

ЗАВИСИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЕРАТИВНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ UT1 НА РСДБ-СЕТИ "КВАЗАР" ОТ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ МОДЕЛИ НУТАЦИИ

Малкин З.М.^{1,2}, Скурихина Е.А.³

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Астрономический институт им. В.В.Соболева СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

³Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Для оперативного определения всемирного времени (UT1) проводятся 1-часовые сессии РСДБ-наблюдений на двух или трех станциях. Такие наблюдения ведутся в рамках нескольких международных программ, а также в России на РСДБ-комплексе "Квазар-КВО" для отечественных потребителей и для координатно-временной поддержки системы "ГЛОНАСС". Из-за ограниченной геометрии сети и малой продолжительности сессий из этих наблюдений невозможно получить все параметры вращения Земли. Определяется только UT1, а координаты полюса и модель нутации принимаются по другим данным. Поэтому получаемые значения UT1 существенно зависят, в частности, от принятой модели нутации. Поскольку недостаточная точность существующей официальной модели прецессии-нутации МАС ограничивает точность UT1, на практике применяются различные дополнительные эмпирические модели поправок к теории (CPO, Celestial Pole Offset). Как было показано ранее [5], применение разных моделей CPO может приводить к систематическим различиям в UT1. Это влияние зависит от длины и расположения базы. Настоящая работа посвящена исследованию влияния принятой модели CPO на результаты оперативных определений UT1 на РСДБ-комплексе "Квазар-КВО". В результате тестовой обработки 192 часовых сессий на базе Зеленчукская-Бадары с тремя моделями CPO были найдены небольшие систематические различия в UT1 в виде тренда и сезонных вариаций на уровне 1–3 микросекунд. Случайная ошибка определения UT1 практически не зависит от применяемой модели CPO.

Введение

Метод радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами является основным современным методом определения всемирного времени (UT1). Наиболее точные значения UT1 получаются при определении всемирного времени совместно с другими параметрами вращения Земли (ПВЗ): координатами полюса Земли и поправками к углам нутации, из 24-часовых серий наблюдений на глобальных сетях станций (в настоящее время, как правило, 7–9). К сожалению, результаты этих наблюдений бывают обычно доступны с задержкой 8–15 дней, включая время почтовой доставки данных наблюдений на коррелятор и время корреляции. Это неприемлемо для некоторых практических приложений, в первую очередь обеспечения работы глобальных спутниковых навигационных систем.

Для сокращения времени получения данных о всемирном времени организуются специальные короткие 1-часовые сессии РСДБ-наблюдений на двух-трех станциях, время обработки которых составляет до нескольких часов. Такое короткое время достигается, в основном, за счет передачи данных наблюдений со станций на коррелятор по высокоскоростным линиям передачи данных. Однако из-за ограниченной геометрии сети станций и короткого времени наблюдений из таких наблюдений нельзя определить все ПВЗ. Поэтому координаты полюса и углы прецессии-нутации должны быть известны априори по другим данным.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния априорной модели нутации на результаты определения всемирного времени из коротких серий наблюдений. Поскольку точность существующей модели прецессии-нутации МАС недостаточна, на практике применяются эмпирические поправки к теории (CPO, Celestial Pole Offset).

Как было показано ранее [5], для международных программ оперативного определения UT1 применение разных моделей СРО приводит к заметным систематическим различиям в результатах. Это различие зависит от длины и расположения базы и может достигать в наиболее неблагоприятных случаях до 10 мкс. Настоящая работа посвящена изучению влияния модели СРО на результаты определений UT1 на РСДБ-комплексе "Квazar-КВО" из коротких серий наблюдений.

Модели СРО

В настоящее время нет устоявшегося стандарта в отношении единой модели СРО. Разные источники рекомендуют разные модели, и, соответственно, разные модели используются в разных центрах обработки РСДБ-наблюдений для оперативных определений UT1. Наиболее полный обзор этих моделей приведен в [6].

Как отмечалось выше, наиболее точные данные СРО получаются из 24-часовых серий РСДБ-наблюдений. К сожалению, эти данные не могут быть непосредственно использованы при обработке наблюдений по программе оперативных определений UT1, поскольку они получаются с большой задержкой, т.е. просто недоступны на момент оперативных вычислений. Поэтому при оперативных определениях приходится, фактически, иметь дело с прогнозом.

Нами проведено сравнение трех моделей СРО, представляющих наибольший практический интерес: модель ИПА РАН, используемая в настоящее время при обработке наблюдений на РСДБ-комплексе "Квazar-КВО", модель Морской обсерватории США (USNO), которая является официальной моделью Международной службы вращения Земли и опорных систем координат (IERS) для оперативных приложений, и модель ZM2, которая вычисляется в ГАО РАН и по некоторым параметрам может иметь преимущество перед остальными моделями [5,6]. В сравнении не использована модель Ламбера (Парижская обсерватория), рекомендованная IERS Conventions (2010) [7]. Она имеет существенные систематические отличия от остальных, поскольку моделирует только часть истинных поправок СРО, связанную со свободной нутацией ядра Земли (FCN). Поэтому ее применение приводит к неудовлетворительным результатам [5].

Эти модели (ряды) СРО различаются как в методах их построения, так и в методах прогноза. Во-первых, 24-часовые РСДБ-наблюдения обрабатываются в нескольких центрах обработки данных, в каждом из которых получается, соответственно, свой ряд СРО. Эти ряды можно назвать исходным для дальнейшей процедуры построения окончательной модели СРО. Все перечисленные модели основаны на комбинации исходных рядов. Но они отличаются как составом используемых исходных рядов, так и методом построения сводного (комбинированного) ряда. Во-вторых, поскольку значения СРО из 24-часовых серий наблюдений получаются, в среднем, около трех раз в неделю и на моменты середины сессий, их необходимо приводить к началу каждого суток, что является стандартом для сводных рядов ПВЗ. При этом в разных центрах используются разные методы интерполяции исходных данных СРО. Методы прогноза рядов СРО, используемые в разных центрах, также различаются. Все эти различия приводят к тому, что различные ряды (модели) СРО существенно различаются в систематическом отношении, в уровне шумовой составляющей и в точности прогноза.

Краткая характеристика использованных нами моделей СРО следующая:

1. Модель USNO, доступна на <http://maia.usno.navy.mil/>. Построена на основе комбинации четырех избранных рядов СРО методом построения сглаживающего сплайна. Прогноз производится методом комбинации наблюдаемых данных с одной из стандартных моделей прецессии-нутации.

2. Модель ИПА РАН. Ряд СРО состоит из трех частей. Основная часть ряда копирует ряд IERS C04, который заканчивается за месяц до текущей даты. Ряд IERS C04

вычисляется в Парижской обсерватории на основе комбинации большинства доступных исходных рядов СРО. Приведение на начало суток производится путем интерполяции. Значения СРО за последний месяц берутся из ряда USNO. Последнюю часть ряда составляет прогноз, вычисляемый в ИПА РАН методом авторегрессии.

3. Модель ГАО РАН ZM2 [1], доступна на <http://www.gao.spb.ru/english/as/persac/>. Вычисляется путем гауссовой процедуры сглаживания-интерполяции комбинированного ряда ПВЗ Международной службы РСДБ для геодезии и астрометрии (IVS), <http://vlbi.geod.uni-bonn.de/IVS-AC/>. Прогноз вычисляется методом авторегрессии.

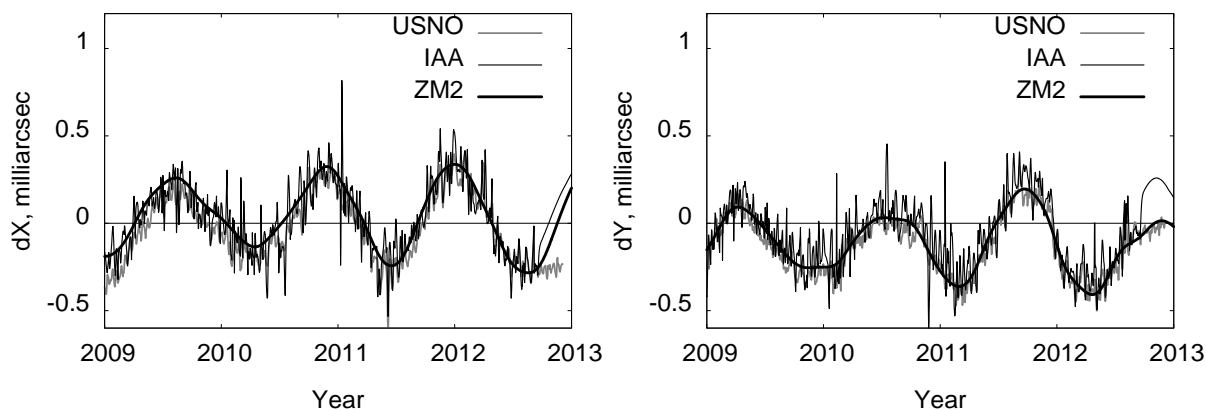


Рис. 1. Сравнение трех моделей СРО. После эпохи 2012.7 – прогнозные данные.

Три ряда СРО, описанные выше, приведены на рис. 1 для периода наблюдений, использованного в настоящей работе (см. следующий раздел). На графиках можно ясно видеть основные различия между моделями. Во-первых, заметны систематические сдвиги, например между ZM2 и USNO для dX или между ИПА(C04) и ZM2 для dY. Также эти ряды имеют разный уровень шума – ряд ZM2 является наиболее гладким, а ряд ИПА(C04) наиболее шумным. Конец каждого ряда после эпохи 2012.7 представляет собой прогноз, также существенно разный для трех сравниваемых рядов. Последнее различие особенно важно для оперативных определений UT1, для которого доступен только прогноз СРО. Более детальное описание и сравнение этих и других моделей СРО приведено в [6].

Результаты обработки наблюдений

Для оценки влияния выбора модели СРО были использованы наблюдения часовых серий на РСДБ-комплексе "Квазар-КВО" ИПА РАН по программе Ru-U [3] на базе Зеленчукская–Бадары с 27 февраля 2009 г. по 12 сентября 2012 г. До июля 2012 г. наблюдения производились в среднем раз в неделю, а затем ежедневно. Всего в обработку вошло 192 сессии.

База Зеленчукская–Бадары является самой длинной базой сети и имеет самую длинную экваториальную составляющую, что обеспечивает самую высокую точность оперативных определений UT1. Поэтому эта база используется как основная для таких наблюдений [4]. За указанный период также было наблюденно 9 сессий на базе Светлое–Зеленчукская, 37 сессий на базе Светлое–Бадары (из них 21 в июне–июле 2012 г.) и 3 сессии на всех трех станциях сети Светлое–Зеленчукская–Бадары. Однако количество и распределение по времени этих наблюдений не позволяет провести их надежное статистическое исследование и сравнение с результатами, полученными на основной базе. Поэтому в данной работе они не используются.

Обработка наблюдений производилась с программным пакетом OCCAM/GROSS [2] с применением редукций, рекомендованных IERS Conventions (2010) [7]. По каждой сессии вычислены значения UT1 с тремя моделями СРО, описанными выше. Все остальные режимы обработки были одинаковыми во всех трех случаях. Далее был проведен статистический анализ трех полученных рядов UT1 в отношении их случайных и систематических ошибок.

Разности между тремя рядами UT1, полученными с тремя моделями СРО, приведены на рис. 2. Их сравнение показывает небольшие систематические изменения, отражающие, предположительно, систематические разности между моделями СРО, на фоне довольно больших случайных вариаций, коррелирующих с шумовой составляющей моделей СРО – использование более "шумных" моделей СРО приводит к большему шуму разностей рядов UT1.

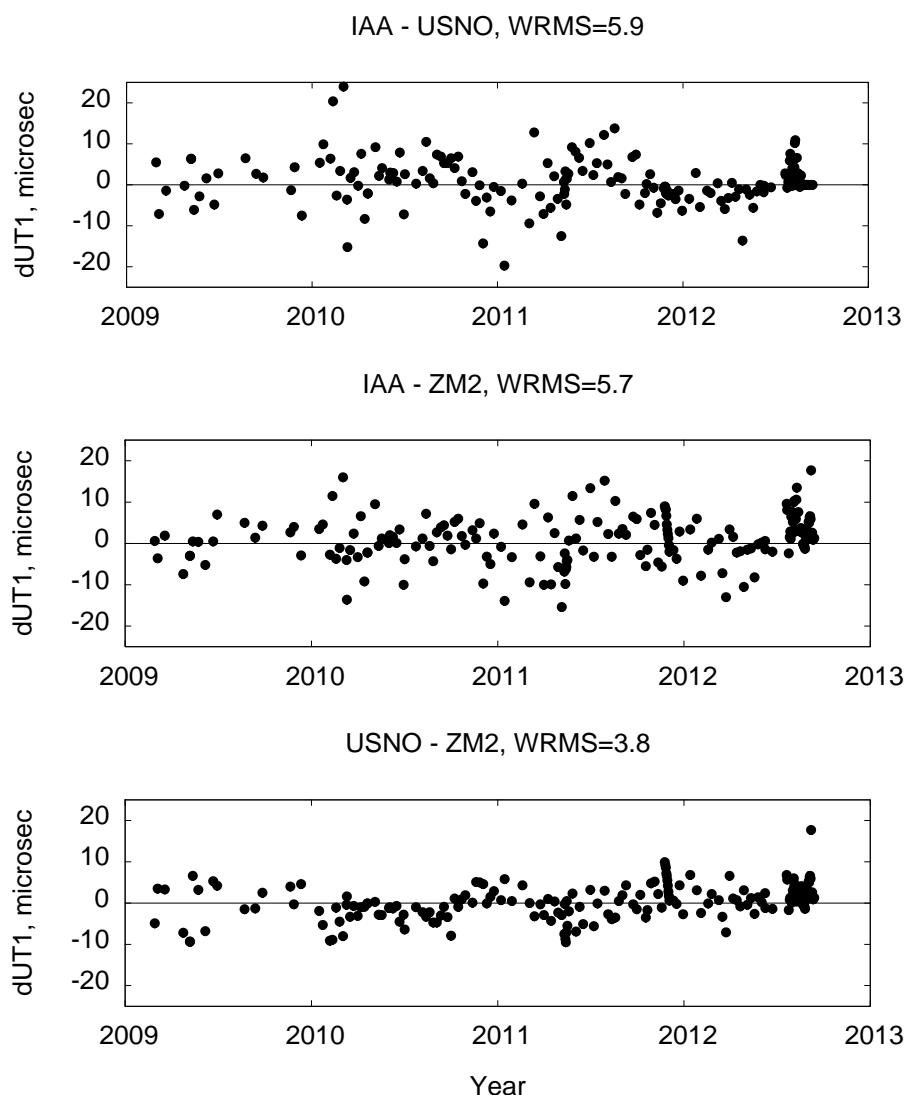


Рис. 2. Разности рядов UT1, полученные с тремя моделями СРО. В заголовках приведены среднеквадратические значения разностей в мкс.

Для получения более определенных результатов было проведено два вида сравнения: анализ разностей трех вычисленных нами рядов UT1 с рядами UT1 IERS, вычисляемыми в Парижской обсерватории (ряд С04) и Морской обсерватории США (ряд USNO) и анализ разностей между нашими тремя рядами.

В первом случае в разностях между тестовыми рядами UT1 и рядами IERS выделялись линейный тренд, а также годовая и полугодовая гармоника. Кроме того вычислялись среднеквадратические разности после исключения этих систематических членов, которые можно рассматривать, как внешние случайные ошибки определения UT1. Результаты приведены в табл. 1 вместе с медианными формальными (внутренними) ошибками определения UT1.

Данные табл. 1 показывают, что как внутренняя, так и внешняя случайная ошибка определения UT1 мало зависят от используемой модели СРО. В то же время обнаруживаются небольшие систематические различия между рядами. Этот вывод подтверждается более точными данными табл. 2, где приведены систематические различия между сериями: линейный тренд и сезонные члены.

Таблица 1. Разности между тестовыми рядами UT1 и рядами IERS: линейный тренд $b+ct$, амплитуда годового (a) и полугодового (sa) членов и среднеквадратические уклонения после удаления систематической части (WRMS), а также медианные формальные ошибки тестовых рядов UT1 (m).

Модель	C04					USNO					m , мкс
	b , мкс	c , мкс/год	a , мкс	sa , мкс	WRMS, мкс	b , мкс	c , мкс/год	a , мкс	sa , мкс	WRMS, мкс	
ИПА	51.8 ±4.0	8.1 ±4.1	15.9 ±5.7	14.0 ±6.0	48.7	55.0 ±3.8	6.1 ±3.9	16.8 ±5.4	12.7 ±5.6	46.2	28.9
USNO	52.7 ±4.0	6.6 ±4.1	13.4 ±5.7	14.6 ±5.9	48.6	56.0 ±3.8	4.5 ±3.9	14.6 ±5.3	13.3 ±5.5	45.7	28.9
ZM2	52.2 ±4.0	8.0 ±4.1	13.1 ±5.6	14.5 ±5.9	48.5	55.4 ±3.8	5.9 ±3.9	14.1 ±5.3	13.1 ±5.6	45.7	28.8

Таблица 2. Систематические разности между тестовыми рядами UT1.

Разность моделей	Сдвиг, мкс	Тренд, мкс/год	Годовой член, мкс	Полугодовой член, мкс
ИПА – USNO	1.0±0.4	-1.7±0.4	3.1±0.6	1.4±0.5
ИПА – ZM2	0.5±0.4	-0.2±0.4	2.7±0.6	1.1±0.5
USNO – ZM2	-0.5±0.3	1.4±0.3	2.1±0.4	0.3±0.3

Заключение

В работе проведено сравнение результатов определения UT1 из часовых сессий наблюдений на базе Зеленчукская-Бадары РСДБ-комплексе "Квазар-КВО" ИПА РАН, полученных с использованием трех моделей СРО. Анализ трех серий UT1, полученных с этими моделями, показал наличие между ними небольших систематических разностей – линейного тренда и сезонных составляющих, с амплитудой 1–3 мкс. Случайная ошибка определения UT1 практически не зависит от используемой модели СРО.

Литература

1. Малкин З.М. Эмпирические модели свободной нутации земного ядра. Астрон. вестник, 2007, т. 41, № 6, 531–536.
2. Малкин З.М., Скурихина Е.А. Пакет OCCAM/GROSS для обработки РСДБ-наблюдений в службе ПВЗ ИПА РАН. Тр. ИПА РАН, 2005, вып. 12, 54–67.

3. *Финкельштейн А.М., Ипатов А.В., Скурихина Е.А., Суркис И.Ф., Смоленцев С.Г., Федотов Л.В.* Геодинамические наблюдения на РСДБ-сети "Квазар-КВО" в 2009–2011 гг. Письма в Астрон. журн., 2012, т. 38, № 6, 446–451.
4. *Финкельштейн А.М., Кайдановский М.Н., Сальников А.И., Михайлов А.Г., Безруков И.А., Скурихина Е.А., Суркис И.Ф.* Оперативное определение поправок всемирного времени в режиме e-РСДБ Письма в Астрон. журн., 2011, т. 37, № 6, 470–479.
5. *Malkin Z.* The impact of celestial pole offset modelling on VLBI UT1 intensive results. J. of Geodesy, 2011, v. 85, No. 9, 617–622.
6. *Malkin Z.M.* Comparison of CPO and FCN empirical models. In: Proc. Journées 2010, Paris, France, 20-22 Sep 2010, ed. N. Capitaine, Paris, 2011, 172–175
7. *Petit G., Luzum B.* (Eds) IERS Conventions (2010), IERS Technical Note No. 36, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2010.

DEPENDENCE OF THE RAPID UT1 RESULTS OBTAINED FROM THE VLBI NETWORK "QUASAR" ON NUTATION MODEL

Malkin Z.M.^{1,2}, Skurikhina E.A.³

¹*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, St. Petersburg, Russia*

²*Sobolev Astronomical Institute, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

³*Institute of Applied Astronomy of RAS, St. Petersburg, Russia*

Intensive VLBI sessions at a single baseline are observed for rapid determinations of Universal Time (UT1) in the framework of several international programs. A similar program is conducted on the Russian VLBI network "Quasar" operated by the Institute of Applied Astronomy RAS in interest of GLONASS and other domestic users. These sessions do not allow us to obtain all the Earth orientation parameters with reasonable accuracy, and only UT1 can be effectively estimated. For this reason, reliable terrestrial and celestial pole coordinates are needed for data processing of the Intensives. Hence the UT1 estimates obtained from these observations heavily depend, in particular, on the model of the celestial pole motion used during data processing. However, even the most accurate precession-nutation model, IAU 2000/2006, is not accurate enough to realize the full potential of VLBI observations. To achieve the highest possible accuracy in UT1 estimates, a celestial pole offset (CPO), which is the difference between the actual and modeled precession-nutation angles, should be applied. In this paper, these models have been tested and the differences between UT1 estimates obtained with those models are investigated. It has been shown earlier that using different CPO models can cause the differences in UT1 estimates reaching 10 μ s, depending on the baseline length and orientation. In this paper we investigated the impact of different CPO modelling on the UT1 results obtained from the 1-hour sessions on the baseline Zelenchukskaya–Badary of the "Quasar" VLBI network. We processed observations of 192 sessions with three CPO models. In result, it was found that the systematic differences between the UT1 estimates computed with different models (trend and seasonal terms) are at a level of 1–3 μ s. On the other hand, the formal error of the UT1 estimates practically does not depend on the CPO model used.