

## Определение параметров вращения Земли из РСДБ-наблюдений с помощью программного комплекса «Ариадна»

© В. Е. Жаров<sup>1,2</sup>, С. Л. Пасынок<sup>3</sup>, А. Н. Синёв<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>МГУ, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Московская обл., Россия

Для вычисления ПВЗ из РСДБ-наблюдений в ФГУП «ВНИИФТРИ» установлена новая версия программного пакета «Ариадна», который обрабатывает как часовые, так и суточные сеансы РСДБ-наблюдений. Разработанная версия программного комплекса «Ариадна» позволяет повысить точность отдельных решений, формировать результаты отдельных решений в виде SINEX-файлов и проводить совместную обработку SINEX-файлов для получения комбинированного решения по РСДБ. В статье приводятся результаты использования программного пакета «Ариадна» в ФГУП «ВНИИФТРИ» для определения ПВЗ.

**Ключевые слова:** параметры вращения Земли, всемирное время, служба ПВЗ, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами.

### Введение

Параметры вращения Земли (ПВЗ) определяют взаимную ориентацию земной и небесной систем координат (ЗСК и НСК). К ПВЗ относятся: разность шкал всемирного и всемирного координированного времени UT1-UTC, координаты земного полюса  $x_p$ ,  $y_p$  и поправки к теоретическим координатам небесного полюса  $dX$  и  $dY$ . В настоящее время для определения ПВЗ используются следующие методы и средства:

- радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ);
- глобальные спутниковые навигационные системы (ГНСС): ГЛОНАСС и GPS;
- лазерная локация спутников (ЛЛС);

- лазерная локация Луны (ЛЛЛ);
- доплеровская система DORIS;
- системы лазерных гироскопов.

В табл. 1 приведены различные методы и условно показана их роль в определении ПВЗ и установлении и поддержании земной и небесной координатных основ (ITRF и ICRF).

Таблица 1

Роль различных методов в решении задач связанных с определением вращения Земли

Задача	РСДБ	ГНСС	ЛЛС	ЛЛЛ	DORIS
Реализация ICRF	***				
Реализация ITRF	**	***	**		***
Прецессия, нутация	***	*	*	**	
Всемирное время	***			*	
Координаты полюса	***	***	*		*

Из этой таблицы видно, что вклад различных методов в определение ПВЗ различный. Также видно, что РСДБ — метод, позволяющий одновременно определить все ПВЗ. Для вычисления ПВЗ из РСДБ-наблюдений был разработан программный комплекс «Ариадна» [1], позволяющий обрабатывать как часовые сеансы по программе Intensive, так и суточные сеансы по программам Международной РСДБ службы (IVS). Редукция наблюдений выполняется в соответствии со стандартами Международной службы вращения Земли и опорных систем координат (IERS) [2].

Новая версия этого программного комплекса, адаптированная для целей оперативной службы ПВЗ, была внедрена [3] в Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения ПВЗ (ГМЦ ГСВЧ), где и используется в настоящее время для определения ПВЗ из обработки результатов РСДБ-наблюдений. В настоящей статье представлены результаты её доработки и применения в ГМЦ ГСВЧ для цели определения ПВЗ.

#### **Цели доработки программного комплекса и исходные данные для определения ПВЗ**

Из табл. 1 видно, что вклад различных методов в определение ПВЗ различный. Кроме того, каждый метод обладает своими достоинства-

ми и недостатками, а также присущими ему систематическими погрешностями. Поэтому для построения принятых опорных значений ПВЗ используется процедура совместной обработки (комбинирования) с учётом всех этих факторов. Комбинированные решения строятся как для того, чтобы уточнить значения определяемых параметров в рамках данных одного метода измерений (горизонтальное комбинирование), так и для того, чтобы уточнить решение, полученное по всей совокупности методов измерений (вертикальное комбинирование). В настоящей работе рассматривается горизонтальное комбинирование (в рамках одного метода РСДБ).

Целями доработки являлись:

- разработка алгоритмов и методов уравнивания отдельных суточных и часовых сеансов РСДБ-наблюдений и генерирование SINEX-файлов (Solution INdependent EXchange format);

- разработка алгоритмов и методов уравнивания нескольких суточных сеансов РСДБ-наблюдений для оперативной оценки ПВЗ и улучшения стабильности решения;

- использование SINEX-файлов для построения комбинированного решения. Преимущество этого метода состоит в использовании нормальных уравнений, полученных для отдельных сеансов, и полной статистической информации (ковариационной матрицы) об отдельном решении.

В качестве исходных данных для определения ПВЗ использовались результаты РСДБ-наблюдений с 1984 по 2016 г. в формате NGS, полученные в результате проведения:

- суточных сеансов — продолжительность 24 часа, работали не менее трех телескопов, наблюдались 10–70 источников, около 200 наблюдений на каждом телескопе (программы IVS-R1, IVS-R2);

- часовых сеансов — продолжительность 1 час, 2–5 телескопов (программы Intensive).

### **Алгоритм обработки**

В решении оцениваются ПВЗ, (дополнительно: поправки к координатам источников, координатам телескопов) или только всемирное время UT1 (для Intensive), рассинхронизация и ход часов, поправки к тропосферной задержке.

При такой постановке задачи матрица условных уравнений оказывается вырожденной, и для её решения необходимо дополнительное условие, которое называется «отсутствие глобального вращения»

(NNR — no net rotation) для опорных телескопов, участвующих в наблюдениях. Это означает, что, если координаты одного из этих телескопов меняются нелинейным образом, то ошибка моделирования координат трансформируется в фиктивный поворот ЗСК, что отражается в значениях ПВЗ. Поэтому к выбору опорных телескопов нужно относиться ответственно. В программном пакете «Ариадна» мы считаем, что координаты 31 опорного телескопа меняются линейным образом. Именно они фиксируют ЗСК. Каждый сеанс обрабатывается независимо от других, а результат записывается в SINEX-файл. Используется стандартный подход: система условных уравнений преобразуется к системе нормальных уравнений относительно устойчивых параметров (т. е. параметров, которые можно считать постоянными во время отдельного сеанса).

Полностью алгоритм обработки опубликован в [1]. Далее, остановимся на отдельных деталях.

### Уравнивание наблюдений

Решение проводится в два этапа:

— вычисление с максимальной точностью расчётного значения задержки (1);

— оценивание параметров линеаризованной модели (4).

$$\tau_c = \frac{1}{c} \vec{B} \cdot \vec{s} + \Delta\tau, \quad (1)$$

где  $\vec{B}$  — вектор базы,  $\vec{s}$  — единичный вектор направления на источник, а  $\Delta\tau$  — расчётные значения поправок. Расчётная задержка является функцией времени и определяемых параметров:

$$\tau_c(t) = F(t, X_i, Y_i, Z_i, \dot{X}_i, \dot{Y}_i, \dot{Z}_i, \Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i, \alpha_k, \delta_k, UT1, x_p, y_p, \Delta\psi, \Delta\varepsilon, \dots), \quad (2)$$

где:  $X_i, Y_i, Z_i, \dot{X}_i, \dot{Y}_i, \dot{Z}_i, \Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i$  — координаты, скорости и тропосферные поправки к координатам станций ( $i$  изменяется от 1 до полного числа станций);  $\alpha_k, \delta_k$  — прямое восхождение и склонение радиосточников ( $k$  изменяется от 1 до полного числа наблюдавшихся источников);  $\Delta\psi, \Delta\varepsilon$  — углы нутации.

После линеаризации условных уравнений, с помощью представления значений искомым параметров в виде суммы априорных значений и малых поправок к ним, получим:

$$\tau_0 - \tau_c(t) = \sum_k \frac{\partial \tau_c}{\partial P_k} \Delta P_k(t) + \varepsilon, \quad (3)$$

где  $\tau_0$  — измеренное значение задержки,  $\Delta P_k$  — вариации параметров функции  $F$  ( $k$  изменяется от 1 до полного числа параметров),  $\varepsilon$  — шумовая составляющая погрешности.

Записывая (3) для ряда последовательных моментов времени, получим:

$$\vec{l}_c = A\vec{x} + \vec{\varepsilon}, \quad (4)$$

где:  $\vec{l}_c$  — столбец левых частей (3), взятых на моменты измерений;  $\vec{x}$  — вектор из вариаций параметров;  $A$  — матрица, составленная из производных от расчётной задержки по параметрам;  $\vec{\varepsilon}$  — столбец из значений шумовой составляющей, взятых на моменты времени измерений.

Параметры, входящие в уравнения, имеют разную физическую природу и должны оцениваться отдельно. Это:

— «глобальные» параметры (постоянные или почти постоянные на протяжении всего цикла наблюдений): координаты источников, телескопов, числа Лява, постоянные прецессии и др.;

— «локальные» параметры (средние значения на протяжении сеанса наблюдений): ПВЗ;

— стохастические: параметры тропосферной задержки, ход часов.

Для отдельного сеанса систему можно записать в двухгрупповом виде относительно локальных ( $x_1$ ) и стохастических параметров ( $x_2$ ):

$$\vec{l}_c = A\vec{x} + \vec{\varepsilon} \rightarrow \vec{l}_c = A\dot{x}_1 + A\dot{x}_2 + \vec{\varepsilon}$$

$$\tilde{x} = (A'PA)^{-1}A'P\vec{l}_c \rightarrow \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & H \\ H' & G \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \vec{l}_1 \\ \vec{l}_2 \end{bmatrix}$$

$$(F - HG^{-1}H')\tilde{x}_1 = \vec{l}_1 - HG^{-1}\vec{l}_2 \text{ или } \tilde{A}\tilde{x}_1 = \tilde{l}, \quad (5)$$

где  $\tilde{x}$ ,  $\tilde{x}_1$ ,  $\tilde{x}_2$  — МНК-оценки величин  $x$ ,  $x_1$  и  $x_2$  (МНК — метод наименьших квадратов);  $P$  — матрица весов;  $\vec{l}_1$ ,  $\vec{l}_2$  — части столбца  $A'P\vec{l}_c$ , соответствующие  $\tilde{x}_1$ ,  $\tilde{x}_2$ ;  $F$ ,  $G$ ,  $H$  — блоки матрицы нормальных уравнений  $A'PA$ ; штрих означает транспонирование матрицы, а степень  $(-1)$  означает вычисление обратной матрицы от подстепенного матричного выражения.

Для оперативной обработки каждый сеанс обрабатывается независимо от других. При этом для суточного сеанса определяются: ПВЗ, ход часов, тропосферные поправки (поправки к координатам источников, ....). Сеанс разбивается на сегменты, в каждом из них ход часов,

тропосферные поправки представляются полиномами. Матрица имеет размер: 1000 – 20000 уравнений, 200 – 500 неизвестных.

Для часового сеанса (Intensive) определяются: UT1, ход часов, тропосферные поправки. Матрица имеет размер: 20 – 200 уравнений, 10 – 15 неизвестных.

Решение осуществляется с помощью метода МНК с ограничениями.

### **Проблемы обработки и их решение**

В процессе обработки пришлось решить ряд проблем. Рассмотрим некоторые из них.

Первая — это отсутствие метеоданных для одной (нескольких) станций РСДБ. Если вообще исключить эту станцию из обработки, то решение либо имеет пониженную точность (т. к. вклад тропосферы во «влажную» задержку составляет в расстоянии от 15–20 см в зените до нескольких метров вблизи горизонта), либо вообще не получается (поскольку выброшенная станция часто бывает одной из двух станций, на которых проводились измерения).

Для решения этой проблемы были разработаны модель и программа, которые на основе глобальных полей давления, температуры и влажности, публикуемых с шагом в 6 часов на сайте <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> позволяют (после уравнивания всей системы и определения поправок) оценить вклад тропосферы с ошибкой ~1 см (т. е. при длине базы 5000 км, позиционная ошибка ~0.4 мс дуги).

Второй часто встречающейся проблемой является наличие неустраняемых в неинтерактивном режиме скачков хода часов. Для их устранения в программном пакете предусмотрен интерактивный режим, в котором оператор может устранить скачок вручную.

### **Комбинированное решение**

При комбинированной обработке выбранные сеансы измерений обрабатываются совместно. Определяются:

- глобальные параметры: поправки к координатам источников, телескопов;
- локальные параметры: ПВЗ;
- стохастические параметры (ход часов, тропосферные поправки и др.) уже исключены.

Если  $m$  — число уравнений,  $n$  — число неизвестных параметров ( $m > n$ ), то ранг матрицы  $A(m \times n)$  неполный (т. е.  $\text{rank } A < n$ ). Поэтому

необходимо наложить дополнительные условия. Одним из таких условий является NNR, которое заключается в требовании определения таких поправок к координатам  $\Delta\vec{R}_i$  опорных телескопов, что при их применении отсутствует глобальное вращение сети этих телескопов относительно Земной системы координат:

$$\sum_{i=1}^L \frac{\vec{R}_i \times \Delta\vec{R}_i}{|\vec{R}_i|^2} = 0. \quad (6)$$

Если требуется вычислять поправки  $\Delta\vec{R}_i$  для каждого сеанса, то используется условие NNR (6) для опорных телескопов, а если нет — предполагается, что координаты и скорости всех телескопов известны точно. В последнем случае погрешности в координатах и скоростях телескопов проявятся в виде погрешности в ПВЗ.

### Результаты вычислений

Было проведено сравнение ПВЗ, полученных в результате обработки с помощью программного пакета «Ариадна» результатов выполненных в 2016 году РСДБ-наблюдений, и ПВЗ, вычисленных ведущими международными центрами обработки и анализа данных (ИПА РАН, Национальным агентством по геодезии и картографии Германии (BKG) и Военно-морской обсерваторией США (USNO)). Статистические характеристики разностей значений UT1 для сессий Intensive приведены в табл. 2. Видно, что результаты определения ПВЗ с помощью программного пакета «Ариадна» находятся на международном уровне.

Таблица 2

Статистические характеристики разностей UT1 для сессий Intensive

Центр, с которым проводилось сравнение	Среднее значение разности, мкс	СКО разности, мкс
ИПА РАН	-3	29
BKG	0	20
USNO	1	22

### Заключение

Основные результаты проведенных работ:

- разработана и внедрена новая версия пакета обработки РСДБ-наблюдений «Ариадна»;
- получены ряды параметров вращения Земли (решения для интенсивных и 24-ч сеансов);

— разработан алгоритм комбинированного решения нескольких сеансов наблюдений на РСДБ с использованием SINEX-файлов.

### **Литература**

1. *Жаров В. Е.* Основы радиоастрометрии. — М.: Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011. — С. 208–224.

2. IERS Conventions (2010) / G. Petit and B. Luzum (eds.) Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie Frankfurt am Main 2010.

3. *Жаров В. Е., Синёв А. Н., Пасынок С. Л.* Оперативная обработка сеансов РСДБ измерений: проблемы и решения // «Метрология времени и пространства. Материалы VIII Международного симпозиума», Сборник тезисов докладов, ISBN 978-5-903232-63-5, 14–16 сентября 2016 г., СПб. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016. — С. 197–199.

## **Evaluation of the Earth Orientation Parameters with the ARIADNA Software**

**V. E. Zharov, S. L. Pasynok, A. N. Sinev**

The new version of the VLBI software ARIADNA is used for the intensive and daily VLBI session processing for the EOP evaluation in VNIIFTRI. This version allows to increase accuracy of one session solution and to combine several sessions. The results of the ARIADNA software processing for the EOP evaluation in VNIIFTRI are considered in the present paper.

**Keywords:** Earth's orientation parameters, UT1-UTC, combination, EOP service, VLBI.



## Предвычисление столкновений небесных тел с Луной и мест их падения

© Н. Б. Железнов, О. М. Кочетова,  
Ю. А. Чернетенко, В. А. Шор

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Описана методика предсказания сближений и столкновений астероидов и комет с Луной. Предвычисление мест падений выполняется в селенографической системе координат, в которой обычно даются координаты различных образований на лунной поверхности. Если номинальная орбита тела проходит мимо Луны, но вероятность столкновения достаточно велика, вычисляются условия наблюдения вероятного падения в одной из точек определенной полосы (полосы риска) на поверхности Луны. Полоса риска строится путем варьирования среднего движения объекта и нахождения вариаций, ведущих к столкновениям. Построен пример гелиоцентрической орбиты с неопределенностью среднего движения в некотором диапазоне, которая приводит к столкновениям с Луной в точках некоторой полосы риска.

**Ключевые слова:** астероиды, кометы, орбиты, столкновения с Луной, астероидно-кометная опасность

### Введение

Равнинные участки лунной поверхности, покрытые множеством кратеров ударного происхождения, являются естественными регистраторами потока космических тел в районе земной орбиты в течение последних 3.5 миллиардов лет. Наблюдения за падениями тел на Луну могут дать дополнительный материал для масштабирования важного соотношения между размерами/энергией падающих на Луну тел и диаметрами образующихся кратеров. Методика предсказания сближений и столкновений астероидов и комет с Луной близка к соответствующей методике для Земли [1, 2], хотя в случае Луны приходится учитывать значительно большие по величине возмущения лунной

орбиты. Более существенные отличия возникают в процессе предсказания мест падений. Их естественно указывать в селенографической системе координат, в которой обычно даются координаты различных образований на лунной поверхности [3, 4]. Определяются Всемирное время события, селенографические долгота и широта точки падения, а также угол наклона вектора скорости к плоскости горизонта, азимут направления проекции скорости на эту плоскость в точке падения и величина луноцентрической скорости. Так как линейная скорость точки лунной поверхности во вращательном движении вокруг оси не превышает нескольких метров в секунду, можно считать, что скорость тела относительно точки поверхности Луны совпадает со скоростью относительно центра Луны. Для проверки найденных координат точки падения и параметров относительной траектории выполняется решение обратной задачи: по найденным параметрам траектории падения определяется гелиоцентрическая орбита тела, которая с точностью до погрешности вычислений должна воспроизводить исходную орбиту.

Номинальная орбита тела может проходить мимо Луны, но, если вероятность столкновения достаточно велика, имеет смысл вычислить условия наблюдения вероятного падения тела в одной из точек, расположенных вдоль определенной полосы (полосы риска) на поверхности Луны (чем тело больше, тем при меньшей вероятности столкновения целесообразно делать предсказание). Полоса риска строится путем варьирования номинального значения среднего движения тела в пределах его вероятных ошибок и нахождения вариаций, которые ведут к столкновениям тела с Луной.

Ниже приведен пример построения полосы риска на поверхности Луны в случае прохождения номинальной орбиты некоторого тела мимо Луны.

### **Алгоритмы решения прямой и обратной задачи столкновения тела с Луной**

Рассмотрим прямоугольную систему координат  $XYZ$  с началом в центре масс Луны и вращающуюся вокруг оси  $Z$ , перпендикулярной к среднему экватору Луны. Ее положение относительно прямоугольной эклиптической системы координат описывается тремя законами Кассини (так называемая первая средняя «кассиниева» система координат, детальное описание которой приведено в [3, 4]). Углы Эйлера, определяющие положение системы  $XYZ$  относительно эклиптической