РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ АСТРОНОМИИ

На правах рукописи

ШУЙГИНА Надежда Витальевна

Использование VLBI и SLR наблюдений для определения ПВЗ, координат станций и взаимной ориентации систем отсчета

Специальность 01.03.01 — “Астрометрия и небесная механика”

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2004

Работа выполнена в Институте прикладной астрономии РАН.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Г. А. Красинский

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор В. С. Губанов
доктор физико-математических наук, профессор В. В. Витязев

Ведущая организация:

Главная астрономическая обсерватория РАН

Защита состоится "28" апреля 2004 г. в 10 час. на заседании диссертационного совета Д 002.067.01 в Институте прикладной астрономии РАН по адресу: 191187 С.-Петербург, наб. Кутузова, д. 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной астрономии РАН.

Автореферат разослан "27" марта 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук З. М. Малкин

Общая характеристика работы

Настоящая диссертация посвящена развитию методов обработки современных высокоточных радиоинтерферометрических (VLBI) наблюдений объектов ближнего и дальнего космоса и светолокационных (SLR) измерений искусственных спутников Земли (ИСЗ) с целью определения различных астрономических и геодинамических параметров. В работе рассмотрены три задачи, решение которых основано на VLBI и SLR измерениях. Одной из таких задач является фундаментальная проблема астрометрии об установлении взаимосвязи различных систем координат. В частности, рассмотрен вопрос об определении углов взаимной ориентации небесных систем координат, одна из которых построена геометрическим способом и основана на положениях внегалактических радиоисточников, полученных из VLBI наблюдений, а вторая опирается на теорию движения космического аппарата (КА), вычисленную динамическим методом. Следующая задача, решение которой основано на высокоточных SLR наблюдениях геодинамических ИСЗ — это задача о совместном уточнении земной системы отсчета и параметров вращения Земли (ПВЗ), входящих в описание ее взаимосвязи с небесной системой координат. Полученные из обработки ряды ПВЗ и координат станций были использованы в Международной службе лазерной локации (ILRS) для выработки оптимальной методики обработки лазерных наблюдений, а также для синтеза сводного решения, получаемого путем комбинации индивидуальных решений различных аналитических центров. Последняя, третья задача, рассмотренная в данной работе — задача об определении параметров вращения Земли на основе комбинирования SLR и VLBI техник на уровне наблюдений. Разработанная методика была применена для совместной обработки SLR измерений ИСЗ LAGEOS 1, LAGEOS 2, Эталон 1, Эталон 2 и VLBI наблюдений внегалактических радиоисточников.

Актуальность темы диссертации

В последние четыре десятилетия сформировался набор измерительных средств, позволяющих проводить позиционные наблюдения наивысшего на сегодняшний день уровня точности. К этим средствам обычно относят радиоинтерферометрические наблюдения со сверхдлинными базами, спутниковые и лунные (LLR) дальнометрические измерения, навигационную систему местоопределения (GPS), допплеровскую систему DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite). Определение параметров вращения Земли, уточнение координат станций и установление земной системы отсчета, определение поправок к параметрам модели геопотенциала составляют далеко не полный перечень задач, решаемых с помощью новых измерительных технологий.

В настоящее время возрастающие требования к точности определения параметров вращения Земли и геодинамических параметров, непрерывное совершенствование моделей геопотенциала, нутации, нагрузочных явлений приводят к необходимости проведения исследований, касающихся сравнительного анализа различных стратегий обработки наблюдений. Поскольку каждая из измерительных технологий имеет свои особенности и преимущества при определении различных параметров, то необходимо оптимальное сочетание всех средств наблюдений. Совершенно очевидно, что наиболее интересные результаты могут быть получены при совместной обработке разных типов наблюдений. Частным примером такого комбинированного подхода является возможность уточнения взаимной ориентации динамической и внегалактической систем отсчета из обработки даже небольшого массива траекторных и радиоинтерферометрических наблюдений космических аппаратов на фоне квазаров.

Одной из важнейших задач космической геодезии является определение параметров вращения Земли относительно инерциальной системы отсчета. В настоящее время основой для формирования сводного ряда ПВЗ являются частные ряды параметров вращения Земли, полученные из обработки какого-либо одного типа измерений — SLR, VLBI, GPS или DORIS. Ясно, что каждый отдельный ряд зависит от моделей, заложенных в программном обеспечении, и априорной информации, использовавшейся при его выводе, а также от методов статистической обработки. Целью пилотных проектов Международной службы лазерной локации, проводимых в настоящее время среди центров по анализу SLR информации, в которых наше решение представляло Центр анализа лазерных данных ИПА РАН, является унификация моделей, использующихся в лазерной дальнометрии, а также практическое применение выработанной методики к образованию сводного ряда ПВЗ для Международной Службы Вращения Земли и Систем Отсчета (IERS).

Качественно другим подходом к получению сводного ряда ПВЗ является метод комбинирования измерений на наблюдательном уровне, который позволяет избежать дополнительных ошибок, обусловленных различием моделей, описывающих физические процессы, и добиться взаимной согласованности этих моделей. Кроме того, не менее важным направлением является применение методов стохастического моделирования для описания высокочастотных составляющих параметров моделей. Именно этим вопросам и посвящается данная диссертация.

Цели работы

- Разработка единой методики, позволяющей решать задачи астрономии и геодинамики на основе совместной обработки и коллокации различных наблюдательных средств.
- Применение разработанной методики к задачам определения взаимной ориентации различных систем координат, уточнения параметров вращения Земли и земной системы отсчета.

Научная новизна работы

- Разработана методика совместной обработки лазерных измерений дальности до геодинамических спутников LAGEOS 1 и LAGEOS 2, Эталон 1 и Эталон 2 с целью одновременного уточнения земной системы координат и определения параметров вращения Земли.
- Разработанная методика успешно применена к обработке рядов наблюдений спутников LAGEOS 1 и LAGEOS 2, Эталон 1 и Эталон 2 в рамках пилотных проектов Международной службы лазерной локации.
- Проведена обработка дифференциальных VLBI наблюдений космического аппарата ФОБОС-2 и находящихся на близких угловых расстояниях квазаров, и определены углы взаимной ориентации динамической и внегалактической систем отсчета.
- Разработана методика совместной обработки светолокационных наблюдений геодинамических спутников и радиоинтерферометрических наблюдений внегалактических радиоисточников на сверхдлинных базах.
- С помощью разработанной методики проанализированы SLR наблюдения спутников LAGEOS 1, LAGEOS 2, Эталон 1, Эталон 2 и VLBI наблюдения квазаров и определены параметры вращения Земли и координаты небесного полюса с высоким временным разрешением.

Научная и практическая значимость работы

- Полученные в данной работе ПВЗ и координаты станций используюся в настоящее время в пилотных проектах Международной службы лазерной локации для выработки оптимальной методики обработки лазерных наблюдений, а также для синтеза сводного решения — официального продукта ILRS, поставляемого в Международную службу вращения Земли.

- Разработанная методика совместной обработки светолокационных измерений геодинамических ИСЗ и VLBI наблюдений внегалактических радиоисточников может быть использована в практической работе регулярной службы ПВЗ, функционирующей в настоящее время в ИПА РАН.
- Методика обработки дифференциальных наблюдений космических аппаратов и находящихся на близких от них угловых расстояниях квазаров может быть использована для взаимной привязки квазиинерциальной системы координат ICRF, основанной на VLBI положениях внегалактических радиоисточников, и динамической системы отсчета, опирающейся на теории движения больших планет и Луны — эфемериды серии DE (JPL) или EPM (ИПА РАН).

Результаты, выносимые на защиту

- Методика анализа SLR наблюдений геодинамических ИСЗ, позволяющая одновременно уточнять земную систему координат и определять параметры вращения Земли в целях последующего участия в регулярной службе ПВЗ ILRS.
- Методика и результаты определения параметров вращения Земли с высоким временным разрешением из анализа комбинированных рядов светолокацонных измерений ИСЗ LAGEOS 1, LAGEOS 2, Эталон 1, Эталон 2 и VLBI наблюдений внегалактических радиоисточников.
- Определение углов взаимной ориентации динамической и внегалактической систем отсчета с помощью дифференциальных VLBI наблюдений космического аппарата ФОБОС-2 и находящихся на близких угловых расстояниях квазаров.

Апробация работы

Основные результаты, полученные в диссертации, представлялись на семинарах и заседаниях ученого совета ИПА РАН, а также докладывались на следующих отечественных и зарубежных научных конференциях: “Динамика механических систем”, Томск, СССР, 1989г.; “III International School on Space Research”, Suzdal, USSR, 1991; “Эфемеридная астрономия и позиционные наблюдения”, С.-Петербург, Россия, 1991; “Joint European Conference on Radioastronomy”, Cambridge, UK, 1994; “Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики”, С.-Петербург, Россия, 1996; Journees 1999 “Systemes de reference spatio-temporels and IX Lohrmann-Kolloquium”, Dresden, Germany, 1999; “Joint European and National Astronomical Meeting (JENAM-2000)”, Moscow, Russia, 2000; “Всероссийская астрономическая конференция”, С.-Петербург, Россия, 2001; “Celestial mechanics: results and prospects”, St. Petersburg, Russia, 2002; ILRS/AWG Workshop N8, Nice, France, 2003; Journees-2003: “Astrometry, geodynamics and solar system dynamics: from milliarcseconds to microarcseconds”, St. Petersburg, Russia, 2003.

Публикации и вклад автора

Основные результаты диссертации опубликованы в 14 работах общим объемом 68 страниц, 5 работ написаны совместно с другими авторами. В совместной работе [5] автору принадлежит построение базы данных SLR наблюдений ИСЗ LAGEOS 1 и LAGEOS 2, разработка и внедрение в используемое программное обеспечение подпрограмм для учета релятивистских поправок в уравнениях движения ИСЗ, обработка наблюдательного материала, вывод параметров вращения Земли и координат станций. В годовые отчеты Международной службы лазерной локации [7] и [10] включены отчеты о работе автора в составе Центра анализа лазерных данных ИПА РАН, в которые вошли результаты уточнения параметров вращения Земли и координат станций, посылавшиеся автором в течение подотчетного периода в ILRS для сравнения и комбинации отдельных решений и формирования сводного решения. В совместных работах [12] и [14] автору принадлежит вывод алгоритма перевзвешивания SLR наблюдений различных ИСЗ и разработка программного обеспечения для определения геодинамических параметров из обработки SLR наблюдений двух и более искусственных спутников Земли.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации 113 страниц. Диссертация содержит 16 таблиц, 10 рисунков и список литературы из 124 наименований.

Содержание диссертации

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, указаны научная новизна, научная и практическая значимость результатов работы, перечислены результаты, выносимые на защиту, приведены структура и содержание диссертации, указаны печатные работы, в которых отражены основные результаты и определена доля участия автора в совместных публикациях.

В **первой главе** содержится краткий обзор развития методов SLR и VLBI наблюдений; перечислены геодинамические, геодезические и эфемеридные параметры, которые могут быть уточнены из обработки как SLR, так и VLBI измерений; сформулирована задача совместной обработки SLR и VLBI наблюдений для уточнения параметров ориентации Земли, определены перспективы дальнейшего развития метода комбинирования различных типов измерений.

Вторая глава посвящена детальному описанию математических моделей редукции как SLR, так и VLBI измерений, которые реализованы в универсальном программном комплексе ЭРА, использовавшемся в данной работе для обработки различных типов измерений. В данной главе подробно рассмотрены вопросы, связанные с распространением оптических и радиосигналов (в вакууме и в атмосфере) от наблюдаемого объекта до станции, расположенной на поверхности Земли. Приведены формулы для вычисления вектора положения станции и его преобразования от системы координат, жестко связанной с Землей, к квазиинерциальной небесной системе отсчета.

В **третьей главе** приведены основные уравнения, использующиеся для построения динамических теорий движения искусственных спутников Земли и вычисления изохронных производных по параметрам модели SLR наблюдений. Особое внимание при описании возмущений, учитывающихся в правых частях уравнений движения ИСЗ, уделено эффекту прямого давления солнечных лучей. Формула, обычно использующаяся для вычисления светового давления, справедлива при условии равномерного распределения интенсивности излучения по диску Солнца. Однако в более общем случае в функции тени ψ_{sh} необходимо учитывать “потемнение к краю диска” — явление падения интенсивности излучения к краю диска

Солнца, которое описывается интегральной функцией. В "сферическом" приближении, в рамках которого наблюдаемое со спутника солнечное затмение рассматривается в виде пересечения двух кругов (видимых дисков Солнца и Луны), выражение для функции тени удалось проинтегрировать в квадратурах:

$$\psi_{sh} = 1 - 0.180\phi_R - 0.110a_r h + 0.107\Big(3a_r - (1 - a_r h)(a_r + h + 2)\Big),$$
$$h = \frac{1}{2dR_\odot}\sqrt{2d^2(R_e^2 + R_\odot^2) - (R_e^2 - R_\odot^2)^2 - d^4},$$
$$a_r = \frac{1}{R_\odot}\left(\frac{d}{2} - \frac{R_e^2 - R_\odot^2}{2d}\right),$$
$$\phi_R = arctg\frac{h}{a_r},$$

где $R_\odot$ — видимый со спутника радиус Солнца, R_e — видимый радиус Земли, d — взаимное расстояние между центрами Земли и Солнца.

Полученное выражение позволяет учитывать эффект "потемнения к краю диска" по строгим формулам и не требует дополнительного численного интегрирования.

В **четвертой главе** приведены результаты применения описанных в главах 2 и 3 моделей для решения нескольких астрономических задач. **Одной из таких задач**, решение которой опирается на высокоточные дифференциальные VLBI наблюдения космических аппаратов и находящихся на близких от них угловых расстояниях внегалактических радиоисточников, является фундаментальная проблема астрометрии об определении взаимной ориентации различных систем отсчета. Построение высокоточной астрономической системы отсчета для количественного описания положений и движений небесных тел в пространстве традиционно рассматривается как основная задача фундаментальной астрометрии. В настоящее время квазиинерциальная система небесных координат определяется двумя основными способами: кинематически (на основе положений звезд или внегалактических радиоисточников) и динамически (на основе геоцентрических или гелиоцентрических положений естественных или искусственных небесных тел).

Очевидно, что с помощью отмеченных подходов можно построить целый ряд реализаций квазиинерциальной системы отсчета. Поэтому по-прежнему актуальной остается задача определения взаимосвязи различных систем отсчета. Для уточнения углов ориентации квазарной и гелиоцентрической динамической систем координат можно использовать как VLBA наблюдения астероидов, так и дифференциальные VLBI наблюдения КА и находящихся на близких от них угловых расстояниях внегалактических радиоисточников. В данной работе определение взаимосвязи динамической и квазарной систем отсчета было выполнено на основе дифференциальных VLBI измерений КА ФОБОС-2, полученных в ходе выполнения космического эксперимента "ФОБОС". Сведения о количественном составе и априорной точности указанного наблюдательного материала приведены в таблице 1.

Таблица 1: Состав и точность наблюдений.

Тип наблюдений	Количество наблюдений	Априорная точность	σ_{O-C}
Дифференциальные VLBI наблюдения	13 (относительно 4 квазаров)	0.1 – 0.4 нс	4.54 нс
Дальности	86	10 м	24.6 м
Допплеровский сдвиг частоты	83	2 мм/сек	1.83 мм/сек

Построение орбиты КА ФОБОС-2 выполнялось путем численного интегрирования дифференциальных уравнений гелиоцентрического движения КА с учетом давления солнечных лучей, возмущений от всех больших планет и релятивистских Шварцшильдовских членов. Координаты планет вычислялись с помощью эфемериды DE200/LE200, следовательно, рассматриваемая нами динамическая система задается средним экватором и равноденствием указанной эфемериды. Были получены следующие значения углов ориентации: $\alpha_1 = 0''.103 \pm 0''.074$, $\alpha_2 = 0''.025 \pm 0''.024$, $\alpha_3 = 0''.003 \pm 0''.011$, причем коэффициенты корреляции между этими величинами оказались равными $r_{\alpha_1\alpha_2} = 0.66$, $r_{\alpha_2\alpha_3} = 0.14$, $r_{\alpha_1\alpha_3} = 0.64$.

Таким образом, было показано, что использование даже небольшого массива современных радиотехнических наблюдений космического зонда Фобос-2 на фоне квазаров дает возможность определить углы взаимной ориентации динамической и внегалактической систем координат с точностью не хуже сотых долей угловой секунды. Привлечение новых дифференциальных радиоинтерферометрических наблюдений даст возможность получить в будущем более надежные результаты при определении параметров взаимной ориентации различных систем отсчета.

Следующая задача, решение которой основано на высокоточных SLR наблюдениях геодинамических ИСЗ — задача об одновременном уточнении земной системы отсчета и параметров вращения Земли, входящих в описание взаимосвязи земной и небесной систем координат.

В последние годы активное развитие новых технологий, таких как GPS, DORIS, привело к резкому увеличению числа индивидуальных решений как для рядов ПВЗ, так и для координат станций. Комбинирование независимых решений принято производить в рамках каждой отдельно взятой техники наблюдений. Единые стратегии объединения различных решений уже внедрены в Международные службы GPS и VLBI наблюдений. Поэтому перед Международной службой лазерной локации встала задача получения собственного сводного решения. С этой целью в ILRS было решено провести серию пилотных проектов среди научно-исследовательских центров по анализу светолокационной информации. Основной задачей этих проектов является выработка оптимальной методики обработки лазерных наблюдений для вывода рядов параметров вращения Земли и координат станций, а также для синтеза сводного решения, получаемого путем комбинации индивидуальных решений различных аналитических центров. Поэтому каждая кампания проводилась в два этапа, а участники PILOT-проектов были соответственно разбиты на две группы: центры обработки наблюдательных данных и центры, осуществляющие комбинацию отдельных решений и формирование сводного решения. Одним из участников кампаний являлся Центр анализа лазерных данных ИПА РАН, где нами проводился как анализ SLR наблюдений, так и сравнение с решениями других исследовательских групп.

ILRS использовала единую стратегию проведения всех пилотных кампаний. Стартовой точкой каждой кампании служило приглашение с определением целей, задач и сроков выполнения, которое распространялось по электронной почте во все научные центры, обрабатывающие светолокационную информацию. С этого момента в базе данных CDDIS NASA (США) становились доступны наблюдательные данные, предназначенные для данного проекта. Ими являлись лазерные дальности до спутников LAGEOS и Эталон, полученные на заданном интервале времени. На основе этого наблюдательного материала требовалось уточнить различные наборы параметров — координаты станций, ПВЗ с различным разрешением (от 1 до 3 дней) или их комбинацию. Полученные решения, представленные в специальном виде — в виде файлов формата SINEX (Solution INdependent EXchange format) — собирались снова в базе данных CDDIS, и этот набор решений являлся результатом первого этапа каждого пилотного проекта. После этого начинался второй, заключительный этап кампаний — этап сравнения и комбинации представленных решений и вывода сводных рядов координат станций и ПВЗ.

Рассмотрим более подробно научные задачи и результаты проводимых кампаний на примере третьего пилотного проекта. В данном проекте участвовали 8 аналитических центров по обработке лазерных наблюдений из различных стран мира: "ASI" — Центр геодезии, Италия; "AUSLIG" — Группа по исследованию Земли, Австралия; "CRL" — Лаборатория исследования коммуникации, Япония; "JCET" — Центр технологий земных систем, США; "DGFI" — Институт геодезии, Германия; "GRGS" — Группа геодезических исследований, Франция; "NERC" — Факультет космической геодезии, Великобритания. Наше решение "IAAK" представляло единственный участвовавший в пилотных кампаниях российский центр по анализу лазерных данных (ИПА РАН).

Наблюдательным материалом в данном проекте служили лазерные дальности до спутников LAGEOS 1 и LAGEOS 2, собранные на интервале в 28 дней (05.09.99 – 02.10.99). С помощью этих измерительных данных уточнялся следующий набор параметров: координаты и скорости каждого спутника на дуге в 7 дней (всего 42 параметра), коэффициенты светового давления и эмпирического ускорения (по одному параметру для 7 дней), прямоугольные координаты станций (за исключением пунктов, имеющих малое количество наблюдений), ПВЗ (X_p и Y_p координаты полюса, а также поправки UT1-UTC) с разрешением в 1 день. Были получены следующие формальные оценки точности определения ПВЗ: 0.10 mas — для X_p, 0.08 mas — для Y_p и 0.021 мс — для разности UT1-UTC. Средние квадратические отклонения, полученные с учетом весов, обратно пропорциональных дисперсиям, оказались равными 0.46 mas для X_p координаты и 0.27 mas — для Y_p координаты полюса.

Комбинирование всех решений, представленных в третьем пилотном проекте, проводилось в нескольких центрах. Одной их характеристик качества земной системы координат может служить сопоставление длин базовых линий. На рисунке 1 представлены средние вариации длин баз, полученные V. Husson (США) из сравнения решений различных центров анализа. Видно, что решение "IAAK" хорошо согласуется с результатами других аналитических групп — участников данного пилотного проекта.

Полученные из обработки ряды параметров вращения Земли и координат станций были использованы в ILRS для выработки оптимальной методики обработки лазерных наблюдений, а также для синтеза сводного решения, получаемого путем комбинации индивидуальных решений различных аналитических центров. Оценки точности данного решения, выведенные независимыми аналитическими центрами ILRS, показывают,

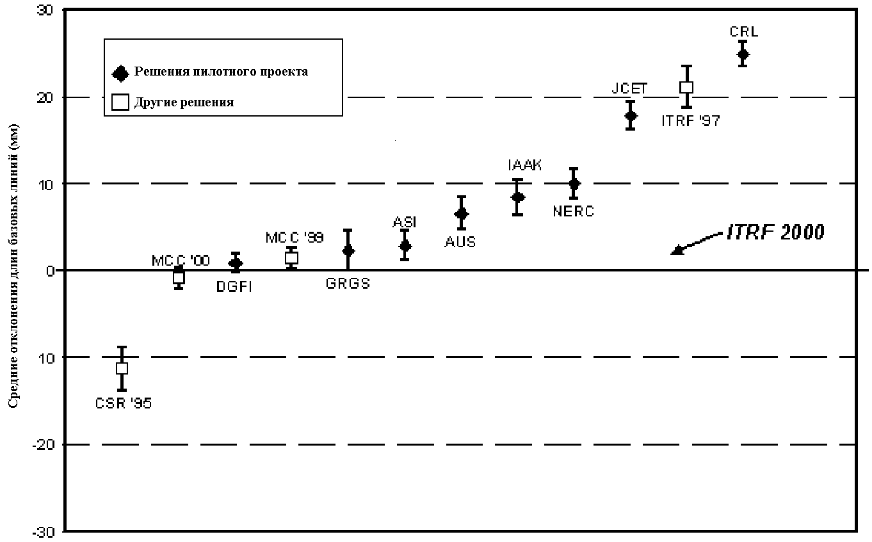

Рис. 1: Средние вариации длин баз (мм) для различных решений по оценкам V. Husson (США).

что использованная нами модель позволяет определять параметры вращения Земли и земную систему координат с точностью, соответствующей современным требованиям IERS.

Рассмотренная серия PILOT-проектов еще не завершена, в настоящее время ведется активная работа в рамках седьмой международной кампании. Результатом всех проводимых пилотных проектов будет выработка комбинированного сводного решения как официального продукта ILRS, а впоследствии — участие в регулярной службе ILRS по определению координат наземных пунктов и параметров вращения Земли в режиме, близком к режиму реального времени.

И последняя, третья задача, рассмотренная в данной работе — это задача об определении параметров вращения Земли на основе комбинирования SLR и VLBI техник на уровне наблюдений. В данной работе была разработана методика совместной обработки SLR измерений геодинамических ИСЗ типа LAGEOS и Эталон и VLBI наблюдений внегалактических радиоисточников для определения параметров вращения Земли. Эта методика была апробирована на наблюдательном материале 1999 г. По данным лазерной локации ИСЗ LAGEOS 1, LAGEOS 2, Эталон 1, Эталон 2 и VLBI наблюдениям квазаров, полученным по программе NEOS-A на интервале 10.10.99 – 06.11.99, было выполнено решение комплекса задач по определению параметров, которые являются локальными для каждой наблюдательной техники в отдельности — начальные координаты и скорости спутника, коэффициенты светового давления и негравитационного ускорения (для SLR техники), поправки часов и тропосферы (для серий VLBI наблюдений), а также общих параметров, т.е. таких параметров, которые можно уточнить как с помощью SLR, так и VLBI измерений. К параметрам такого типа относятся параметры вращения Земли.

Таблица 2: Поправки к ПВЗ и их формальные ошибки, полученные по различным рядам наблюдений.

ПВЗ	VLBI	VLBI+ L1+L2	VLBI+ L1+L2+E1+E2	SLR
X_p (mas)	-0.326 86	-0.001 44	0.023 43	0.099 86
Y_p (mas)	0.034 84	0.204 31	0.208 30	0.202 82
UT1-UTC (ms)	0.026 5	0.017 4	0.015 4	
$d\psi$ (mas)	-0.260 143	-0.190 133	-0.182 130	
$d\varepsilon$ (mas)	0.240 72	0.187 67	0.227 65	

В целях подробного исследования разработанной методики был выполнен сравнительный анализ результатов определения ПВЗ из рядов только SLR измерений, только VLBI наблюдений, и наконец, из комбинированного ряда SLR и VLBI данных. При этом было отдельно исследовано влияние добавления к комбинированному ряду не только измерений геодинамических ИСЗ LAGEOS 1 и LAGEOS 2 (L1 и L2 в таблице 2), но и Эталон 1 и Эталон 2 (E1 и E2). В таблице 2 приведены поправки к параметрам вращения Земли и их средние квадратические ошибки, определенные стандартным методом наименьших квадратов из SLR, VLBI и комбинированных наблюдений. Видно, что привлечение VLBI измерений существенно уменьшает формальные ошибки определения X_p и Y_p координат полюса. Что касается поправок к величинам, определяющим положение небесного эфемеридного полюса, которые фактически не могут быть уточнены по совокупности SLR измерений, то добавление VLBI данных к имеющемуся ряду SLR наблюдений позволяет определить поправки к нутационным углам с точностью, не превышающей точность их определения по VLBI данным.

Задача определения ПВЗ из совместной обработки SLR и VLBI наблюдений была решена двумя различными методами статистической обработки данных — стандартным методом наименьших квадратов без учета какой-либо априорной информации о параметрах модели, а также методом фильтрации Калмана, учитывающей знания о параметрах динамической системы. Использование метода калмановской фильтрации для обработки VLBI наблюдений позволило уменьшить среднее квадратическое отклонение остаточных невязок в 3 раза, что составило в среднем 13 пикосекунд и соответствует априорной точности используемого наблюдательного материала. Среднее квадратическое отклонение остаточных невязок при совместной обработке SLR и VLBI измерений получается несколько больше и составляет величину 22 пс, что также хорошо согласуется с априорными точностями всей совокупности наблюдений. В таблице 3 приведены средние квадратические и формальные точности рядов ПВЗ, полученных по всей совокупности отдельно SLR измерений, отдельно VLBI данных, а также их комбинации на интервале в 1 месяц по сравнению с опорным рядом EOP (IERS) C04.

Таблица 3: RMS и формальные точности рядов ПВЗ на интервале в 28 дней, полученные с помощью SLR и VLBI техник и их комбинации

ПВЗ	VLBI+SLR		VLBI		SLR	
	rms	formal	rms	formal	rms	formal
X_p (mas)	0.16	0.06	0.07	0.13	0.23	0.07
Y_p (mas)	0.20	0.05	0.16	0.13	0.27	0.06
UT1-UTC (ms)	0.013	0.007	0.011	0.007		
$d\psi$ (mas)	0.27	0.20	0.18	0.22		
$d\varepsilon$ (mas)	0.23	0.10	0.24	0.11		

Следует особо отметить, что применение методов стохастического оценивания параметров ко всей совокупности VLBI и SLR измерений позволяет определять ПВЗ с высоким временным разрешением на всем интервале наблюдений (рис. 2).

Таким образом, соединение SLR с VLBI наблюдениями позволяет ис-

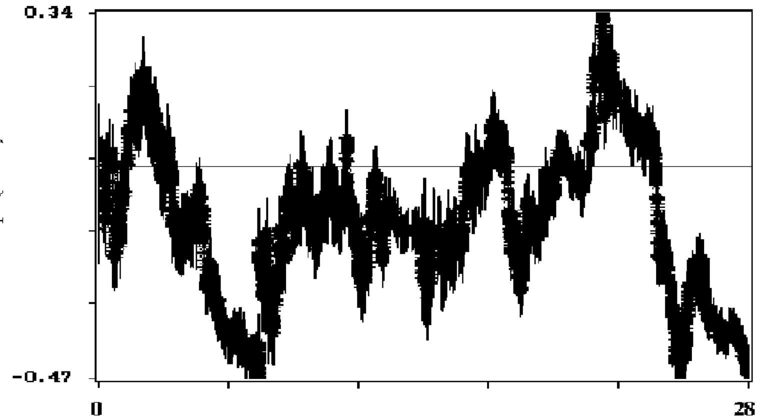

Рис. 2: Отклонения X_p от эталонного ряда EOP (IERS) C04, полученные методом калмановской фильтрации.

пользовать все преимущества последних для решения проблемы определения взаимной ориентации квазиинерциальных систем координат. Наложение достаточно редких рядов VLBI наблюдений (одна суточная серия измерений в неделю) на непрерывный и достаточно однородный ряд SLR измерений дает возможность пролонгировать такие параметры вращательного движения Земли, как координаты небесного полюса и уточнить все пять параметров параметров вращения Земли на всем интервале времени.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

[1] Кривова (Шуйгина), Н.В., 1990, Первые результаты обработки локационных и VLBI наблюдений космических зондов, в сб.: “Динамика механических систем”, Томск, изд. ТГУ, 137–142.

[2] Кривова (Шуйгина), Н.В., 1991, Применение радиоинтерферометрических и допплеровских наблюдений космических аппаратов для определения ориентации каталога квазаров, в сб.: “Эфемеридная астрономия и позиционные наблюдения”, С.-Петербург, ИТА РАН, 66–69.

[3] Кривова (Шуйгина), Н.В., 1992, Определение взаимной ориентации квазарной и динамической систем отсчета по наблюдениям космического аппарата ФОБОС-2, Препринт ИПА РАН N 43, С.-Петербург, 16 с.

[4] Shuygina, N.V., 1995, Determination of the relative orientation between radio and dynamical reference frames using VLBI observations of spacecraft, CUP, computer version, 1–5.

[5] Васильев, М.В., Шуйгина, Н.В., 1999, Опыт использования программного комплекса ЭРА для обработки светолокационных наблюдений ИСЗ LAGEOS, Труды ИПА РАН, вып. 4, 51–60.

[6] Shuygina, N.V., 2000, Determination of the Earth rotation parameters from the LAGEOS SLR and VLBI data, Proc. Journees 1999 and IX Lohrmann-Kolloquium, M.Soffel and N.Capitaine (eds.) “Motion of Celestial bodies, Astrometry and Reference Frames”, 214–216.

[7] Malkin, Z., Shuygina, N., 2000, International Laser Ranging Service, Annual Report 2000, NASA/TP-2001-209987, (7)–10.

[8] Shuygina, N.V., 2000, Determination of the Earth orientation parameters from LAGEOS SLR and VLBI data analysis, Book of abstracts of JENAM-2000, Moscow, Russia, 167.

[9] Шуйгина, Н.В., 2001, Определение геодинамических параметров из SLR наблюдений для пилотных проектов Международной службы лазерной локации, Труды ИПА РАН, вып. 6, 240–254.

[10] Krasinsky, G., Malkin, Z., Shuygina, N., Aleshkina, E., Ivanova, T., 2001, International Laser Ranging Service, Annual Report 2001, NASA/TP-2002-211610, (7)–23.

[11] Шуйгина, Н.В., 2001, Опыт использования программного комплекса ЭРА в пилотных проектах Международной службы лазерной локации, Всероссийская астрономическая конференция, Тезисы докладов, С.-Петербург, 200.

[12] Ivanova, T.V., Shuygina, N.V., 2002, Analysis of SLR observations of the Etalon geodetic satellite, In: "Celestial mechanics: results and prospects", Труды ИПА РАН, N 8, 90–91.

[13] Shuygina, N.V., 2003, Determination of EOP from combination of SLR and VLBI data at the observational level, Journees 2003 "Astrometry, geodynamics and solar system dynamics: from milliarcseconds to microarcseconds" (Book of abstracts), 63.

[14] Ivanova, T.V., Shuygina, N.V., 2003, Variations of the second order harmonics of geopotential from the analysis of the Etalon SLR data for 1992–2001, Proc. Journees 2003 "Astrometry, geodynamics and solar system dynamics: from milliarcseconds to microarcseconds" (Book of abstracts), 33.

Подписано к печати 24.03.2004. Формат 60 × 90/16. Офсетная печать.
Печ. л. 1.0. Уч.-изд. л. 1.0. Тираж 100 Заказ бесплатно

Отпечатано в ООО "Типография N 3"
(Санкт-Петербург, Литейный пр., 55).

ИПА РАН, 191187 С.-Петербург, наб. Кутузова, д. 10