

Построение ряда всемирного времени из комбинирования результатов обработки часовых сессий РСДБ-наблюдений по программе IVS Intensive

© С. М. Миронова, С. Л. Курдубов, И. С. Гаязов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В работе построен комбинированный ряд оценок всемирного времени с использованием результатов обработки часовых сеансов РСДБ-наблюдений по программе IVS Intensive за 2015–2020 гг. Для построения комбинированного ряда были собраны результаты обработки РСДБ наблюдений в формате SINEX файлов, полученные различными центрами анализа. Ряд SINEX файлов центра анализа ИПА РАН был получен с помощью программы QUASAR. SINEX файлы различных центров анализа были скомбинированы с использованием программы SINCOM на уровне нормальных уравнений. Выполнено сравнение комбинированного ряда всемирного времени и рядов рассматриваемых центров анализа (индивидуальных рядов) с эталонными рядами Международной службы вращения Земли и систем отсчета (IERS). В качестве эталонных реализаций использовались долгосрочный ряд C04 IERS, и оперативный ряд «finals», создаваемый срочной службой IERS в центре анализа USNO. На рассматриваемом интервале комбинированный ряд хорошо согласуется с опорными рядами C04 и «finals»: среднеквадратические отклонения от опорных рядов C04 и «finals» равны 23 и 19 мкс соответственно.

Ключевые слова: параметры вращения Земли, всемирное время, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, центры анализа.

Контакты для связи: Миронова Светлана Михайловна (miroнова@iaaras.ru).

Для цитирования: Миронова С. М., Курдубов С. Л., Гаязов И. С. Построение ряда всемирного времени из комбинирования результатов обработки часовых сессий РСДБ-наблюдений по программе IVS Intensive // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 58. С. 51–56.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.58.51-56>

Building a Series of UT1-UTC from Combining the Results of Processing Hourly VLBI Sessions on the IVS Intensive Program

S. M. Mironova, S. L. Kurdubov, I. S. Gayazov

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

In this paper a combined UT1 series for hourly VLBI sessions of the IVS Intensive program for 2015–2020 years was constructed. To construct the combined series, the results of the VLBI processing of observations in the SINEX file format, obtained by various analysis centers, were collected. A number of SINEX files of the IAA RAS Analysis Center were obtained by the QUASAR software. SINEX files of BKG, GSFC, IAA RAS, USNO analysis centers were combined by the SINCOM software at the level of normal equations, and the combined UT1 series and the series of the considered analysis centers (individual series) were compared with the reference series. As reference implementations of the UT1 series, the long-term C04 series created by the IERS center and the operational “finals” series created by the USNO center were used. In the considered interval, the combined series is consistent with the individual series and with the reference series C04 and “finals”. The standard deviation between the combined series and the reference series C04 and “finals” in the interval from 2015 to 2020 years is 23 and 19 microseconds, respectively.

Keywords: Earth rotation parameters, universal time, Very Long Baseline Interferometry, analysis centers.

Contacts: Svetlana M. Mironova (miroнова@iaaras.ru).

For citation: Mironova S. M., Kurdubov S. L., Gayazov I. S. Building a series of UT1-UTC from combining the results of processing hourly VLBI sessions on the IVS intensive program // Transactions of IAA RAS. 2021. Vol. 58. P. 51–56.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.58.51-56>

Введение

ПВЗ, связывающие между собой земную и небесную системы отсчета, определяются из наблюдений различных средств космической геодезии: РСДБ, ГНСС, лазерная локация спутников

и доплеровская система DORIS. Если координаты земного полюса определяются по наблюдениям всех указанных средств, то координаты небесного полюса и всемирное время могут быть определены только по РСДБ-наблюдениям. Всемирное время

UT1 определяется в виде разности UT1–UTC (UTC — равномерная шкала всемирного координированного времени) из обработки часовых и суточных сессий РСДБ-наблюдений. Суточные сессии РСДБ-наблюдений позволяют определять все ПВЗ одновременно (Nothnagel, 2017). Однако они проводятся только несколько раз в неделю и результаты их обработки появляются со значительной (более 5 сут) задержкой. Для получения ежедневных оценок всемирного времени проводятся специальные часовые сеансы РСДБ-наблюдений, данные которых передаются по каналам связи с высокой пропускной способностью и обрабатываются с высокой оперативностью. Задержка в получении результатов по таким сессиям может составлять считанные часы. Все это позволяет проводить такие сессии несколько раз в сутки, как, например, в рамках специальной программы наблюдений РСДБ-комплекса «Квazar-КВО», когда радиотелескопами РТ-13 проводятся до 8 часовых сеансов за сутки.

В рамках международной программы IVS–Intensive часовые сессии наблюдений на одной базе выполняются ежедневно. Результаты обработки наблюдений этих сессий используются IERS при выводе рядов срочной службы ПВЗ, а также при получении окончательных (эталонных) рядов ПВЗ, формируемых путем комбинирования результатов обработки в различных центрах анализа.

Комбинирование может осуществляться двумя способами: непосредственное комбинирование индивидуальных рядов или комбинирование систем нормальных уравнений с последующим решением общей системы. Непосредственное комбинирование заключается в усреднении с весами рядов UT1, полученных различными центрами анализа (каждому центру присваивается свой вес в зависимости от репрезентативности его индивидуального ряда). При комбинировании систем нормальных уравнений создается общая по всем центрам система нормальных уравнений, решая которую, можно получить поправку к априорному значению UT1. Этот способ комбинирования основывается на технологии SINEX-файлов (Thaller, 2008), рекомендованной IERS (Bizouard, 2019). Центры анализа записывают в SINEX-файлы наряду с результатами уточнения тех или иных параметров матрицы нормальных уравнений (или ковариационные матрицы), а также ряд других вспомогательных данных, использованных при обработке наблюдений.

Парижская обсерватория (OPAR) и Морская обсерватория США (USNO), являющиеся центрами комбинирования IERS, на основе рядов UT1 различных центров анализа строят комбинированные ряды, которые имеют статус эталонных: C04 (создается на основе комбинирования долго-

срочных данных UT1) и «finals» (на основе оперативных с последующим уточнением по долгосрочным данным) (Bizouard, 2019).

Использованные для комбинирования результаты центров анализа

Для комбинирования в данной работе использовались результаты обработки часовых сессий РСДБ-наблюдений по международной программе IVS–Intensive на интервале 2015–2020 гг. в четырех центрах анализа: BKG (Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie), GSFC (Goddard Space Flight Center), IAA (ИПА РАН) и USNO (US Naval Observatory). Результаты центров анализа BKG, GSFC и USNO, представленные в стандартном SINEX-формате, были взяты с сайта IVS. В центре анализа ИПА РАН соответствующий ряд SINEX-файлов был получен с использованием программного пакета QUASAR (Губанов, 2007), в то время как в других центрах анализа использовалась одна и та же программа Calc/Solve.

Особенности обработки часовых сессий наблюдений в различных центрах анализа, включая использованные каталоги и модели океанической нагрузки, приведены в табл. 1. В строке НСК указаны использованные каталоги радиоисточников, задающие небесную систему координат, в строке ЗСК — каталоги координат станций, задающие земную систему координат на указанную эпоху. Способ обработки в ИПА РАН отличается от используемых в остальных центрах также тем, что перевзвешивание наблюдений радиоисточников не производилось, тогда как в других центрах такая методика применялась для радиоисточников, оказавшихся ниже 5° над горизонтом на момент наблюдения.

В последней строке табл. 1 приведены условные обозначения для двух наборов параметров, представленных в блоке уточненных параметров (SOLUTION/ESTIMATE) SINEX-файлов того или иного центра анализа. Набор параметров (1) включает координаты станций и координаты небесного полюса с их линейными трендами, всемирное время и длительность суток. Обозначение (2) указывает, что в SINEX-файл центра включено только всемирное время.

Из табл. 1 видно, что данные, используемые различными центрами анализа при обработке наблюдений, существенно отличаются. Тем не менее использование одного и того же пакета Calc/Solve тремя центрами анализа порождает закономерный вопрос о целесообразности комбинирования их рядов как независимых. Поэтому был проведен анализ взаимных корреляций рядов всемирного времени, полученных различными центрами. В табл. 2 представлены коэффициенты корреляции между пятилетними рядами всемир-

Таблица 1

Особенности обработки часовых РСДБ сессий IVS Intensive различными центрами анализа

Центр анализа	BKG	GSFC	IAA	USNO
Решение	bkg2014a	gsf2020a	—	usn2020b
Используемая программа	Calc/Solve	Calc/Solve	QUASAR	Calc/Solve
НСК	ICRF2	gsf2020a	ICRF2	usn2020b
ЗСК	VTRF2008a	gsf2020a	ITRF2014	usn2020b
Эпоха	2000	2014	2010	2014
Модель океанических нагрузок	TPXO.7.2	TPXO.7.2	GOT4.10	SPOTL software
Набор параметров	(1)	(2)	(1)	(1)

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между рядами всемирного времени различных центров анализа

Центр анализа	BKG	GSFC	USNO	IAA
BKG	—	0.41	0.54	0.39
GSFC	0.41	—	0.43	0.50
USNO	0.54	0.43	—	0.39
IAA	0.39	0.50	0.39	—

ного времени центров анализа BKG, GSFC, USNO, а также IAA. Попарная корреляция между центрами анализа BKG, GSFC, USNO меняется в пределах от 0.41 до 0.54. Корреляция этих рядов с рядом IAA примерно такая же, т. е. находится в пределах от 0.39 до 0.50. Таким образом, между рядами, полученными с помощью одного и того же пакета, нет значительной корреляции друг с другом, что, вероятно, связано с различиями в выборе априорных моделей и в настройках пакета, включая схему отбраковки данных. С учетом этого ряды центров BKG, GSFC, USNO комбинировались как независимые.

Комбинирование SINEX-файлов центров анализа

Для комбинирования результатов определения UT1 в названных выше центрах анализа был использован программный пакет SINCom, разработанный в ИПА РАН (Гаязов, 2012, Brattseva, 2014). Схема функционирования пакета при комбинировании результатов различных центров анализа, представленных в виде SINEX-файлов, сводится к следующему:

- анализ SINEX-файлов с проверкой соответствия стандарту SINEX;
- приведение к одной эпохе;

- приведение к одинаковым априорным данным;

- формирование общей системы нормальных уравнений с наложением необходимых ограничений;

- решение системы нормальных уравнений методом наименьших квадратов.

Эта же схема была применена при комбинировании результатов обработки часовых РСДБ-сессий по программе IVS Intensive на пятилетнем интервале четырьмя центрами анализа. В наблюдениях в целом участвовали 13 станций: KASHIM34, KOKEE, MK-VLBA, NYALDBBC, NYALES20, SESHAN25, SVETLOE, TSUKUB32, TSUKUB32, WETTDBBC, WETTVDIF, WETTZ13N, WETTZELL. Наибольшее количество задержек соответствует сессиям наблюдений, выполненным радиотелескопами на базе KOKEE – WETTZELL. SINEX-файлы, соответствующие этим сессиям, были скомбинированы отдельно наряду с SINEX-файлами для всех сессий.

Процесс комбинирования был разделен на два этапа. Первый этап заключался в приведении SINEX-файлов центров анализа BKG, GSFC, IAA и USNO к одинаковым априорным значениям ПВЗ и координат станций. Необходимость этого этапа связана с тем, что различные центры анализа используют различные каталоги координат

станций и различные априорные ПВЗ, и непосредственное комбинирование исходных SINEX-файлов было бы некорректным. В процессе приведения к общим априорным данным вектора нормальных систем в SINEX-файлах трансформируются следующим образом:

$$b_{\text{new}} = b_{\text{old}} - N(x_0 - \hat{x}_0),$$

где b_{new} — новый вектор правых частей, b_{old} — исходный вектор правых частей, N — матрица нормальной системы, x_0 — новый вектор априорных значений, общий для всех центров, \hat{x}_0 — исходный вектор априорных значений, использованный данным центром анализа. На этом этапе комбинирования важно, чтобы далее использовались одни и те же координаты телескопов, к которым будут относиться комбинированные значения ПВЗ. В работе использовались координаты из каталога ITRF2014, приведенные на момент времени данного SINEX-файла, а априорные ПВЗ брались из опорного ряда «finals». После приведения к одинаковым априорным значениям, параметры за исключением всемирного времени фиксируются. Результатом первого этапа являются новые SINEX-файлы, готовые для непосредственного комбинирования. На втором этапе происходил процесс комбинирования полученных SINEX-файлов для создания комбинированного ряда всемирного времени. При этом все параметры кроме UT1 были удалены из списка уточняемых.

Результаты комбинирования

В результате выполненного комбинирования были построены два ряда параметра UT1: на основе всех SINEX-файлов и SINEX-файлов, содержащих базу КОКЕЕ – WETTZELL. В табл. 3 приведе-

ны результаты сравнения индивидуальных рядов центров анализа BKG, GSFC, IAA, USNO (взятых из исходных SINEX-файлов) и комбинированного ряда comb, построенного по SINEX-файлам всех сессий, с рекомендованными рядами IERS C04 и «finals» (Гаязов, 2012). В табл. 4 представлены результаты аналогичного сравнения рядов, построенных по SINEX-файлам, содержащим наблюдения станций КОКЕЕ и WETTZELL. Средние разности между опорными и построенными рядами UT1 по величине не превосходят 12 мкс. Максимальное СКО, равное 27 мкс, достигается при сравнении индивидуальных рядов BKG и IAA, полученных по всем сессиям, с рядом C04. Из таблиц видно значительное расхождение между СКО, полученными при сравнении рядов (как индивидуальных, так и комбинированных), с рядами C04 и «finals». При сравнении комбинированного ряда, полученного по всем сессиям, соответствующие значения СКО равны 23 и 19 мкс. Для ряда, полученного комбинированием SINEX-файлов, сформированных только по наблюдениям станций КОКЕЕ и WETTZELL, СКО разностей с рядом «finals» уменьшилось до 17 мкс, тогда как СКО разностей с рядом C04 не изменилось. То, что построенный ряд значительно ближе к ряду «finals», чем к C04, объясняется, по-видимому, тем, что при формировании ряда «finals» срочной службой IERS результаты определения всемирного времени по сессиям IVS-Intensive используются с большим весом, чем в случае формирования ряда C04.

На рис. 1, 2 изображены разности между индивидуальными рядами центров BKG, GSFC, IAA, USNO, комбинированным рядом comb (по всем SINEX-файлам) и рекомендованными рядами C04 и «finals». Комбинированный ряд расположен в

Таблица 3

Сравнение рядов C04/finals с построенными программой SINCOM рядами UT1
(на основе всех SINEX-файлов)

Опорный ряд	Построенный ряд	Количество сессий	Средняя разность UT1, мкс	СКО UT1, мкс
C04	BKG	1131	-6	27
C04	GSFC	1131	12	23
C04	IAA	1131	2	27
C04	USNO	1131	-6	23
C04	comb	1131	1	23
finals	BKG	1106	-6	23
finals	GSFC	1106	12	19
finals	IAA	1106	2	23
finals	USNO	1106	-6	19
finals	comb	1106	1	19

Сравнение рядов C04/finals с построенными программой SINCOM рядами UT1
(на основе SINEX файлов, содержащих наблюдения станций КОКЕЕ и WETTZEЛL)

Опорный ряд	Построенный ряд	Количество сессий	Средняя разность UT1, мкс	СКО UT1, мкс
C04	BKG	842	-4	25
C04	GSFC	842	10	23
C04	IAA	842	0	24
C04	USNO	842	-5	23
C04	comb	842	0	23
finals	BKG	823	-3	21
finals	GSFC	823	11	18
finals	IAA	823	1	20
finals	USNO	823	-4	18
finals	comb	823	1	17

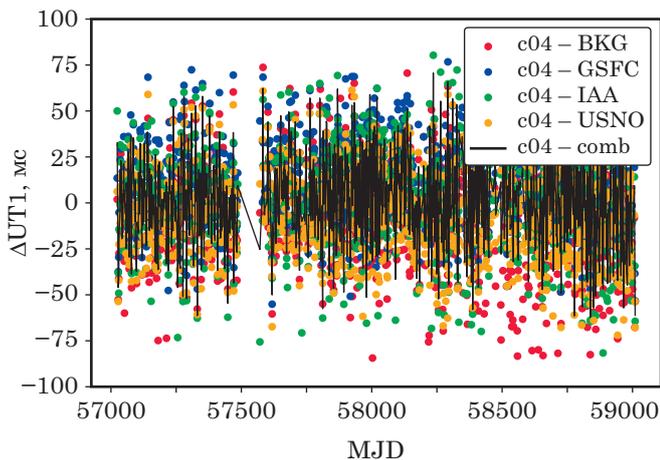


Рис. 1. Разности между рядом C04 и рядами UT1, построенными на основе всех SINEX файлов

среднем между индивидуальными рядами. Разброс разностей между индивидуальными и опорными рядами не превосходит 100 мкс, между комбинированными и опорными рядами не превосходит 80 мкс.

Заключение

Обработаны часовые сессии РСДБ-наблюдений на пятилетнем интервале (2015–2020 гг.) программой QUASAR. Проведено сравнение методик обработки часовых РСДБ-сессий различными центрами анализа. С использованием результатов четырех центров анализа, представленных в виде SINEX-файлов, построен комбинированный ряд UT1 на пятилетнем интервале. Полученный ряд лучше согласуется с рядом «finals» срочной службы IERS, чем с рядом C04. Среднеквадратическое отклонение комбинированного ряда от «finals»

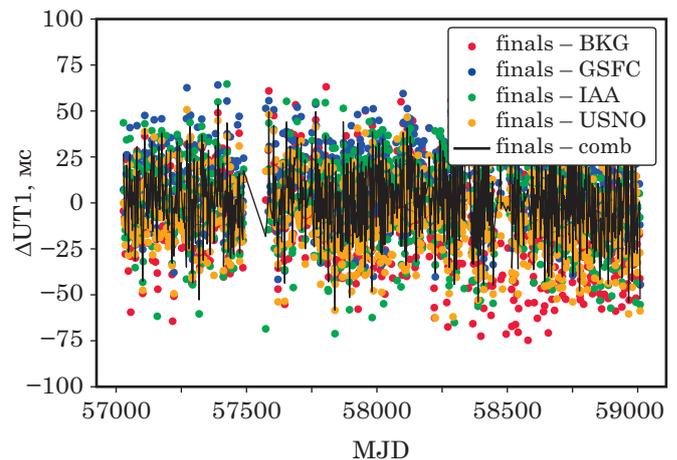


Рис. 2. Разности между рядом «finals» и рядами UT1, построенными на основе всех SINEX файлов

составило 19 мкс, от C04 — 23 мкс. Таким образом, показана применимость SINEX-технологии и разработанного в ИПА РАН пакета SINCOM для комбинирования результатов обработки часовых РСДБ-сессий.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО» и ЦКП «Суперкомпьютерный центр «Высокопроизводительные вычисления в радиоастрономии и космической геодезии».

Литература

Гаязов И. С., Губанов В. С., Братцева О. А., Курдубов С. Л. Разработка программных средств совместной обработки различных типов наблюдений // Труды ИПА РАН. 2012. Вып. 23. С. 136–141.

Губанов В. С., Курдубов С. Л., Суркис И. Ф. Новая версия пакета QUASAR для обработки РСДБ-наблюдений // Труды ИПА РАН. 2007. Вып. 16. С. 61–83.

Bizouard C., Lambert S., Gattano C., et al. The IERS EOP 14C04 solution for Earth orientation parameters consistent with ITRF 2014 // *Journal of Geodesy*. 2019. Vol. 93, Iss. 5. P. 621–633.

Brattseva O., Gayazov I., Kurdubov S., Suvorkin V. SINCom — the new program package for combined processing of space geodetic observations // *Proceedings of the Journées, 2014 “Systèmes de référence spatio-temporels”: Recent developments and prospects in ground-based and space astrometry, held at Pulkovo Observatory from 22 to 24 September 2014*. Ed. by Z. Malkin & N. Capitaine. 2015. P. 250–251.

IVS Home Page [Электронный ресурс]. URL: <https://ivscc.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 05.05.2021).

Nothnagel A., Artz T., Behrend D., Malkin Z. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry — delivering high-quality products and embarking on observations of the next generation // *Journal of Geodesy*. 2017. Vol. 91(7). P. 711–721.

Thaller D. Inter-technique combination based on homogeneous normal equation systems including station coordinates, Earth orientation and troposphere parameters. Technische Universität München Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, 2008.