

Об оценке точности высокочастотного ряда всемирного времени

© С. Л. Курдубов, Е. А. Скурихина

Институт прикладной астрономии РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

В статье рассмотрена проблема оценки точности временных рядов разностей UT1–UTC высокого временного разрешения при условии, что эталонные ряды заданы раз в сутки. Эта задача стала особенно актуальной в связи с появлением наблюдений для определения Всемирного времени несколько раз в сутки на регулярной основе.

Для рассматриваемого высокочастотного ряда и эталонного ряда строятся сглаженные ряды путём скользящей интерполяции значений полиномами различных степеней с использованием нескольких значений ряда вокруг интерполируемой точки. Производится гармонический анализ разностей исходных рядов и интерполированных. СКО разностей оригинального и интерполированного рядов предложено в качестве оценки внутренней точности ряда.

В статье использован ряд Всемирного времени, полученный в ИПА РАН в результате 1-часовых наблюдений геодезических радиостанций (квazarов) 13-метровыми быстросоворотными радиоинтерферометрическими антеннами нового поколения (VGOS), на базе «Бадарь» — «Зеленчукская». Наблюдения проводились в диапазонах S/X по программе наблюдений R 3–4 раза в сутки. Корреляционная обработка проводилась на корреляторе ИПА РАН RAS FX. Вторичная обработка выполнялась при помощи разработанного в ИПА РАН программного пакета QUASAR. Для анализа оценки точности ряда в статье использовался промежуток с февраля 2019 г. по февраль 2020 г. В качестве эталонного ряда были использованы ряд Международной службы вращения Земли и систем отсчета IERS, а именно ряд ПВЗ срочной службы IERS-finals.

Было показано, что построенный в ИПА РАН высокочастотный ряд определений UT1–UTC не имеет долгопериодических разностей с международным рядом IERS-finals. Сглаженный ряд ИПА РАН согласован с рядом IERS-finals на уровне 18 мкс по СКО. Высокочастотные флуктуации ряда частично имеют гармоническую природу и могут быть обусловлены неточностью модели внутрисуточных вариаций ПВЗ.

Ключевые слова: параметры вращения Земли, всемирное время, служба ПВЗ, РСДБ, интерполяция, спектральный анализ.

Контакты для связи: Курдубов Сергей Леонидович (kurdubov@iaaras.ru).

Для цитирования: Курдубов С. Л., Скурихина Е. А. Об оценке точности высокочастотного ряда всемирного времени // Труды ИПА РАН. 2021. Вып. 57. С. 23–27.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.57.23-27>

On Estimating the Accuracy of the High-Frequency Universal Time Series

S. L. Kurdubov, E. A. Skurikhina

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

Abstract

This article investigates a method for estimating the accuracy of a universal time series with a high temporal resolution based on estimates of the internal smoothness of the series itself.

The smoothed UT1-UTC time series were constructed by rolling polynomial interpolations of various degrees. The series obtained in this way is compared with the initial one; the standard deviation of the differences is proposed as an estimate of the internal accuracy of the series. The series smoothed in this way is compared with the series of the International Earth Rotation Service and Coordinate Systems (IERS).

The article uses a series of Universal Time obtained at the IAA RAS as a result of 1-hour observations of geodetic radio sources (quasars) with 13-meter high-speed radiointerferometric antennas of a new generation (VGOS), located at Badary and Zelenchukskaya. Observations were carried out in the S/X ranges according to the R observation program 3–4 times a day. Correlation processing was carried out on the RAS FX IAA RAS correlator. Secondary data processing was performed using the QUASAR software package developed at the IAA RAS. To analyze the accuracy of the series, the period from February 2019 to February 2020 was used in the article. As a reference series, we used a series of the International Earth Rotation Service and Reference Systems (IERS), namely a series of ERP (Earth rotation parameters) of the urgent service of the IERS-finals.

It was shown that the IAA RAS high frequency UT1-UTC series has no long term differences with the IERS finals. The smoothed IAA RAS series has differences at the level of 18 μ s RMS with the IERS finals. The high-frequency fluctuations of the series are partly of a harmonic nature and may be due to the inaccuracy of the model of the EOP intraday variations.

Keywords: parameters of the Earth's rotation, universal time, EOP service, VLBI, spectral analysis.

Contacts: Sergey L. Kurdubov (kurdubov@iaaras.ru).

For citation: Kurdubov S. L., Skurikhina E. A. On estimating the accuracy of the high-frequency universal time series // Transactions of IAA RAS. 2021. Vol. 57. P. 23–27.
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.57.23-27>

Введение

Уже почти 5 лет в составе комплекса «Квазар-КВО» действует двухэлементный интерферометр на базе «Зеленчукская» – «Бадарь» на 13-метровых антеннах нового поколения, построенный специально для получения высокоточных и оперативных данных о всемирном времени. 1-часовые сессии наблюдений в S/X-диапазоне на базе «Зеленчукская» – «Бадарь» проводятся в рамках программы R. Полученный ряд значений всемирного времени далее в тексте обозначим `iaa-r.dat`. В настоящее время объем наблюдений этого интерферометра существенно превосходит зарубежные аналоги (наблюдения проводятся 3–4 раза в сутки, тогда как международные сеансы по определению UT1–UTC проводятся только раз в сутки, и раз в неделю — два раза в сутки). В связи с этим остро встает вопрос эталона для верификации полученных результатов. Традиционно в качестве эталона принимаются международные ряды IERS-C04 ([Bizard, 2019](#)) и ряд срочной службы и прогноза Международной Службы Вращения Земли (МСВЗ) IERS-finals (Dick and Thaller, 2018), которые в части оценок всемирного времени строятся на базе комбинации ежедневных часовых сессий по программе IVS-Intensive и еженедельных суточных сессий по программам IVS-R1 и IVS-R4 (прямые оценки всемирного времени), в настоящей работе был использован ряд IERS-finals. В данной работе делается попытка оценить внутреннюю гладкость рядов оценок всемирного времени и таким образом построить оценку точности, связанную только с внутренними свойствами ряда, без построения разностей двух рядов, результаты сравниваются с оценкой точности на основании сравнения с эталонным рядом IERS.

IERS ([Petit, Luzum, 2010](#)) рекомендует при обработке наблюдений интерполировать значения международного ряда с помощью специально поставленной процедуры интерполяции INTERP.f, в которой используется лагранжева интерполяция второго порядка для 4 точек (по две точки ряда вокруг данного момента времени). В связи с этим в нашей работе мы будем рассматривать сглаживание ряда также с помощью лагранжевой интерполяции.

Интерполяция UT1-UTC

Можно предположить, что ряды разностей UT1–UTC должны быть достаточно гладкими, т. к. изменения во вращении Земли не могут происходить слишком быстро. Внутренней оценкой «глад-

кости» ряда может служить разность значения каждой точки ряда по сравнению с интерполированным на тот же момент значений соседних точек. Мы строили сглаженные ряды следующим образом: для каждой точки ряда строился интерполяционный полином с использованием N точек вперед и назад. Так, для $N = 1$ может быть построена только линейная функция, для $N = 2$ — вплоть до кубического полинома, $N = 3$ — до полинома 5-ой степени.

На рис. 1 показан пример того, как могут выглядеть различные варианты интерполяции разностей UT1–UTC для $N = 3$ (вычтен линейный ход). Жирным отмечена центральная точка, которая не использовалась при построении интерполяционного полинома. Шесть меньших точек показывают значения UT1–UTC, по которым проводилась интерполяция, сплошной линией показан полином 5-ой степени, который точно проходит через все шесть точек, пунктирная и штриховая линии — интерполяционные полиномы третьей и второй степени.

Таким образом был обработан годичный интервал ряда IERS-finals (с февраля 2019 г. по февраль 2020 г.), полученное интерполированное значение ряда сравнивалось со значением в отброшенной средней точке. Полученные результаты приведены в табл. 1. В таблице по вертикали отложено N — число взятых слева и справа от выброшенной от точки ряда, по горизонтали — степень интерполяционного полинома, значения

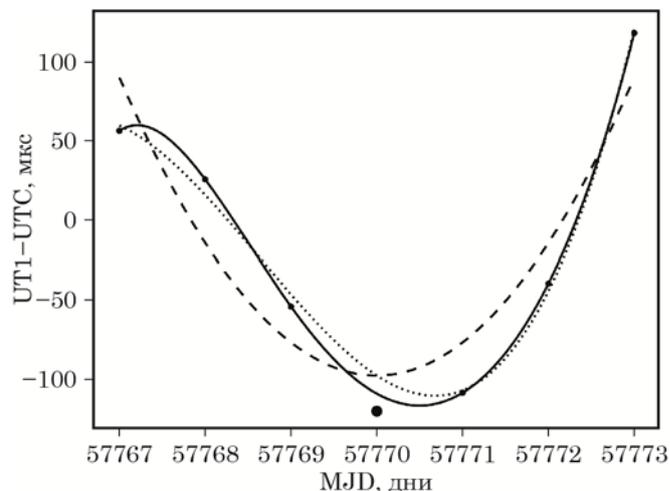


Рис. 1. Интерполяция ряда UT1-UTC IERS finals.dat полиномами различной степени (после вычета линейного хода). Точками отмечены значения ряда, жирная точка не использовалась в интерполяции

Таблица 1

СКО разностей интерполированного значения ряда IERS-finals и точки ряда, по вертикали отложено N , по горизонтали — степень полинома

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	63.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	148.5	11.5	11.5	—	—	—	—	—	—	—	—
3	257.3	23.7	23.7	9.4	9.4	—	—	—	—	—	—
4	378.7	47.6	47.6	13.8	13.8	9.1	9.1	—	—	—	—
5	501.3	87.9	87.9	18.3	18.3	12.3	12.3	8.9	8.9	—	—
6	614.5	145.6	145.6	26.1	26.1	15.3	15.3	11.4	11.4	9.0	9.0

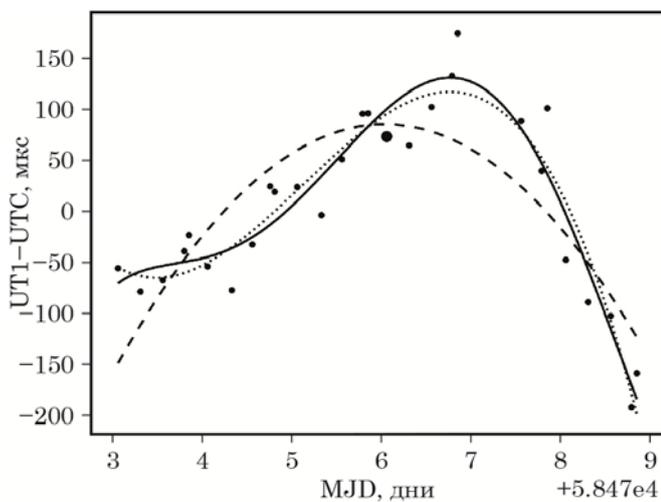


Рис. 2. Интерполяция ряда UT1-UTC *iaa-r.dat* полиномами различной степени (после вычета линейного хода). Точками отмечены значения ряда, жирная точка не использовалась в интерполяции

в таблице — СКО разностей между интерполированным значением и точкой ряда за год. Можно заметить, что если брать неделю (по три точки слева и справа) и степень полинома 4 или 5, то СКО получается 9.4 мкс, что сравнимо со средней формальной точностью ряда за тот же период (5.4 мкс). При увеличении интервала и степени полинома заметных изменений СКО не происходит по причине того, что далёкие точки оказыва-

ются практически не связанными с текущей из-за хаотической природы колебаний UT1–UTC.

Теперь сделаем ту же операцию с рядом *iaa-r.dat*, полученным по наблюдениям в 2019 г. на малых антеннах RT-13. Так как наблюдения проводились 3 или 4 раза в сутки, то теперь N будет не число точек, взятых для интерполяции, а число дней слева и справа от выбранной точки, актуальное число точек при интерполяции может варьироваться. Пример того, как может выглядеть интерполяция разными степенями полиномов для ряда *iaa-r.dat*, показан на рис. 2. Такая операция производится для различного числа дней и различных степеней полинома, результаты интерполирования сравниваются с исходным рядом и рядом IERS-finals.

В табл. 2, так же как и в табл. 1, приведены СКО разностей между значениями оценок $dUT1$ и проинтерполированными значениями на этот момент. В табл. 3 приведены СКО разностей сглаженного интерполяцией ряда *iaa-r.dat* и ряда *finals.dat*. Таким образом, в табл. 2 показана внутренняя самосогласованность и гладкость ряда, а в табл. 3 показано, на сколько отличается сглаженный ряд *iaa-r.dat* от ряда *finals.dat*.

Получается, что лучшее СКО для внутренней оценки гладкости составляет 31 мкс, при интерполировании 8 дней ряда полиномом 4-ой степени. В сравнении с международным рядом наименьшее СКО (18 мкс) имеет ряд, построенный интерполированием 6 дней полиномом 3-ей степени.

Таблица 2

СКО разностей исходного ряда и сглаженного скользящим интерполированием, по вертикали отложено N — число дней вокруг выбранной точки, по горизонтали — степень полинома

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	38.5	35.7	35.5	35.4	38.6	—	—	—	—	—	—
2	87.8	31.8	31.6	31.5	32.1	37	37.6	37.6	37.5	36.2	36.3
3	174.5	32.9	32.2	31.4	31.4	33.1	33	32.2	32.7	35.7	36.7
4	280.3	42.1	40.4	30.8	31	32.1	31.7	31.4	31.4	33.4	33.9
5	393.1	65.5	62.8	31.8	31.9	31.2	31.1	31.1	31.2	32.7	32.7
6	501.3	105.4	101.7	34.7	34.7	31.4	31.2	30.9	31	32	31.8

Таблица 3

СКО разностей ряда IERS-finals и сглаженного скользящим интерполированием ряда *iaa-r*, по вертикали отложено N — число дней вокруг выбранной точки, по горизонтали — степень полинома

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	22.2	24.3	24.7	28.7	32.3	—	—	—	—	—	—
2	74.8	20.2	19.8	22	22.4	25.6	25.9	27.3	28.2	30.5	31.8
3	163.4	19.4	18	20.5	20.6	21.9	22.1	23.2	23.4	25.1	25.7
4	270.2	27.7	25.1	19.6	19.5	20.9	20.8	21.6	21.6	22.9	23.3
5	383.6	52.5	49.2	19.3	19.1	20.1	20.2	20.8	20.8	21.8	21.8
6	491.9	93.9	90	20.9	20.3	19.8	19.8	20.2	20.4	21.1	21.1

Спектральный анализ разностей рядов UT1-UTC

Полученные разности, как для интерполированных значений, так и для оригинальных рядов, имеют характерный псевдопериодический вид. Был произведён гармонический анализ полученных разностей. Так как значения ряда заданы на неравномерной сетке, то был применён метод построения периодограммы Ломба – Скаргла (Lomb, 1976) для неравностоящих временных рядов.

На рис. 3 показан LS-спектр (Scargle, 1982) оригинальных разностей IERS-finals и *iaa-r*, пунктиром показан исходный спектр, сплошной линией — спектр после вычитания трех первых гармоник по методу CLEAN. На рис. 4 показан LS-спектр разностей IERS-finals и сглаженного путём интерполяции ряда *iaa-r*, пунктиром показан исходный спектр, сплошной линией — спектр после вычитания 3 первых гармоник по методу CLEAN.

Несмотря на то, что разности имеют заметную гармоническую составляющую, вычитание соответствующих гармоник не позволяет кардинально уменьшить СКО. В табл. 4 приведены СКО разностей после кумулятивного вычитания соответствующего числа гармоник с наибольшими амплитудами (количество гармоник 0–3 указано в

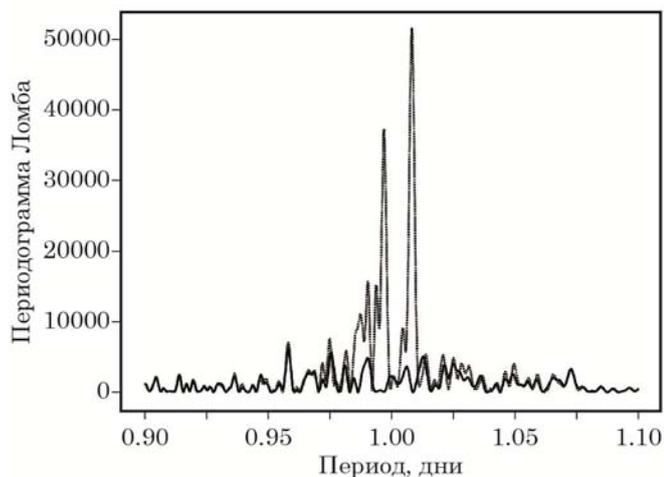


Рис. 3. LS-спектр разностей рядов IERS-finals и *iaa-r*. Пунктирная линия — оригинальный спектр, сплошная линия — после вычета 3 гармоник

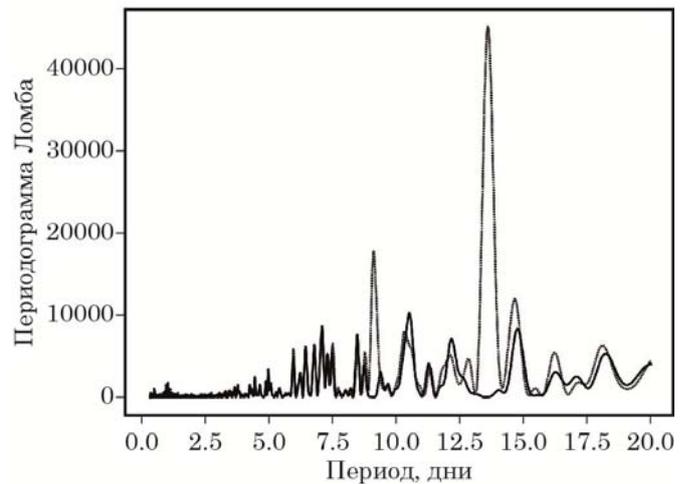


Рис. 4. LS-спектр разностей IERS-finals и сглаженного *iaa-r*. Пунктирная линия — оригинальный спектр, сплошная линия — после вычета 3 гармоник

верхней строке таблицы). Для сглаженного ряда вычитались гармоники с периодами от одной до двух недель, для оригинального ряда вычитались близзачотные гармоники.

Таблица 3

СКО разностей ряда IERS-finals и ряда *iaa-r.dat*, сглаженного и несглаженного, после удаления гармоник с периодами 1.0082, 0.9969, 0.9940 дня для оригинальных разностей и 13.59225, 9.0955, 10.50511 дней для сглаженного ряда

Разность	0	1	2	3
IERS-finals <i>iaa-r</i>	31.4	29.8	28.7	28.7
IERS-finals — interp_iaa-r	18.8	16.9	16.0	15.3

Заключение

Было показано, что построенный в ИПА РАН высокочастотный ряд *iaa-r* определения UT1-UTC не имеет долгопериодических разностей с международным рядом IERS. Может быть построен сглаженный ряд *interp_iaa-r.dat*, согласованный с рядом IERS на уровне 18 мкс по СКО. Высокочастотные флуктуации ряда *iaa-r.dat* (рис. 3) частично имеют гармоническую природу и могут быть обусловлены неточностью модели внутрису-

точных вариаций ПВЗ. Однако основная часть высокочастотных флуктуаций не является гармонической. Это может объясняться наличием во внутрисуточных вариациях ПВЗ немоделируемых в настоящее время стохастических компонент, а также инструментальными эффектами и эффектами структуры радиоисточников.

Литература

IERS Annual Report 2018. Ed. by R. Wolfgang, D. Thaller. International Earth Rotation and Reference Systems Service, Central Bureau. Verlag des Bundesamts

für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2020. 207 p.

Bizouard C., Lambert S., Gattano C., Becker O., Richard JY. The IERS EOP 14C04 solution for Earth orientation parameters consistent with ITRF 2014 // *J. Geod.* 2019. Vol. 93, Iss. 5. P. 621–633.

Lomb N. R., Least-squares frequency analysis of unequally spaced data // *Astrophys. Sp. Sci.* 1976. Vol. 39. P. 447–46.

Scargle J. D. Studies in astronomical time series analysis. 2. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // *Ap. J.* 1983. Vol. 263. P. 835–853.

IERS Conventions (2010). Ed. by G. Petit, B. Luzum. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2010. 179 p.