РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ АСТРОНОМИИ

На правах рукописи

СУРКИС Игорь Феликсович

Создание многофункционального программного пакета для анализа астрометрических и геодинамических РСДБ-наблюдений

Специальность 01.03.01
Астрометрия и небесная механика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2002

Работа выполнена в Институте прикладной астрономии РАН.

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор	Г.А.Красинский
доктор физико-математических наук	В.Е.Жаров

Ведущая организация:

Астрономический институт им В.В.Соболева СПбГУ

Защита состоится 1 июля 2002 г. в 13 час. 30 мин. 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 "____" мая 2002 г.

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

Общая характеристика работы

Настоящая работа отражает результаты исследований по созданию нового отечественного программного комплекса вторичной обработки данных наблюдений методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) на глобальных и региональных сетях станций.

РСДБ-наблюдения являются одним из основных источников наиболее точных данных для решения основных задач фундаментального координатно-временного обеспечения науки и практической деятельности людей. С их помощью создаются наиболее точные и устойчивые системы небесных координат, определяются координаты наземных станций и их тектонические движения, решаются многие другие задачи астрометрии и геодинамики. В отличие от методов космической геодезии (GPS, LSR, LLR и др.) в РСДБ наблюдаются удаленные внегалактические радиоисточники (в дальнейшем — источники), практически неподвижные в проекции на небесную сферу, что обеспечивает долговременную устойчивость опирающейся на них небесной системы координат.

Основной принцип РСДБ состоит в одновременном наблюдении источника минимум двумя радиотелескопами (в дальнейшем — станциями), находящимися на значительном удалении друг от друга — порядка тысяч километров. Принятые на каждой станции сигналы записываются на специальные магнитные носители вместе с метками времени местного атомного стандарта частоты (водородного мазера), свозятся в центр **первичной обработки**, где с помощью специального процессора (коррелятора) вычисляются разность моментов прихода сигнала на эти станции (временная задержка) и скорость ее изменения (частота интерференции). Одновременно оценивается и точность этих величин. Так же фиксируются значения метеоданных на обеих станциях и ряд других параметров.

Дальнейший анализ всех этих данных называется **вторичной обработкой**. Его можно условно разделить на три части. В процессе **редукций** для каждого наблюдения вычисляются теоретические значения задержек и частот интерференции, образуются их разности вида (observations – calculations) = (O-C) и вычисляются частные производные этих величин по параметрам, значения которых известны недостаточно точно. В процессе **моделирования** создается линейная система уравнений, которая связывает определяемые параметры с результатами наблюдений и редукций — разностями (O-C). В процессе **оценивания** с помощью математического алгоритма осуществляется решение этой системы уравнений и определяются все неизвестные параметры модели.

Настоящая работа посвящена созданию программного пакета QUASAR, предназначенного для решения всех указанных выше задач вторичной обработки РСДБ-наблюдений на глобальных сетях станций.

Актуальность темы диссертации

Непрерывный рост количества и точности РСДБ наблюдений, а также усложнение научных задач, решаемых с их помощью, требуют постоянного совершенствования программных средств вторичной обработки этих данных. В мире существует несколько программных пакетов, используемых для этой цели, — CALC/SOLVE, Occam, MODEST, SteelBreeze, ЭРА и др., однако на уровне точности порядка 0.1 mas все они дают заметно различающиеся результаты при обработке одних и тех же наблюдений. Одна из причин этих расхождений заключается в недостаточной согласованности редукционных алгоритмов и априорных данных, а другая проистекает из применения различных методов моделирования и анализа наблюдений.

Большинство существующих пакетов имеет недостаточную гибкость настроек систем оценивания. Алгоритмы оценивания обычно настроены на конкретную задачу и стандартный набор параметров. Изменение задачи и набора параметров требует порой трудоемкой переделки всей системы оценивания. Такие пакеты трудно использовать в научных исследованиях.

В связи с этим весьма **актуальной** является задача создания такой системы вторичной обработки данных, которая была бы основана на общей платформе — наиболее точной и управляемой системе редукций, соответствующей последним рекомендациям IERS и новейшим данным, — и допускала бы использование принципиально разных моделей наблюдений (параметрических, стохастических и динамических), имела бы гибкую и удобную систему для управления базой данных, составления заданий, выбора оцениваемых параметров и стохастических сигналов, удобного представления окончательных результатов. К необходимым свойствам нового пакета следует также добавить надежность, простоту использования и способность к массовой обработке наблюдений. Для реализации всех этих задач и был создан многофункциональный программный пакет QUASAR (QUantitative Analysis and Series Adjustment in Radioastrometry).

Цель работы

Основная цель работы состояла в том, чтобы создать программный пакет, в котором на общей основе высокоточных редукционных вычислений можно было бы последовательно внедрять различные методы оценивания с использованием параметрического, стохастического и динамического моделирования. Такой подход позволяет рассчитывать на получение более разнообразной и объективной информации о достоинствах и недостатках этих методов, помогает выработать рекомендации по их применению в зависимости от научных задач, решаемых с помощью РСДБ-наблюдений. Кроме того, создаваемый пакет должен быть удобным для массового применения, гибким и легко настраиваемым инструментом для использования в фундаментальных научных исследованиях, в службах вращения Земли и в других прикладных задачах координатно-временного обеспечения страны.

Научная новизна работы

Все основные результаты, полученные лично автором или при его непосредственном участии, являются новыми.

Создан многофункциональный программный пакет QUASAR, позволяющий на единой редукционной основе анализировать данные РСДБ-наблюдений с помощью параметрических, стохастических и динамических моделей. Это дало возможность в одном пакете оценивать как постоянные параметры линейных моделей данных наблюдений, так и их неустойчивые (стохастические) компоненты несколькими альтернативными методами: многопараметрическим МНК, многогрупповым МНК, фильтрацией Калмана, средней квадратической коллокацией (СКК) и др.

Создана многофункциональная система управления пакетом, позволяющая: формировать собственную базу данных, дополнять ее новыми оригинальными данными РСДБ-наблюдений из файлов форматов Mark-III DBH или NGS; устранять скачки шкал времени и отбраковывать грубые наблюдения с помощью специальной программной системы графической коррекции; настраивать программу редукционных вычислений — выбирать опорные системы координат и параметров ориентации Земли, использовать различные теории астрономической нутации, алгоритмы учета тропосферной задержки и многое другое; формировать задание на обработку выбранной программы наблюдений, указывать характер оцениваемых параметров (постоянные, имеющие полиномиальный тренд или стохастические), выбирать стратегию обработки длительных рядов наблюдений (последовательная или совместная обработка), уточнять в итерационном процессе априорные ковариации стохастических сигналов, осуществлять перевзвешивание наблюдений с оценкой их реальной точности, производить регуляризацию случайных параметров с использованием достоверной априорной информации об их точности; создавать базу выходных данных, включая результаты, представляемые в международные организации IERS, IVS и IGN в соответствующих форматах.

Методом средней квадратической коллокации обработан 9-летний ряд наблюдений по программе NEOS-A за 1993-2001 гг. в последовательном и многосерийном режимах, в двух приближениях — с предварительными и уточненными дисперсиями априорных ковариаций внутрисуточных стохастических сигналов, а также с использованием стохастической регуляризации случайных параметров. При этом получены следующие оценки: поправки координат 323 радиоисточников в системе ICRF-Ext.1; поправки координат 19 наземных РСДБ-станций в системе ITRF2000; поправки тектоничских скоростей 11 станций в системе ITRF2000; коэффициенты локальной реакции земной коры на переменную атмосферную нагрузку всех станций; значения влажной составляющей тропосферной задержки в зените и ее суточного тренда для всех станций; коэффициенты горизонтального градиента влажной составляющей тропосферной задержки в зените для всех станций; поправки пяти параметров ориентации Земли (нутация в долготе, нутация в наклонности, всемирное время, обе координаты полюса) и их первых производных для 471-й серии наблюдений; поправки постоянной прецессии, приливных чисел Лява и Шида 2-го порядка, параметра PPN приближения общей теории относительности, а также стохастические сигналы, отражающие внутрисуточные вариации всемирного времени, тропосферной задержки в зените и шкал времени всех станций на каждый момент наблюдений.

Практическая значимость работы

Программный пакет QUASAR готов для научных исследований на основе РСДБ-наблюдений и участия в службах вращения Земли. Он может также использоваться как штатное средство и для обработки наблюдений на станциях отечественного РСДБ-комплекса "Квазар-КВО".

На защиту выносятся

1. Создание многофункционального программного пакета "QUASAR" для обработки РСДБ-наблюдений на глобальных и региональных сетях станций, включающего в себя систему многосерийного уравнивания данных наблюдений различными методами на основе параметрического, стохастического и динамического моделирования, полную реализацию метода многосерийной коллокации с применением итерационного процесса уточнения автоковариаций внутрисуточных сигналов и стохастической регуляризации случайных параметров.
2. Результаты обработки 9-летнего ряда наблюдений по программе NEOS-A методом средней квадратической коллокации, а именно: поправки координат радиоисточников, координат и скоростей станций, параметров ориентации Земли, коэффициентов атмосферной нагрузки и антенного выноса, чисел Лява и Шида второго порядка и др., а также внутрисуточные стохастические вариации всемирного времени, влажной компоненты тропосферной задержки в зените и шкал времени всех станций.

Апробация работы

Результаты работы докладывались автором на семинарах и Ученом совете Института прикладной астрономии РАН, Всероссийской конференции "Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики", Санкт-Петербург, 1996 г., Международном симпозиуме "Journees '99 & IX. Lohrmann-Kolloquium", Dresden, 1999, Всероссийской конференции "Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века", Санкт-Петербург, 2000 г., Всероссийской Астрономической конференции, Санкт-Петербург, 2001 г., Международной конференции "Изучение геодинамических процессов методами астрометрии, геодезии и геофизики", Украина, Полтава, 2001 г.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих статьях и тезисах докладов:

1. Вытнов А.В., Губанов В.С., Суркис И.Ф., Титов О.А. Внутрисуточные флуктуации фазы водородных мазеров Ч1-80. Сообщения ИПА РАН № 102, 1997 г.

2. Губанов В.С., Суркис И.Ф., Титов О.А. Внутрисуточные флуктуации тропосферной задержки по данным РСДБ-наблюдений. Сообщения ИПА РАН № 103, 1997 г.
3. Суркис И.Ф. Структура файлов 'MARK-3 DBH' и системы их декодировки. Сообщения ИПА РАН № 104, 1997 г.
4. В.С. Губанов, И.Ф. Суркис. Обработка РСДБ-наблюдений: программный пакет QUASAR. I. Редукция данных наблюдений. Сообщения ИПА РАН № 141, 2002 г.
5. В.С. Губанов, И.А. Козлова, И.Ф. Суркис. Обработка РСДБ-наблюдений: программный пакет QUASAR. II. Методы анализа данных. Сообщения ИПА РАН № 142, 2002 г.
6. И.Ф.Суркис. Обработка РСДБ-наблюдений: программный пакет QUASAR. III. Структура и схема функционирования. Сообщения ИПА РАН № 143, 2002 г.
7. И.Ф.Суркис. Обработка РСДБ-наблюдений: программный пакет QUASAR. IV. Инструкция по эксплуатации. Сообщения ИПА РАН № 144, 2002 г.
8. В.С. Губанов, И.Ф. Суркис, И.А. Козлова, Ю.Л. Русинов. Обработка РСДБ-наблюдений: программный пакет QUASAR. V. Коллокация данных РСДБ-наблюдений по программе NEOS-A за 1993-2001 гг. Сообщения ИПА РАН № 145, 2002 г.
9. Губанов В.С., Суркис И.Ф., Титов О.А. Внутрисуточные флуктуации тропосферной задержки по данным РСДБ-наблюдений. Тезисы конференции "Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики", 23-27 сентября 1996 г., Санкт-Петербург, стр. 145.
10. Вытнов А.В., Губанов В.С., Суркис И.Ф., Титов О.А. Внутрисуточные флуктуации фазы водородных мазеров Ч1-80. Тезисы конференции "Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики", 23-27 сентября 1996 г., Санкт-Петербург, стр. 147.
11. V.S. Gubanov, I.F. Surkis. Stochastic analysis of VLBI data. Тезисы конференции "Journees'99 & IX. Lohrmann-Kolloquium", Dresden, 13-15 сентября 1999, стр. 45.
12. И.А. Верещагина, В.С. Губанов, И.Ф. Суркис. Многофункциональный пакет QUASAR для обработки РСДБ-наблюдений. Тезисы конференции "Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века", Санкт-Петербург, 2000, стр. 64.

13. В.С. Губанов, И.А. Козлова, И.Ф. Суркис, Ю.Л. Русинов. Новый многофункциональный программный пакет QUASAR для обработки РСДБ-наблюдений: конструкция, возможности, результаты. Тезисы конференции "Всероссийская астрономическая конференция", Санкт-Петербург, 2001, стр. 169.

Личный вклад автора

Автором была сформирована общая структура пакета, спроектированы связи между его различными частями, разработаны база исходных данных, система графической коррекции данных, система управления пакетом. При создании программы редукционных вычислений им были разработаны блоки чтения всех входных данных и сохранения результатов вычислений. В системах оценивания автор разрабатывал общие для различных методов блоки и процедуры чтения входных файлов, формирования матриц частных производных, сохранения результатов, программы оценивания общих параметров для всех одновременно обрабатываемых серий. Им были полностью реализованы два метода оценивания — средняя квадратическая коллокация (СКК) и многопараметрический метод наименьших квадратов (МПМНК) — и обработан 9-летний ряд наблюдений по программе NEOS-A за период 1993-2001 г.г.

В совместных публикациях автору принадлежат: в [1,2,9,10] — разработка динамической и стохастической моделей оцениваемых флуктуаций, параметризация автоковариационных функций, доказательство их положительной определенности, в [4] — создание системы управления редукционными вычислениями, в [5] — разработка и создание программной системы для совмещения различных методов оценивания в одном пакете, в [8] — реализация итерационного процесса оценивания сигналов, метода стохастической регуляризации случайных параметров, процедуры формирования выходных файлов для отправки в IERS и другие центры анализа, в [11] — сравнение СКК оценок тропосферных флуктуаций на станции Onsala с их прямыми WVR измерениями, в [12-13] — описание структуры и возможностей пакета.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Она изложена на 147 страницах, содержит 38 рисунков и 8 таблиц. Список литературы включает 46 наименований.

Первые две главы диссертации носят преимущественно обзорный характер. Оригинальными в первой главе являются заключительные разделы, описывающие различные настройки редукционных вычислений пакета, перечень параметров, для которых вычисляются частные производные, и сравнение редукций пакетов QUASAR и OCCAM v3.4.

Оригинальными во второй главе являются разделы 2.1.5. — вывод и применение положительно определенной функции для аппроксимации автоковариаций высокочастотных стохастических компонент РСДБ-наблюдений, 2.1.6. — нерегулярности хода стандартов времени и частоты станций и заключительный раздел 2.6., посвященный обобщению многосерийных методов оценивания с целью оптимизации вычислений.

Содержание диссертации

Во **введении** сформулированы цель работы, ее актуальность, научная новизна и практическая значимость, а также результаты, выносимые на защиту. Кратко изложено содержание работы.

Первая глава содержит математические алгоритмы редукционной обработки данных. Основная задача астрометрической редукции заключается в том, чтобы на основании имеющихся теорий и априорных данных как можно точнее предвычислить измеряемые в процессе РСДБ-наблюдений величины групповой задержки τ и скорости ее изменения $\dot{\tau} = \partial\tau/\partial t$. Вычисляются также частные производные задержки по выбранному набору параметров, требующих уточнения, а также ее дисперсия с учетом влияния ионосферы.

В барицентрической системе координат ICRS разность моментов прихода одного и того же волнового фронта от произвольного внегалактического радиоисточника в точки пространства 1 и 2 (вакуумная задержка), измеренная в одной и той же шкале атомного барицентрического времени TCB (Time Coordinate for the Barycentric system), равна

$$\tau_v = T_2 - T_1 = -\frac{1}{c}\mathbf{k} \cdot (\mathbf{R}_2(T_2) - \mathbf{R}_1(T_1)) + \tau_{grav} \qquad (1)$$

где c — скорость света, $\mathbf{k}$ — единичный вектор направления на источник, $\mathbf{R}_i$ — барицентрические векторы направления на i-ю точку пространства, τ_{grav} — суммарная гравитационная задержка, вызванная искривлением траектории радиосигнала в поле притяжения Земли, Луны, Солнца, Юпитера и Сатурна.

Но поскольку РСДБ-наблюдения ведутся с поверхности Земли и регистрируются наземными хранителями времени, выражение (1) трансформируется в геоцентрическую систему координат с учетом всех релятивистских эффектов, превышающих уровень 1 ps. Поэтому далее описываются процедуры вычисления временной задержки и частоты интерференции в земной системе координат ITRS и в шкале земного атомного времени TT, а также излагается алгоритм вычисления их частных производных.

Далее перечисляются исходные данные, используемые в редукционных вычислениях: каталоги координат и скоростей станций, координат радиоисточников, эфемериды, опорные системы ПВЗ. Описываются различные варианты учета углов прецессии и нутации, в том числе рекомендуемые IERS Conventions (2000), структурной задержки, геофизических эффектов (полюсного прилива, атмосферных и океанических нагрузок, послеледниковых поднятий, приливных деформаций Земли), локальных и инструментальных эффектов (антенных выносов, температурных деформаций и ошибок ориентации антенн, атмосферной рефракции, тропосферной, ионосферной задержек). Приводится перечень настроек системы редукций, перечисляются параметры, для которых вычисляются частные производные. Оба эти списка легко могут быть расширены, как это описывается в третьей главе. В заключительных разделах первой главы приводятся результаты сравнения редукций пакетов QUASAR и OCCAM v3.4 и указаны не решенные пока проблемы.

Вторая глава содержит описание методов оценивания, их обобщение с целью оптимизации и сокращения вычислений.

В начале главы излагаются линейные модели РСДБ-наблюдений.

В процессе редукций формируется вектор $\mathbf{l}$ разностей задержек (O-C) зависящих как от ошибок наблюдений, так и от искомых малых поправок к уточняемым параметрам $\mathbf{x}$. Простейшая линейная модель таких данных имеет вид:

$$\mathbf{l} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{r}, \quad \mathbf{Q} \tag{2}$$

где $\mathbf{A}$ — матрица частных производных, вычисляемых программой редукций, $\mathbf{r}$ — вектор невязок модели (для полных моделей — это ошибки наблюдений), $\mathbf{Q}$ — диагональная матрица, составленная из дисперсий ошибок наблюдений.

Параметры этой модели можно условно разделить на три группы:

1. **Общие параметры** для всех серий наблюдений, постоянные или мед-

ленно меняющиеся в течение всего периода обрабатываемых наблюдений. Например, координаты и скорости станций, координаты источников. Представляются постоянными величинами или полиномиальными трендами небольшой степени.

2. **Среднесуточные (суточные) параметры**, постоянные или медленно меняющиеся в течение суток. Например, ПВЗ, регулярная часть влажной составляющей тропосферной задержки в зените, разности фаз водородных мазеров. Представляются для каждой серии наблюдений постоянными числами или полиномиальными трендов небольшой степени.
3. **Внутрисуточные параметры**, описывающие высокочастотные, быстро меняющиеся в течение суток компоненты постоянных или регулярных параметров. Например, вариации влажной составляющей тропосферной задержки в зените, флуктуации фазы водородных мазеров, высокочастотные изменения координат полюса и всемирного времени UTC-UT1. Их представление зависит от метода оценивания.

Указанные типы параметров обозначаются соответственно $\mathbf{x}$, $\mathbf{y}_k$, $\mathbf{z}_k$, а соответствующие им матрицы частных производных — $\mathbf{A}_k$, $\mathbf{B}_k$, $\mathbf{C}_k$, где k — номер серии. Разделив в формуле (2) параметры и матрицы частных производных на соответствующие группы, получим модель:

$$\mathbf{l}_k = \mathbf{A}_k\mathbf{x} + \mathbf{B}_k\mathbf{y}_k + \mathbf{C}_k\mathbf{z}_k + \mathbf{r}_k, \quad \mathbf{Q}_k \tag{3}$$

При многопараметрическом МНК-оценивании стохастические компоненты представляются разложениями по полиномам Лежандра высокой степени (порядка 10-15), коэффициенты которых постоянны в течение суток, и поэтому модель (3) в этом случае не содержит параметров $\mathbf{z}_k$.

В модели, применяемой в методе СКК, каждый неустойчивый внутри суток параметр с индексом j рассматривается как дискретная случайная последовательность (сигнал) $\mathbf{s}_{jk}$, который задан для всех моментов наблюдений. Предполагается, что все сигналы центрированы, нормально распределены, стационарны и не зависят друг от друга и от невязок модели $\mathbf{r}_k$. В этом случае модель наблюдений называется стохастической и имеет вид

$$\mathbf{l}_k = \mathbf{A}_k\mathbf{x} + \mathbf{B}_k\mathbf{y}_k + \sum_j \mathbf{C}_{jk}\mathbf{s}_{jk} + \mathbf{r}_k, \quad \mathbf{Q}_k, \quad \mathbf{K}_k \tag{4}$$

где $\mathbf{K}_k$ — полная симметрическая матрица автоковариаций сигналов тёплицевого вида, которая должна быть известна a priori.

В этой же главе описываются параметрическая модель многогруппового МНК и динамическая модель для фильтрации Калмана.

Обработка РСДБ наблюдений осложняется неустойчивостью работы атомных стандартов времени и частоты — водородных мазеров, в дальнейшем именуемых часами. Нередко возникают так называемые скачки — внезапное изменение показаний часов и/или их хода. Можно говорить о существовании скачков нулевого порядка (скачок показаний часов), первого порядка (скачок первой производной хода часов) и т.д. Полуавтоматическая методика обнаружения и удаления этих скачков описана в третьей главе.

Далее во второй главе излагаются алгоритмы оценивания методами многопараметрического МНК в односерийном и многосерийном вариантах, стохастическая регуляризация параметров, использование точных ("жестких") и стохастических ("мягких") условий, связывающих параметры. Перечисляются условия, налагаемые на суточные и общие параметры. Рассматривается алгоритм перевзвешивания наблюдений. Описывается метод многогруппового МНК, дополнительные жесткие условия, обеспечивающие непрерывность и дифференцируемость аппроксимирующих функций на границах выделенных групп данных. Подробно излагается метод СКК. Даются основные формулы для оценок суточных и внутрисуточных компонент, их апостериорных ковариаций для односерийного и многосерийного оценивания, перевзвешивание наблюдений. Дается также описание алгоритма фильтрации Калмана. Даются основные формулы, определение начальных условий, рассматриваются два варианта фильтрации: фильтр случайных блужданий и фильтр двумерных марковских процессов.

В конце главы описываются унификация многосерийных методов оценивания с выделением общих вычислительных блоков и методы ускорения вычислений путем исключения операций с нулевыми элементами матриц.

Третья глава посвящена техническому описанию пакета.

В §1 анализируются существовавшие аналогичные пакеты обработки РСДБ-наблюдений и формируются основные технические требования к проектируемому пакету: многофункциональность, гибкость, массовость обработки данных, простота управления, надежность.

§2 посвящен структуре и общей схеме пакета. Описываются взаимодействие между составными частями пакета: базой исходных данных, системой ее пополнения новыми сериями данных, системами редукций, графической коррекции данных, оценивания, переоценивания автоковариационных функций сигналов, управляющей программой.

Описывается конструкция пакета — организация вычислительных блоков в виде отдельных программ, запускаемых управляющей программой; обосновывается выбор операционной системы Microsoft Windows 95.

Раскрываются особенности пакета, обеспечивающие гибкость выбора состава оцениваемых параметров. Для каждого параметра могут оцениваться все три его компоненты — общая, суточная и внутрисуточная, первые две в виде ортогональных полиномов Лежандра произвольной степени. Возможность задавать оценивание любого состава параметров с любым набором компонент алгоритмически имеет лишь одно ограничение: все станции, как и все источники, имеют одинаковый состав относящихся ним параметров.

В §3 описывается конструкция базы исходных данных пакета, ее конструктивные особенности, обеспечивающие гибкость хранения данных, плотность упаковки (для хранения одного наблюдения требуется всего 155 байт), высокую скорость доступа.

В §4 описывается редукционная программа. Как показывает практика, алгоритм редукций требует наиболее частого вмешательства для приведения его в соответствие с регулярно меняющимися рекомендациями IERS Convertions и новыми данными. С целью упрощения поиска элементов редукционных вычислений программа разделяется на два блока: вычислительный, осуществляющий все редукционные вычисления, и блок для всех остальных операций. Вычислительный блок получает все данные в уже готовом виде — прочитанными из входных файлов и отсортированными; результаты вычислений (вектор O-C и матрицы частных производных) блок формирует также в удобном для него виде. В итоге программа редукций оказывается хорошо структурированной, легко доступной для последующих модификаций и имеет довольно высокое быстродействие.

В §5 описывается конструкция систем оценивания. Пакет позволяет гибко настраивать состав оцениваемых параметров. При этом пользователь выбирает набор оцениваемых параметров — глобальных, параметров станций и источников, степени полиномиальных трендов общих и суточных параметров.

Системы оценивания автоматически в зависимости от состава оцениваемых параметров извлекают априорные данные о величинах регуляризации общих и суточных параметров, об автоковариационных функциях внутрисуточных сигналов, формируют жесткие условия.

Общая часть систем оценивания включает программы оценивания общих параметров и библиотеку, осуществляющую унификацию работы специфических для каждого метода программ оценивания. В состав библиотеки входят системы сортировки, процедуры регуляризации суточных параметров и наложения на них жестких условий, записи выходных результатов, а также чтения/записи двоичных файлов различных промежуточных данных. При глобальном уравнивании предусмотрено удаление "плохих" общих параметров, которые невозможно удовлетворительно оценить на данном ряде наблюдений, непосредственно при решении систем уравнений общих параметров.

Часть программ оценивания выполнен на языке программирования FORTRAN, другие — на C++. Поэтому разработаны два комплекта библиотек процедур для каждого из языков программирования.

В §6 описывается система графической корректировки данных. Эта программа может запускаться как после выполнения редукций, работая с вектором (O-C) и удаляя скачки часов и грубые отскоки, так и после оценивания, работая с вектором невязок и производя окончательную корректировку наблюдений. Вводимые исправления записываются в базу исходных данных. В процессе работы пользователь видит на экране график в шкале времени наблюдений значений некоторых величин: вектор (O-C) (**Loc**), невязки решения простейшего МНК (**LSM**), невязки оценивания (**RSD**), нормированные на СКО невязки оценивания (**RSD/Sigma**). В каждом из этих режимов возможен просмотр информации как для любой из баз (однобазовый режим), так и для всех баз одновременно (многобазовый).

Режим **LSM** выводит невязки встроенного многопараметрического МНК-оценивания с фиксированным набором параметров. Кроме того, этот режим осуществляет вычисление поправок хода часов за скачки. Основное назначение графической программы — удаление скачков часов на какой-либо из станций. В ходе устранения скачка пользователь просматривает в режиме **Loc** все базы, определяя, на какой из станций произошел скачок, отмечает (обводя мышкой) все наблюдения этой станции после скачка. Затем он переходит в многобазовый **LSM** режим и дает команду устранения скачка. В соответствии с этим алгоритм МНК для помеченных точек оценивает величины сдвигов. Результат немедленно отображается на графике.

Помимо операции удаления скачков, система графической коррекции предоставляет пользователю довольно широкий набор действий: просмотр данных в различном масштабе; удаление отдельных точек; корректировка данных по заданному критерию в единицах СКО; корректировка данных по заданному пороговому критерию.

В §7 описывается облегчающая процесс работы с пакетом управляющая программа. При ее разработке были использованы шаблоны многооконных документов Borland C++ Builder, механизмы Windows API, BDE (Borland Database Engine), SQL (Search Query Language), шаблонные контейнеры стандартной библиотеки C++.

В §8 описываются технические характеристики пакета, требуемое аппаратное обеспечение, степень переносимости пакета на другую операционную систему.

В **четвертой главе** приведены результаты обработки 9-летнего ряда РСДБ-наблюдений по программе NEOS-A за период 1993-2001 гг. методами СКК и многопараметрического МНК (МПМНК).

В §§1-4 описаны основные этапы обработки данных наблюдений.

В §5 приводятся полученные оценки внутрисуточных компонент. В разделе 4.5.1. описывается обработка стохастических сигналов методом СКК. Доказывается непротиворечивость оценок внутрисуточных параметров. В разделе 4.5.2. описывается оценивание внутрисуточных компонентов аппроксимацией полиномиальными трендами методом МПМНК.

В §6 приводятся оценки антенного выноса для всех станций и поправок к локальным коэффициентам реакции земной коры на переменную атмосферную нагрузку. Для активно наблюдавших станций точность этих оценок оказалась лучше 1 мм для антенных выносов и лучше 0.3 мм/мб — для коэффициентов атмосферной нагрузки.

В §7 описывается стохастическая регуляризация оценок координат и скоростей станций, координат источников, ПВЗ.

В §8 даются регуляризированные оценки поправок координат и скоростей станций. Величина этих оценок у большинства станций не превышала 1 мм и 1 мм/год соответственно и лишь у некоторых станций доходила до 3 мм и 3 мм/год соответственно. Поправки скоростей некоторых станций, наблюдавших в короткий период времени, были исключены из решения.

В §9 приводятся регуляризированные оценки поправок координат 323 радиоисточников. Оценки прямых восхождений и склонений большинства источников находились на уровне единиц μs и десятков μas соответственно, и лишь у некоторых источников превышали 0.1 ms и 1 mas.

В §10 приведены оценки поправок параметров вращения Земли в системе IERS(EOP)C04, полученные как односерийным, так и многосерийным методом СКК, а также односерийным методом МПМНК. Взвешенные значения СКО (WRMS) этих поправок по всем сериям наблюдений приведены в таблице 1.

В §11 приведены не регуляризированные поправки к номинальным зна-

Таблица 1: WRMS поправок ПВЗ в системе IERS(EOP)C04 по наблюдениям программы NEOS-A за 1993-2001 гг.

Параметр	Односе-рийный СКК	Многосе-рийный СКК	Односе-рийный МПМНК
Нутация $\Delta\psi sin\epsilon$, [mas]	0.08	0.08	0.16
Нутация Δ *epsilon*, [mas]	0.10	0.11	0.16
Всемирное время (UT1-UTC), [0.1 ms]	0.08	0.08	0.11
Продолжительность суток LOD, [0.1 ms]	0.26	0.26	0.32
x-координата полюса, [mas]	0.14	0.15	0.24
y-координата полюса, [mas]	0.20	0.16	0.27

чениям PPN-параметра $\gamma = 1.0$, постоянной лунно-солнечной прецессии в долготе P=5038.7783 arcsec/cen и чисел Лява и Шида второго порядка $h_{20} = 0.6078$, $l_{20} = 0.0847$.

Заключение

Создан новый многофункциональный программный пакет QUASAR для обработки РСДБ наблюдений, позволяющий применять принципиально разные методы оценивания и обладающий гибкой и удобной системой корректировки данных наблюдений, выбора режима редукционных вычислений и состава оцениваемых параметров. В настоящее время в пакете реализованы три метода оценивания: средняя квадратическая коллокация, многопараметрический МНК и фильтрация Калмана в односерийном варианте. В ближайшее время в пакет будут добавлены многосерийное оценивание фильтрацией Калмана и многогрупповой МНК.

Основные результаты применения пакета QUASAR получены методом СКК, который наиболее полно учитывает всю имеющуюся априорную информацию об оцениваемых параметрах и сигналах, дает объективно наиболее достоверные и точные оценки. Его реализация представляет собой наиболее трудную проблему как с теоретической, так и с практической точек зрения. Ее успешное решение существенно облегчает внедрение других методов анализа наблюдений на общей платформе пакета QUASAR.

Основу этой платформы составляют редукционные вычисления и система управления пакетом. И хотя процесс изменений алгоритмов редукционных вычислений и уточнений априорных данных будет продолжаться и дальше, конструктивные особенности пакета QUASAR позволяют вносить их довольно быстро и безболезненно без существенной перестройки пакета. Именно эти свойства пакета обеспечивают возможность его использования в течение многих лет.

Подписано к печати 22.05.2002. Формат 60 × 90/16. Офсетная печать.
Печ. л. 1.2. Уч.-изд. л. 1.2. Тираж 100 Заказ бесплатно

Отпечатано в ООО "Галарис"
(Санкт-Петербург, Казанская ул. д.5/7).

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