейсы связи. Для взаимодействия с ИВИ используется стандартный интерфейс GPIB IEEE.488.

Данная электронно-оптическая конструкция дальномера позволяет проводить измерения временных задержек, времени распространения лазерного импульса до ИСЗ и обратно в пределах от 5 мс до 130 мс.

Для предварительной обработки результатов измерений используется пакет программ, разработанный на ЛСД «Боровец» (Польша) в 1999 г. [9] и адаптированный под дальномер «Голосиив-Киев». Он разрешает отделять полезные измерения от шумовых, проводить обработку результатов калибровок, определять и учитывать смещения полученных и вычисленных по эфемеридам дальностей и моментов времени, оценивать внутреннюю погрешность результатов, проводить каталогизацию данных. Полученный в итоге файл нормальных измерений в стандартном формате отсылается по сети Internet в международный центр обработки данных EDC.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ТОЧНОСТЬ ЛАЗЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Результатами локации ИСЗ являются отнесенные к реперной точке дальномера временные задержки распространения светового сигнала, величина аппаратной задержки и их точности, моменты стартовых импульсов, метеоданные на период локации. Типичное распределение разностей $O - C$, определенных на ЛСД «Голосиив-Киев» и вычисленных по эфемеридам расстояний от реперной точки ЛСД до уголкового отражателя ИСЗ за период одного прохождения спутника, приведено на рис. 5. Внутренняя точность единичного измерения составляет 8 см, что удовлетворительно согласуется с оценкой 7.2 см, полученной по данным обработки лазерных наблюдений ИСЗ LAGEOS-1 и LAGEOS-2 Центром космических исследований Техасского университета за период январь—июнь 2001 г.

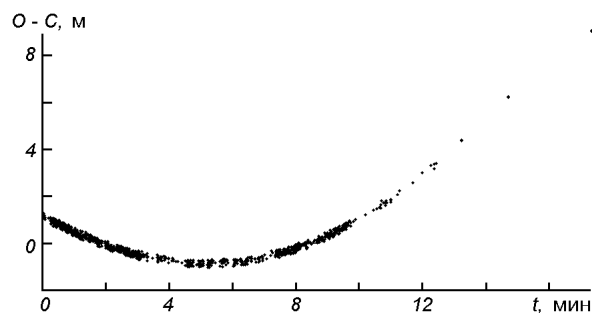


Рис. 5. Исходные результаты лазерной локации геодинамического спутника LAGEOS-2 за 20.07.2001 (1028 измерений; начало локации 0 ч 16 мин UTC)

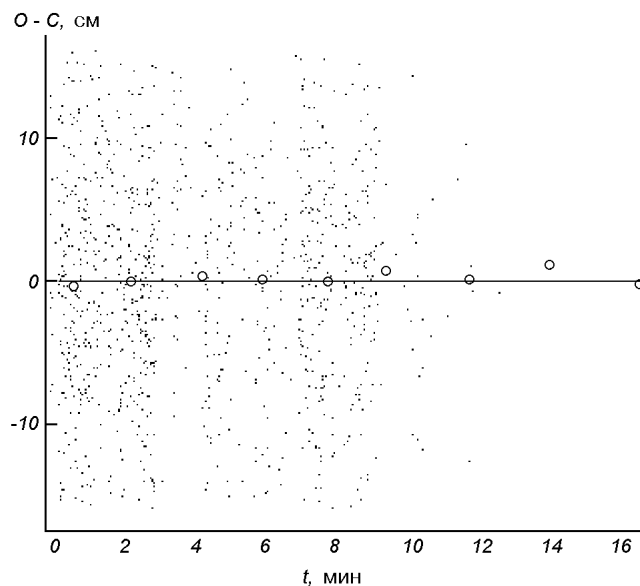


Рис. 6. Результаты обработки сеанса локации ИСЗ LAGEOS-2 (20.07.2000 г., 1028 измерений, временной сдвиг 22.7 мс, сдвиг по дальности 15.7 см, СКО = 7.5 см): точки — распределение остаточных разностей; кружки — распределение вычисленных нормальных разностей

По найденным $O - C$ вычисляются временной сдвиг (time bias) и пространственный сдвиг (range bias) орбиты ИСЗ. Распределение остаточных разностей $O - C$ после учета этих сдвигов иллюстрирует рис. 6. Показаны также положения нормальных точек. Оценка точности по нормальным точкам, предоставленная Центром космических исследований, составляет 1.1 см.

На рис. 7 приведена гистограмма полученных калибровочных измерений времени распространения лазерного импульса до мишени и обратно, которая близка к нормальному распределению. Средние значения погреш-

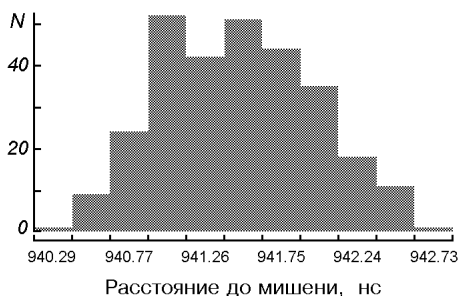


Рис. 7. Пример калибровки по внешней мишени (среднее 941.59 ± 0.489 нс)

Таблица 1. Наблюдаемые на ЛСД «Голосиив-Киев» спутники

N	Спутник	Назначение	Инструменты	H, км	i, град	T, мин
1	LAGEOS-1	геодинамика		5850	109.8	225
2	LAGEOS-2	геодинамика		5625	52.6	222
3	WESTPAC-1	геодинамика		835	98.0	101
4	TOPEX/ Poseidon	зондирование Земли	микроволновой радиометр, высотометр, GPS-приемник, DORIS	1350	66.0	112
5	STELLA	геодинамика		815	98.6	101
6	STARLETTE	геодинамика		815— 1100	49.8	104
7	GFO-1	геофизика	высотометр, радиометр, GPS-приемник, DORIS	790	108.0	100
8	ERS-2	геофизика	высотометр, радиометр	800	98.6	676
9	CHAMP	геофизика	измеритель ускорения, магнитометр, GPS-приемник	429— 474	87.3	94
10	BEACON-C	зондирование Земли	электростатический зонд, радиомаяк, доплеровская РЛС	950— 1300	41.0	117
11	AJISAI	геодинамика		1485	50.0	116

ности единичного измерения τ_m для ЛСД «Голосиив-Киев» и аппаратной задержки составляют 7 см и 134 нс соответственно.

Среднесуточное значение range bias (короткопериодическая стабильность) по наблюдениям LAGEOS-1 и LAGEOS-2 составляет 48 мм, что, вероятно, связано с нестабильными результатами калибровки; нестабильной работой лазера.

С 1997 г. на дальномере «Голосиив-Киев» проводятся ночные сеансы наблюдений всех предназначенных для лазерной локации низкоорбитальных ИСЗ. С 2001 г. ведутся локации ИСЗ LAGEOS-1 и LAGEOS-2. Некоторые характеристики наблюдений приведены в табл. 1; на рис. 8 показаны количество наблюдений и полученных из них нормальных точек за январь—июль 2001 г. Всего произведено 414 наблюдений и получено 5213 нормальных точек.

В 1999 г. дальномер был зарегистрирован в сети ILRS со следующими регистрационными кодами:

NAME	Golosiiv-Kiev
CDP	1824
IERS DOMES NUMBER	12356
MARK	S001
PLATE	EURA

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТ РЕПЕРНОЙ ТОЧКИ ЛСД «ГОЛОСИИВ-КИЕВ»

Работы по определению и уточнению координат (вектора положения) реперной точки ЛСД «Голосиив-Киев» проводились ранее неоднократно. Оценки геоцентрических координат дальномере по доплеровским наблюдениям ИСЗ приведены в работе [2]. Точность их определения (1—2 м) не удовлетворяет современным требованиям. Координаты реперной точки ЛСД и перманентной GPS-станции (GLSV) в локальной системе координат были определены с миллиметровой точностью в результате высокоточных геодезических измерений [3].

В данной работе приведены результаты уточнения координат реперной точки дальномере по результатам лазерной локации спутников LAGEOS-1 и LAGEOS-2 на ЛСД «Голосиив-Киев» за период 24.01.2001—17.06.2001.

Уточнение координат реперной точки ЛСД «Голосиив-Киев» по результатам лазерной локации LAGEOS-1 и LAGEOS-2. Полученные методом лазерной локации (SLR-техника) наблюдения обрабатывались с

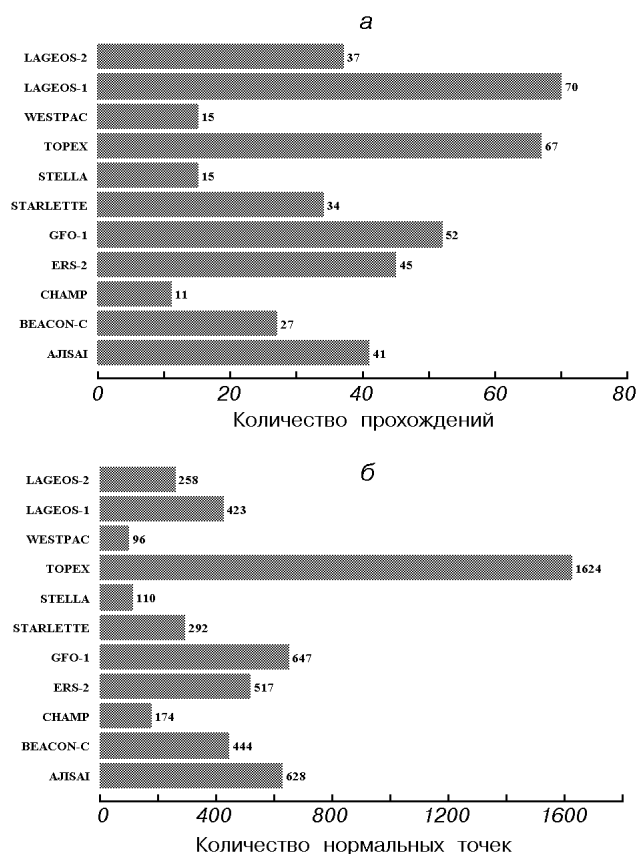


Рис. 8. Результаты наблюдений ИСЗ на ЛСД «Голосиив-Киев» за период январь-июль 2001 г.

помощью программного комплекса «Киев-Геодинамика 5.2» [7]. Применялись модели и алгоритмы, указанные в работе [8].

В обработке использовались наблюдения 117 станций лазерной локации. Исходные значения координат новых станций 1824 «Голосиив-Киев» и 7355 «Урумчи» были взяты из решения SSC(CSR)95L01 Центра космических исследований Техасского университета

(ftp://ftp.csr.utexas.edu/pub/SLR/weekly/stations_information).

Начальные значения координат остальных 115 станций соответствуют решению SSC(GAOUA)00L01, полученному из обработки лазерных наблюдений спутников LAGEOS-1 и LAGEOS-2 за периоды 01.09.83—23.01.01 и 24.10.92—23.01.01 соответственно.

Уточнение координат реперной точки станции 1824 проводилось в два этапа. На первом этапе интервал наблюдений с 23.01.01 по 17.06.01 разбивался на 15-суточные орбитальные дуги, на которых уточнялись только элементы орбиты спутников. Параметры вращения Земли (ПВЗ), координаты и скорости станций при этом фиксировались. Улучшение элементов орбиты проводилось итерационным способом. Количество итераций определялось величиной параметра сходимости Δ , который для последней итерации не превышает 2 мм. Индексные обозначения дуг, соответствующее им количество итераций k , финальное значение параметра сходимости и количество наблюдений Σ каждого из спутников на 15-суточной дуге представлены в табл. 2.

На этом этапе станции 7355 («Урумчи») и 7343 («Пекин») были исключены из дальнейшей обработки ввиду неудовлетворительных значе-

Таблица 2. Распределение наблюдений ИСЗ LAGEOS-1 и LAGEOS-2 ЛСД «Голосиив-Киев» по 15-суточным орбитальным дугам

Дуга	κ	Δ , мм	Σ	Дуга	κ	Δ , мм	Σ
LAGEOS-1				LAGEOS-2			
s603	2	0.0	13	1603	3	1.0	8
s604	3	0.0	—	1604	3	0.0	—
s605	3	0.0	89	1605	4	0.1	35
s606	2	2.0	3	1606	9	0.1	—
s607	3	0.4	14	1607	4	0.7	3
s608	2	1.1	41	1608	3	0.1	4
s609	8	1.8	4	1609	3	0.1	—
s610	6	1.0	50	1610	3	0.0	—
s611	3	0.6	5	1611	3	0.1	—

ний (более 10^4 м) разностей $|O - C|$. На втором этапе обрабатывались наблюдения, полученные на всем рассматриваемом интервале. При этом фиксировались элементы орбиты спутников, ПВЗ, координаты и скорости всех станций, за исключением координат станции 1824.

Распределения разностей определенных из наблюдений на ЛСД «Голосиив-Киев» и вычисленных координат $|O - C|$ ИСЗ LAGEOS-1 и LAGEOS-2 близки к нормальным и представлены на рис. 9.

Искомые координаты определялись отдельно по наблюдениям LAGEOS-1 и LAGEOS-2, а также по их совокупности. Вычисления проводились с различными ограничениями по $|O - C|$. В результате обработки полученных SLR-методом наблюдений найден следующий вектор положе-

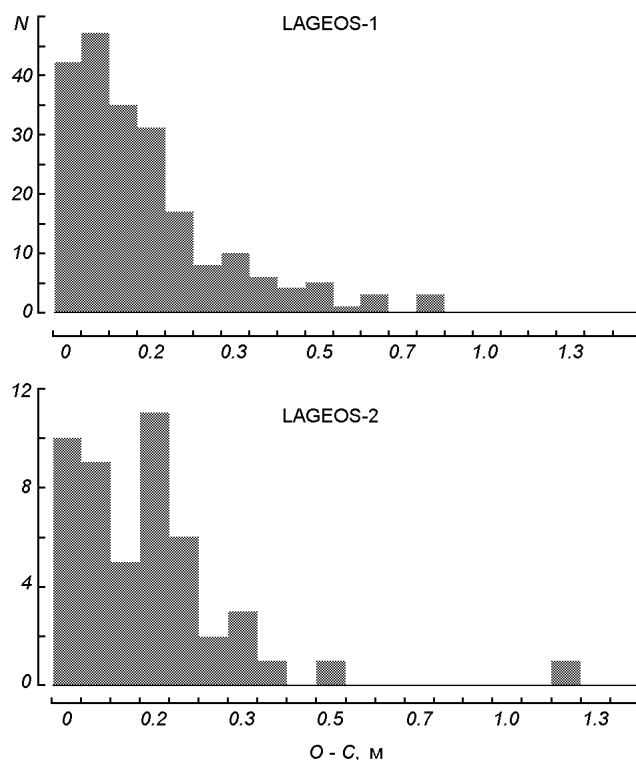


Рис. 9. Гистограмма распределения наблюдений по значениям $|O - C|$ для ИСЗ LAGEOS-1 и LAGEOS-2

ния реперной точки ЛСД «Голосиив-Киев» с точностью 1—2 см в системе SSC(GAOUA)00L01:

$$(\mathbf{R}_{1824}^{\text{GAO}})_{\text{SLR}} = \{3512989.463, 2068968.664, 4888817.296\}.$$

Здесь и далее компоненты векторов приводятся в метрах. Для приведения $(\mathbf{R}_{1824}^{\text{GAO}})_{\text{SLR}}$ к системе ITRF97 были проанализированы координаты 97 станций лазерной локации, заданные как в ITRF97, так и в SSC(GAOUA)00L01, и найдены параметры преобразования Гельмерта между этими системами:

Смещение по оси X:	$T1 = -0.0110 \pm 0.0095$ м
Смещение по оси Y:	$T2 = -0.0100 \pm 0.0091$ м
Смещение по оси Z:	$T3 = 0.0149 \pm 0.0088$ м
Масштабный множитель:	$D = -0.0007 \pm 0.0013 \cdot 10^{-6}$
Поворот около оси X:	$R1 = -0.0003 \pm 0.0004''$
Поворот около оси Y:	$R2 = -0.0004 \pm 0.0004''$
Поворот около оси Z:	$R3 = -0.0006 \pm 0.0003''$

По алгоритму из работы [6] получен следующий вектор положения реперной точки ЛСД «Голосиив-Киев» в системе ITRF97, базирующийся на полученных при помощи SLR-техники наблюдениях:

$$(\mathbf{R}_{1824}^{\text{ITRF}})_{\text{SLR}} = \{3512989.469, 2068968.669, 4888817.281\}.$$

Сравнение различных оценок координат реперной точки ЛСД «Голосиив-Киев». Было проведено сравнение полученного выше $(\mathbf{R}_{1824}^{\text{ITRF}})_{\text{SLR}}$ и вычисленного нами на основании высокоточных геодезических измерений (GEO) из работы [3] $(\mathbf{R}_{1824}^{\text{ITRF}})_{\text{GPS}}$ векторов положения реперной точки станции 1824.

Процедура вычисления $(\mathbf{R}_{1824}^{\text{ITRF}})_{\text{GPS}}$ заключалась в следующем. За исходные были приняты измеренные в локальной системе координат (LOC) с миллиметровой точностью [3] вектор положения дальномера

$$(\mathbf{R}_{1824}^{\text{LOC}})_{\text{GEO}} = \{-115.92047, -63.62488, -12.45181\}$$

и вектор положения перманентной GPS-станции (GLSV)

$$(\mathbf{R}_{\text{GLSV}}^{\text{LOC}})_{\text{GEO}} = \{1.03399, -3.23615, 1.45285\}.$$

По координатам пункта GLSV, полученным из обработки высокоточных радиотехнических наблюдений (GPS-техника) в системе ITRF97 [5],

$$(\mathbf{R}_{\text{GLSV}}^{\text{ITRF}})_{\text{GPS}} = \{3512889.126, 2068979.769, 4888903.127\}$$

с использованием алгоритма [6] были определены его географические координаты λ и φ , которые рассматривались в дальнейшем как параметры преобразования между локальной системой координат и ITRF97. По ним была образована матрица преобразования \mathbf{M} . Затем из уравнения

$$(\mathbf{R}_{1824}^{\text{ITRF}})_{\text{GPS}} - (\mathbf{R}_{\text{GLSV}}^{\text{ITRF}})_{\text{GPS}} = \mathbf{M} \times [(\mathbf{R}_{1824}^{\text{LOC}})_{\text{GEO}} - (\mathbf{R}_{\text{GLSV}}^{\text{LOC}})_{\text{GEO}}]$$

был найден вектор положения реперной точки станции 1824, образованный из GPS-решения и геодезических измерений:

$$(\mathbf{R}_{1824}^{\text{ITRF}})_{\text{GPS}} = \{3512989.738, 2068968.942, 4888817.813\}.$$

Сравнение приведенных к ITRF97 векторов положения реперной точки дальномера «Голосиив-Киев» $(\mathbf{R}_{1824}^{\text{ITRF}})_{\text{SLR}}$ и $(\mathbf{R}_{1824}^{\text{ITRF}})_{\text{GPS}}$ показало, что они не согласованы: модуль их разности $|\Delta \mathbf{R}_{\text{SLR,GPS}}|$ составляет 0.656 м. Причины этого различия пока остаются невыясненными.

Было высказано предположение, что они могут быть частично обусловлены погрешностью в калибровке, вносимой в наблюдения ИСЗ. Была

выявлена такая разность около 6 см была выявлена между значениями R_m , используемым для калибровки и вычисленным в работе [3] значения R_m . Различие полученных координат может также быть связано с ошибкой локальной геодезической привязки реперной точки дальномера и перманентного GPS-пункта.

В принципе разность $(R_{1824}^{ITRF})_{SLR}$ и $(R_{1824}^{ITRF})_{GPS}$ может быть вызвана несоответствием ориентаций систем координат, полученных с помощью GPS- и SLR-техники. Эта причина требует дополнительного изучения.

Анализ наблюдений. Уточненные координаты реперной точки ЛСД «Голосиив-Киев» $(R_{1824}^{ITRF})_{SLR}$ использовались при проведении лазерной локации ИСЗ LAGEOS-1 и LAGEOS-2 с 29 июня 2001 г. по 28 июля 2001 г. Результаты внутренней обработки полученных наблюдений не показали существенного уменьшения range bias и time bias. Это связано с: незначительным различием использовавшихся ранее и уточненных координат станции (порядка 0.04 м); большой погрешностью, вносимой в time bias нестабильностью службы времени ($\pm 80 \cdot 10^{-6}$ с).

Величина range bias может быть обусловлена несколькими факторами: калибровочной постоянной (порядка 20 м); вносимой атмосферой погрешностью; неучтенной ошибкой координат станции.

Улучшение наведения телескопа на ИСЗ также не было замечено ввиду незначительной разности (порядка 0.01") между использовавшимися ранее и новыми значениями широты φ и долготы λ станции 1824.

Работа выполнена при частичной поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Министерства образования и науки Украины. Авторы благодарны С. Болотину и О. Ходу за консультации.

1. Грудинская Г. П. Распространение радиоволн. — М., 1967.—66 с.
2. Миронов Н. Т., Самоilenко А. Н., Яксь В. М., Яцкив Я. С. Геоцентрические координаты и относительные положения двух лазерных дальномеров ГАО АН УССР и специальных геодезических знаков (маркеров) // Кинематика и физика небес. тел.—1988.—4, № 6.—С. 88—90.
3. Самоilenко О. М. Локальна геодезична прив'язка до GPS-маркерів станції лазерної локації (СПЛ-2) ГАО НАН України: Звіт про науково-дослідницьку роботу. — Київ, 1998.—56 с.
4. Суберляк В. Р., Медведський М. М., Перетятко М. М., Яцкив Д. Я. Модель похибок телескопа типу СПЛ (КРИМ) для лазерної локації ІСЗ // Кинематика и физика небес. тел. Приложение.—1999.—№ 1.—С. 118—120.
5. Boucher C., Altamimi Z., Sillard P. IERS Technical Note 27. The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF97).—1999.—P. 91.
6. McCarthy D. D. IERS Conventions (1996).—1996.—95 p.
7. Rudenko S. Earth rotation parameters and terrestrial reference derived from LAGEOS-1 and LAGEOS-2 1983—1995 SLR data analysis // Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики, Россия, С.-Петербург, сентябрь, 23—25, 1996. — С.-Петербург, 1996.—С. 259—265.
8. Rudenko S. Terrestrial reference frame realization from the analysis of 15-year LAGEOS-1 & LAGEOS-2 SLR world network data // Proc. of the International Workshop on Geodetic Measurements by the Collocation of Space Techniques on Earth, Tokyo, Japan, January, 25—28, 1999. — Tokyo, 1999.—С. 201—207.
9. Schillak S., Butkiewicz E. Software of the BOROWIEC-2 SLR-system // Artif. Satell.—1996.—31, N 3.—P. 71—80.
10. Schutz B. E., Tapley B. D., Eanes R. J., Cuthbertson B. LAGEOS ephemeris predictions // Proc. of the 4th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Austin, Texas, pub. by Geodetic Institute, Univ. of Bonn, Oct. 12—16.—1981.—145 p.
11. Yatskiv D. Ya., Medvedskij M. M., Suberlyak V. R., Peretyatko M. M. Kyiv laser ranging station: report on the experimental operation 1997—1998. — Kyiv, 1998.—15 p.—(Preprint of the Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine; MAO-98-6E).

Поступила в редакцию 27.08.01