

УДК 521.9+520.875

С. Л. Болотин

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

Центр обработки РСДБ-наблюдений
в Главной астрономической обсерватории
НАН Украины

Описано сучасний стан та діяльність центру обробки РНДБ-спостережень в ГАО НАНУ. Анонсовано нове покоління програмного забезпечення обробки РНДБ-спостережень «SteelBreeze».

ВВЕДЕНИЕ

Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) является уникальным методом геодинاميки и астрометрии, который позволяет определять одновременно как координаты и скорости пунктов на поверхности Земли и внегалактических источников в космическом пространстве, так и взаимную ориентацию небесной и земной систем координат. Точность определения координат и параметров вращения Земли (ПВЗ) из РСДБ-наблюдений выше, чем у других современных методов — GPS или SLR. Анализ РСДБ-наблюдений проводится в ГАО НАНУ уже более 10 лет.

В 1990 году А. Курьянова, М. Медведский и Я. Яцкив создали программное обеспечение (ПО) «Киев-Геодинамика-Р» [1]. Оно было написано на языке FORTRAN для ЭВМ серии ЕС. ПО позволяло обрабатывать серии сеансов РСДБ-наблюдений и определять ПВЗ, координаты станций и радиоисточников.

В 1992 году начался проект, который впоследствии получил название «SteelBreeze». Основной целью его было создание независимого программного обеспечения обработки РСДБ-наблюдений, что в дальнейшем дало бы возможность сравнивать полученные решения, применяемые подходы, алгоритмы и т. д. Это программное обеспечение разрабатывалось на языке «Pascal» для персональных компьютеров под управлением операционной системы MS DOS, а затем было адаптировано для

работы с графическим интерфейсом Windows 3.1 фирмы «Microsoft».

С помощью «SteelBreeze» в 1994 г. были получены оценки суточных и полусуточных вариаций вращения Земли непосредственно. На 14-ти суточном интервале сеансов CONT'94 РСДБ-наблюдений были оценены координаты полюса Земли ($d X_p$ и $d Y_p$) и вариации Всемирного времени $d(UT1-UTC)$ с разрешением во времени около 5 мин [3].

Первое решение, предоставленное Международной службе вращения Земли (МСВЗ) для построения комбинированного решения, было получено в 1995 г. из обработки 177707 РСДБ-наблюдений, выполненных в течении четырех лет. Оно включало определение координат радиоисточников, координат станций наблюдений и серию ПВЗ.

В 1998 г. началась разработка новой версии программного обеспечения «SteelBreeze-2». В основу этого проекта легли решения и алгоритмы, которые были выработаны при разработке «SteelBreeze-1», а изменения затронули в основном технику разработки ПО. Так, «SteelBreeze-2» написан на языке C++, может исполняться на различных операционных системах, таких как Linux, FreeBSD, Solaris и др., использует библиотеку графических интерфейсов Qt.

С 1999 года центр обработки РСДБ-наблюдений ГАО НАНУ выступает в качестве центра анализа в Международной РСДБ-службе для задач геодезии и астрометрии (IVS).

ОБОРУДОВАНИЕ ЦЕНТРА

Работы в центре анализа РСДБ-наблюдений ведутся на компьютере «Intel Pentium II» (400 MHz) с оперативной памятью 192 Мб. Компьютер оборудован SCSI-интерфейсом, к которому подключены три жестких диска с объемом 9, 4 и 6 Гб, при этом возможно расширение до 15 устройств. Компьютер управляется операционной системой Linux/GNU (версия ядра 2.2.18, LibC-2.2.1) с графическим интерфейсом под управлением X-сервера XFree86-3.3.6.

На данный момент ГАО подключена к всемирной сети Интернет при помощи некоммутируемого соединения на скорости 33.6 кб/с. К сожалению, такая низкая пропускная способность нашего канала не позволяет центру анализа выступать в роли операционного центра IVS.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ «STEELBREEZE-1»

ПО «SteelBreeze» разрабатывалось как средство анализа геодезических наблюдений РСДБ. Оно использует метод наименьших квадратов для оценивания различных геодинимических параметров с применением квадратно-корневого информационного фильтра, алгоритм которого описан в работе [2]. Для треуголизации матриц в этом фильтре применяются преобразования Хаусхолдера, что делает его быстрым, экономным и относительно нечувствительным к ошибкам машинного округления. Фильтр позволяет также использовать стохастические модели при оценивании параметров.

Программное обеспечение импортирует данные РСДБ-наблюдений, представленные в различных форматах (NGS, MarkIII, VDB), и хранит их в своем бинарном формате. При этом обеспечивается быстрый доступ к записям и их компактное размещение. Также хранятся в отдельных базах данных каталоги станций наблюдений, радиостанций, ПВЗ, эфемериды и другие данные.

«SteelBreeze» обрабатывает РСДБ-наблюдения (временную задержку), которые проводились в течение одного или нескольких сеансов наблюдений. Временная задержка моделируется согласно принятым соглашениям МСВЗ [7]. Возможно использование и других моделей, не вошедших в соглашения: модели движения тектонических плит, модели нутации, тропосферной задержки в зените и ее масштабирующей функции и др.

Программное обеспечение оценивает следующие геодинимические параметры: параметры вращения Земли, координаты и скорости станций наблюде-

ний, координаты радиостанций, числа Лява, параметры стандартов частоты станций наблюдений, тропосферную задержку в зените. При этом каждый оцениваемый параметр может принадлежать следующим типам:

- глобальный параметр: несмещенная оценка параметра определяется на всем наборе обрабатываемых сеансов наблюдений (обычно применяется для координат радиостанций, станций, и т. д.);
- локальный параметр: несмещенная оценка параметра определяется на каждом сеансе наблюдений, так что оценки на двух соседних интервалах наблюдений считаются независимыми (например ПВЗ);
- локальный параметр с наложенными связями: несмещенная оценка параметра определяется на каждом сеансе наблюдений, при этом оценки на двух соседних интервалах наблюдений связаны между собой определенными правилами;
- стохастический параметр: поведение оцениваемого параметра между двумя последовательными моментами наблюдений внутри одного сеанса описывается определенным правилом (в программном обеспечении используется модель случайного блуждания). Этот тип используется для оценивания часов станций и тропосферной задержки в зените;
- стохастический параметр с наложенными связями: в отличие от стохастического параметра его оценки на соседних сеансах наблюдений связаны такими же правилами, как и внутри сеансов.

ПО «SteelBreeze-1» состоит из около 80 тыс. строк исходного текста на языке «Pascal». Оно создавалось с использованием методов объектно-ориентированного программирования, что существенно облегчало процесс разработки программы.

В качестве первого примера анализа РСДБ-наблюдений при помощи ПО «SteelBreeze-1» представим решение GAOUA 2000 R 01. Для этого решения РСДБ-наблюдения, проводимые по программе IRIS-A, а затем — NEOS-A, были обработаны с целью построения земной и небесной систем координат и определения их взаимной ориентации. Использовалось 288583 временных задержек, полученных с 6 января 1998 по 28 декабря 1999 на 176 сеансах наблюдений.

Начальные значения координат станций наблюдений задавались ITRF94, а их скорости вычислялись согласно модели NNR-NUVEL-1A. Для привязки начала отсчета полученной системы с ITRF94 накладывалось дополнительное условие:

Рис. 1. Расположение станций, участвовавших в решении GAOUA 2000 R 01. Треугольниками отмечены станции, координаты которых использовались для фиксации начала отсчета полученной земной системы координат, кружками — остальные станции

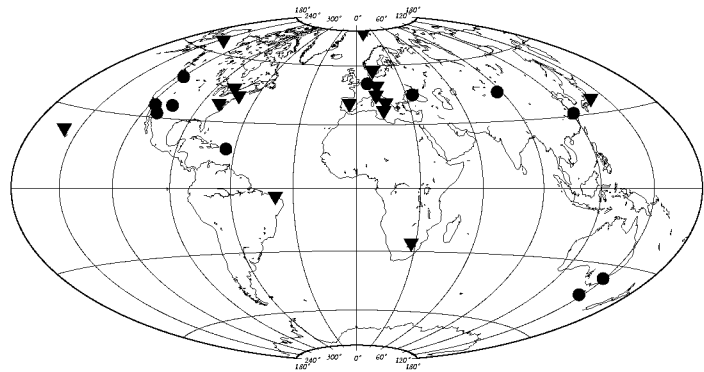
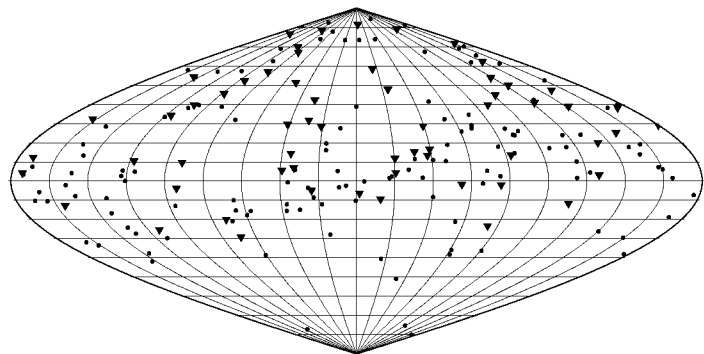


Рис. 2. Распределение на небесной сфере радиоисточников, входящих в решение GAOUA 2000 R 01. Треугольниками отмечены радиоисточники, координаты которых участвовали в фиксации прямого восхождения полученной небесной системы координат, кружками — остальные радиоисточники



для выбранных станций наблюдений (ALGOPARK, DSS65, FORTLEZA, GILCREEK, HARTRAO, KASHIMA, KOKEE, MATERA, MEDICINA, NOTO, NRAO20, NYALES20, ONSALA60, WESTFORD и WETTZELL) справедливо равенство суммы векторов вычисленных положений сумме векторов положений, взятых из ITRF94:

$$\sum_{i=1}^{15} \mathbf{r}_{GAOUA2000R01} = \sum_{i=1}^{15} \mathbf{r}_{ITRF94} \cdot \quad (1)$$

На данном интервале наблюдений были определены координаты 26 станций.

На рис. 1 показано распределение этих станций наблюдений. Треугольниками обозначены станции, координаты которых использовались для фиксации начала отсчета полученной земной системы координат (уравнение (1)).

Начальные значения координат радиоисточников задавались каталогом RSC(WGRF)95R01. Начало прямого восхождения в определяемой системе координат связано с началом прямого восхождения в RSC(WGRF)95R01 требованием равенства сумм прямых восхождений некоторых радиоисточников для обеих систем координат (для этого использовался набор из 60 радиоисточников):

$$\sum_{i=1}^{60} \alpha_{GAOUA2000R01} = \sum_{i=1}^{60} \alpha_{RSC(WGRF)95R01} \cdot \quad (2)$$

Полученная таким образом небесная система отсчета состоит из координат 191 радиоисточника.

На рис. 2 показано распределение этих радиоисточников на небесной сфере. Треугольниками обозначены радиоисточники, координаты которых использовались для фиксации прямого восхождения полученной небесной системы отсчета (уравнение (2)).

Взаимная ориентация земной и небесной систем координат вычислялась согласно модели нутации IAU-1980 с использованием поправок из решения EOP(IERS)97C04. Для перехода между этими системами координат использовалась концепция «невращающегося начала отсчета» [4]. В движении полюса и изменениях UT1 учитывались суточные и полусуточные приливные вариации согласно [6].

Фиксация взаимной ориентации земной и небесной систем координат была задана ПВЗ из решения EOP(IERS)97C04 на 29 декабря 1998 г. Тропосферная рефракция в зените, вызванная гидростатическим компонентом и парами воды, моделировалась согласно [8]. При этом использовалась функция масштабирования МТТ [5] для обоих компонентов. Ионосферная задержка исключалась благодаря использованию наблюдений на двух диапазонах частот. Задержка в зените и нестабильность стандарта частоты оценивались как стохастические парамет-

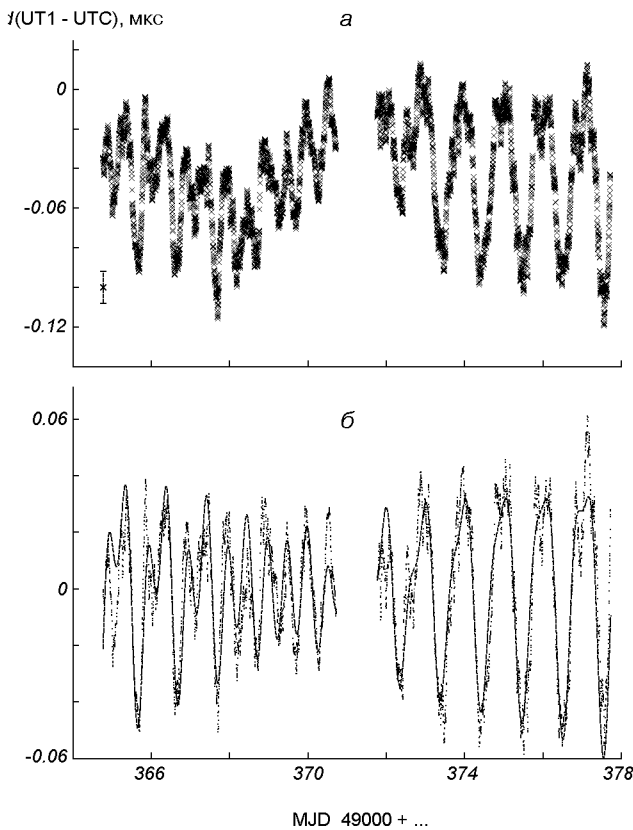


Рис. 3. *a* — оценки неравномерности вращения Земли $d(UT1 - UTC)$; *б* — эти же оценки, из которых удален низкочастотный тренд (точки) и теоретические значения, вычисленные согласно модели Херринга и Донга [6] (штриховая линия)

ры при помощи модели случайного блуждания со следующими значениями мощности спектральной плотности белого шума: для параметров часов 20^2 пс²/ч, для тропосферной задержки в зените 1^2 см²/ч.

Взвешенные средние квадратичные остатки этого решения составляют 38.4 пс.

В качестве второго примера анализа РСДБ-наблюдений с помощью ПО «SteelBreeze-1» рассмотрим определение высокочастотных вариаций в скорости вращения Земли. Использовались наблюдения расширенной РСДБ кампании 1994 г. Во время ее проведения станции практически непрерывно вели наблюдения с 11 по 26 января. До 24 станций трех независимых сетей (NASA-R&D, VLBA и NAVEX-G) участвовали в наблюдениях. Однако лишь сеть NASA-R&D удовлетворяет требованиям, необходимым для высокоточного определения вариаций ПВЗ. Остальные две сети по различным причинам (конфигурация станций, время накопления, стабильность стандартов частоты на станциях, и т. д.) не пригодны для этих целей. В итоге

использовались данные семи станций: GILCREEK, KOKEE, WESTFORD, LA-VLBA, WETTZELL, ONSALA60 и FD-VLBA, которые наблюдали 41 радиоисточник. На эти наблюдения принято ссылаться как CONT'94.

Обработка выполнялась так же, как и в предыдущем примере, за исключением того, что координаты радиоисточников, координаты и скорости станций не оценивались, а брались из решений RSC(WGRF)95R02 и SSC(ITRF)96C01 соответственно, а координаты полюса dX_p , dY_p и $d(UT1 - UTC)$ оценивались как стохастические параметры. Величины мощности спектральной плотности стохастических параметров задавались следующими:

параметры часов:	18^2 пс ² /ч;
задержка в зените:	1.0^2 см ² /ч;
$d(UT1-UTC)$:	0.012^2 мкс ² /ч;
dX_p и dY_p :	$(0.001 \cdot 0.16'')^2$ /ч;

Было обработано 27975 временных задержек и взвешенные средние квадратичные остатки решения составили 10.3 пс.

На рис. 3, *a* приведены оценки неравномерности вращения Земли $d(UT1 - UTC)$. Эти же оценки, из которых удален низкочастотный тренд, и теоретические значения, вычисленные согласно модели Херринга и Донга [6], показаны на рис. 3, *б*.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ «STEELBREEZE-2»

К сожалению, описанное выше ПО «SteelBreeze-1» имеет ряд недостатков: оно было создано с использованием непереносимого на другие платформы диалекта языка программирования и библиотек; есть внутренние ограничения на объем в базах данных наблюдений, что приводит к невозможности иметь дело с сеансами, на которых было проведено более 15535 наблюдений. По этим причинам в 1998 году развитие ПО «SteelBreeze-1» было остановлено и начата разработка программного обеспечения нового поколения.

Новое ПО «SteelBreeze-2» наследует алгоритмы и методики предыдущей версии, а также устраняет ее недостатки. В новой версии ПО процесс обработки наблюдений не связан с сеансами РСДБ-наблюдений, что делает возможным обрабатывать сеансы, которые перекрываются во времени. Улучшены алгоритмы управления базами данных наблюдений, каталогов станций и источников. Добавлен новый тип параметров — «дуговой параметр», — оценки которого проводятся внутри определенного интервала времени и не зависят от начала и конца сеансов наблюдений. Полностью изменен интерфейс пользователя.

ПО «SteelBreeze-2» распространяется в исходных текстах в соответствии с лицензией GNU и может быть доступен в Интернете по адресу
<http://sourceforge.net/projects/steelbreeze>

1. Яцкив Я. С., Курьянова А. Н., Медведский М. М. Комплекс алгоритмов и программ для обработки РСДБ-наблюдений «Киев-GR1». — Киев, 1991.— с.—(Препринт / АН УССР; Ин-т теорет. физики; ИТФ-91-37Р).
2. Biermann G. J. Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation // Mathematics in Science and Engineering Series.—1977.—128.—P. 242.
3. Bolotin S. High frequency variations of EOP from extensive VLBI operations in January 1994 // Proc. of the second EVN/JIVE Symp. — 1995.—P. 13—18.
4. Capitaine N. The Earth rotation parameters: conceptual and convention definitions // Astron. and Astrophys.—1986.—162.—P. 323—329.
5. Herring T. A. // Proc. of the Symp. on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy / Eds by J. C. De Munch, T. A. Th. Spoelstra. — Netherland Geodetic Commission, Delft, Netherlands, Publications on Geodesy.—1992.—N 36.—P. 157—164.

6. Herring T. A., Dong D. Measurement of diurnal and semi-diurnal rotational variations and tidal parameters of Earth // J. Geophys. Res.—1994.—99.—P. 18051—18071.
7. International Earth Rotation Service, IERS Conventions // Ed. D. D. McCarthy. — Paris, 1996.
8. Saastamoinen J. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites // The Use of Artificial Satellite for Geodesy / Eds S. W. Henriksen et al. — Washington, D. C.: AGU, 1972.—P. 247—251.—(Geophys. Monogr. Ser. 15).

VLBI DATA ANALYSIS CENTER AT THE MAIN ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE

S. L. Bolotin

The current state and activities of the VLBI Data Analysis Center at the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv are described. The new generation of the VLBI data analyzing software «SteelBreeze» is announced.