

УДК 521.9342

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-238-245

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Виктор Мартынович Тиссен

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-45, e-mail: tissen@mail.ksn.ru

Александр Сергеевич Толстиков

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-45, e-mail: tolstikov@mail.ksn.ru

Галина Вячеславна Симонова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (913)724-67-47, e-mail: simgal@list.ru

В статье рассмотрена методика прогнозирования параметров вращения Земли (ПВЗ), отличающаяся от общепринятых тем, что для построения прогностических моделей используются различные по продолжительности временные ряды исходных данных. При этом оценка параметров моделей медленных трендовых изменений выполняется на интервале обучающей выборки порядка 100 лет. Для оценки параметров более быстрых квазипериодических и регулярных составляющих используются интервалы от 6 до 40 лет. Такой способ разбиения временного ряда на различные по длительности интервалы обучающей выборки позволяет получать адаптивные модели медленных и быстрых изменений временных рядов с последующим их объединением в полную прогностическую модель. Практическая реализация предлагаемой методики показала хорошую устойчивость результатов прогнозирования для всех ПВЗ независимо от даты начала прогноза, что подтверждается результатами ее апробации в различных международных проектах и программах.

Ключевые слова: параметры вращения Земли, моделирование, обучающая выборка, прогнозирование, всемирное время, движение полюса, аппроксимация

Введение

Повышение точности прогнозирования и определения параметров вращения Земли (ПВЗ), которые включают координаты северного полюса x_p , y_p и всемирное время $UT1$, актуально для развития многих фундаментальных наук о Земле и их практических приложений. Данные о ПВЗ нашли применение в геофизике при изучении процессов переноса вещества в мантии, ее взаимодействия с внешним ядром; в метеорологии при построении согласующих моделей изменений углового момента ветров и долгосрочного прогнозирования климата, динамики таяния ледников; других процессов, происходящих внутри Земли на суше и в океане [1–3].

Необходимость в прогнозах ПВЗ возникает при решении задач координатно-временных и навигационных определений (КВНО) современными глобальными навигационными системами (ГНСС). В частности, для оперативной поддержки работы Российской навигационной системы ГЛОНАСС требуется ежесуточное обновление прогнозных значений ПВЗ на сроки от 1 до 7 дней, которые должны своевременно закладываться в программное обеспечение бортового компьютера. В случае же перехода системы ГЛОНАСС на автономный режим функционирования (особый период) появляется необходимость в прогнозах ПВЗ на 60 дней [4, 5].

Постоянный рост требований к точности КВНО, а также развитие средств вычислительной и информационной техники в по-

следние десятилетия привели к появлению многих новых разнообразных методов прогнозирования ПВЗ. Однако ни один из них не может обеспечить высокого качества прогнозов на различных участках временных рядов ПВЗ. Это связано с тем, что одни методы могут с успехом применяться на участках без резких изменений рядов ПВЗ, а другие, наоборот, в периоды быстрых их изменений, что наиболее характерно для весеннего и осеннего периодов. В частности, в периоды быстрых изменений при прогнозе на 7–10 дней хорошие результаты показывает применение различных модификаций фильтра «Калмана», а при прогнозе на 30 и более дней предпочтение следует отдавать МНК и другим адаптивным методам [6–8].

В предлагаемом авторами методе за счет того, что оценка параметров медленных и быстрых изменений рядов ПВЗ производится на различных по длительности интервалах обучающей выборки, можно получить максимально приближенную к исходным данным адаптивную модель их полных изменений. Разделение сложного вращения Земли на более простые трендовые и квазипериодические вариации позволяет лучше отделить регулярную прогнозируемую составляющую изменений рядов ПВЗ от нерегулярных и случайных колебаний и повысить, таким образом, устойчивость получения результатов.

Методы и материалы

История инструментальных наблюдений за вращением Земли (ВЗ) насчитывает немногим более 3,5 столетий. Такой сравнительно небольшой в историческом масштабе отрезок времени не позволяет достоверно выявить вековые закономерности в нестабильностях ВЗ и, соответственно, построить их математические модели. Кроме этого, точность и периодичность астрономических данных по наблюдениям за ВЗ в прошлые века была значительно ниже, чем в настоящее время. В частности, до середины восьмидесятых годов прошлого века основными средствами наблюдений за вращением Земли были различные специализированные астрономические инструменты, среди которых наибольшее распро-

странение получили астролябия Донжона и Пассажный инструмент (ПИ). Разрешающая способность лучших ПИ составляла порядка 10 мс за часовой сеанс наблюдений [6]. Согласно данным, приведенным в [9], погрешность совокупных определений всемирного времени всеми отечественными ПИ находилась на уровне 3 мс. Благодаря этим наблюдениям в XIX и XX вв. были открыты чандлеровский и годовой периоды в перемещениях северного полюса, а также годовые колебания угловой скорости вращения Земли [9].

Современные спутниковые и радиоинтерферометрические методы определений ПВЗ позволили на два порядка повысить точность в сравнении с эпохой астрономических наблюдений за звездами и планетами. В настоящее время по данным Международной службы вращения Земли (МСВЗ-IERS) погрешности определений ПВЗ находятся на уровне 15 мкс по всемирному времени и 10^{-5} угл. секунд по координатам полюса [10]. В результате такого повышения точности определений ПВЗ стали наблюдаемы эффекты от изменения стока океанических течений, изменения угловых моментов ветров, выпадения осадков, таяния льдов в Северном океане и в горах. На пределе разрешающей способности идентифицируются отклики от землетрясений [11]. С повышением точности определений ПВЗ возросли также и требования к точности их прогнозирования. Согласно требованиям федерально-целевой программы (ФЦП) развития ГЛОНАСС до 2020 г., среднегодовая погрешность прогнозирования всемирного времени на 2 недели не должна превышать 1,5 мс [5]. Выполнение этих требований является сложной научно-технической задачей, поскольку ни один из известных методов не может гарантировать стабильные результаты на протяжении длительного времени. Существующие в мире методы прогнозирования ПВЗ основаны на построении численно-аналитических и эмпирических моделей ВЗ.

Первые исследования по созданию численно-аналитических моделей изменений координат полюса, предложенные Л. Эйлером, позволили теоретически рассчитать для твердой Земли 305-суточный период свободной нутации. Позднее, на основании анализа

наблюдений за изменчивостью широт обсерватории, С. Чандлером было установлено, что в движении полюса присутствуют две периодические составляющие: 365 и 435 звездных суток. При этом компонента 365 суток, связанная с годовым обращением Земли вокруг Солнца, является вынужденной, а компонента 435 суток – свободной, чандлеровской [12, 13]. Несмотря на огромный прогресс со времен Л. Эйлера в изучении физики Земли, существующих знаний все еще недостаточно для построения полноценной аналитической модели. Поэтому эти модели пока не нашли широкого применения в задачах спутниковой навигации, а используются в основном для вычисления многолетних и тысячелетних сглаженных прогнозов ПВЗ [14, 15].

Статистические методы, в отличие от численно-аналитических, значительно более чувствительны к текущим изменениям ПВЗ, что позволяет в большинстве случаев обеспечивать выдвигаемые ГНСС требования к точности и оперативности прогнозов ПВЗ. Однако для этого требуется переоценка параметров применяемых моделей, которая в зависимости от применяемого метода и характера изменений последних известных данных выполняется с различной регулярностью. В случае использования Калмановской фильтрации или нейронных сетей такая переоценка выполняется ежедневно по мере поступления новых данных, а при использовании детерминированных моделей определяется критериями, характеризующими степень соответствия модельных значений ПВЗ их действительным значениям. Обычно такие модели включают в себя уравнение тренда и ограниченное число гармоник, параметры которых оцениваются с помощью метода наименьших квадратов (МНК), спектрального Фурье-анализа и других статистических методов [6, 16, 17].

Поскольку всемирное время – наиболее востребованный параметр ПВЗ для решения задач ГНСС, то в рамках данной статьи технология прогнозирования рассмотрена только для этого параметра. С небольшими изменениями она может быть применена и для прогнозирования движения полюса. Как уже отмечалось, построение модели в предлагаемом

нами методе производится на интервалах обучающей выборки различной длины от 6 до 100 лет. В частности, оценивание параметров тренда, заданного в виде суперпозиции ограниченного числа долгопериодических гармоник, производится на интервалах от 40 до 100 лет. Оценивание параметров более высокочастотных гармоник, моделирующих квазипериодические и сезонные вариации всемирного времени, производится на интервалах от 6 до 40 лет после внесения в исходный временной ряд трендовых изменений, в то время как в традиционных методах для этих целей используют полиномы низких степеней, коэффициенты которых оцениваются с помощью МНК на интервале известных данных от 1 до 5 лет [17, 18].

В предлагаемом авторами методе построение адаптивных моделей медленных и быстрых изменений рядов ПВЗ производится на различных по длительности интервалах данных, непосредственно предшествующих дате начала прогноза, которые принято называть интервалами обучающей выборки.

Формулу прогноза всемирного времени можно представить в виде

$$\Delta UT1_{pr,i} = \Delta UT1_{rel,0} - \Delta UT1_{pra,0} + \Delta UT_{pra,i} + \Delta T_{pp,i} + \Delta T_{trn,i} + \Delta T_{sez,i}, \quad (1)$$

где $\Delta UT1_{pr,i}$ – прогноз $\Delta UT1$ на i -й день;

$\Delta UT1_{rel,0}$ – последнее из известных значений $\Delta UT1$;

$\Delta UT1_{pra,0}$ – прогноз $\Delta UT1$ по модели авторегрессии на нулевую дату;

$\Delta UT1_{pra,i}$ – прогноз $\Delta UT1$ по модели авторегрессии на i -й день;

$\Delta T_{pp,i}$ – поправки за счет влияния лунно-солнечных приливов в океанах определяются по методике, изложенной в [17];

$\Delta T_{trn,i}$, $\Delta T_{sez,i}$ – поправки за трендовые и сезонные вариации в неравномерностях вращения Земли соответственно.

Для учета псевдослучайных колебаний $\Delta UT1_{pra,i}$ используется авторегрессионный анализ с учетом высших производных, описанный в [19].

Рассмотрим некоторые особенности оценивания параметров трендовых и сезонных вариаций.

На интервале известных значений $\Delta UT1$ длительностью до 100 лет задается n предполагаемых гармонических компонент с периодами T_j , где $j=1\dots n$. Далее, для каждой компоненты T_j на исследуемом интервале известных данных задаются отрезки m длиной $L = \frac{T_j}{2\Delta T}$ (ΔT соответствует периоду в 1 день). Затем производится смещение отрезков m относительно друг друга на половину периода предполагаемой искомой компоненты и их совмещение с началом первого. На полученных, таким образом, совмещенных отрезках выполняется суммирование значений $\Delta UT1$ по формуле

$$\Delta UT1_{S,i} = \sum_{k=1}^m (-1)^{k+1} \cdot \Delta UT1_{i+lk}, \quad (2)$$

где $\Delta UT1_{S,i}$ – суммарный ряд;

$i=1\dots l$ – номер дня в отрезке;

$k=1\dots m$ – номер отрезка на выбранном интервале данных.

В итоге будет получен преобразованный ряд, в котором гармоника с периодом T_j возрастет по амплитуде в m раз, в то время как

уровень нерегулярных составляющих увеличится только в \sqrt{m} раз.

Оценка параметров, выделенных в преобразованном ряде $dUT1_{S,i}$ гармоник с периодами T_j , выполняется с помощью метода наименьших квадратов. При этом аппроксимирующая гармоническая функция $f_j(t_i)$ имеет вид

$$f_j(t_i) = A_j \sin\left(\frac{2\pi t_i}{T_j} + \phi_j\right). \quad (3)$$

Для применения МНК уравнение (3) приводится к линейному виду

$$f_j(t_i) = a_j \sin\left(\frac{2\pi t_i}{T_j}\right) + b_j \cos\left(\frac{2\pi t_i}{T_j}\right), \quad (4)$$

где коэффициенты a_j, b_j находятся из условия

$$\sum_{i=1}^n (f_j(t_i) - \Delta T_i)^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $\Delta T_i = dUT1_{S,i}$ – аппроксимируемый ряд.

Подставляя уравнение (4) в условие (5) и дифференцируя его относительно неизвестных a_j и b_j , получим систему из двух линейных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n \left(a_j \sin\left(\frac{2\pi t_i}{T_j}\right) + b_j \cos\left(\frac{2\pi t_i}{T_j}\right) - \Delta T_i \right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi t_i}{T_j}\right) &= 0 \\ \sum_{i=1}^n \left(a_j \sin\left(\frac{2\pi t_i}{T_j}\right) + b_j \cos\left(\frac{2\pi t_i}{T_j}\right) - \Delta T_i \right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi t_i}{T_j}\right) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Найденные из решения системы уравнений (6) коэффициенты a_j, b_j для заданного числа гармонических компонент n подставляются в (4). В результате будут выделены гармонические компоненты с периодами T_j , для каждой из которых оценивается погрешность аппроксимации $\sigma_{анп,j}$. Затем, из числа найденных компонент T_j выбирается компонента с минимальной погрешностью аппрок-

симации и в исходный ряд $\Delta UT1$ вносятся поправки, обусловленные вкладом найденной гармоники.

Поиск других гармонических компонент осуществляется аналогичным образом до достижения заданного предельно малого значения критерия близости аппроксимирующей функции $f(t)$ к исходному временному ряду $\Delta UT1$. По завершению описанной расчетной процедуры будет получен ряд адаптивных

гармоник, оптимально моделирующих изменения действительных значений всемирного времени.

Приведенный алгоритм прогнозирования всемирного времени применим и для вычисления прогнозов координат полюса. При этом в изменениях полюса не учитываются приливные гармоники ввиду их малости, а также отсутствуют глобальные тренды.

Результаты

По предлагаемым в настоящей статье методике и алгоритмам прогнозирования ПВЗ составлены вычислительные программы, с помощью которых в международном пилотном проекте Earth Orientation Parameters Combination of Prediction Pilot Project (ЕОРСРРР), проходившем под эгидой МСВЗ, были получены результаты мирового уровня.

В таблице приведены среднеквадратичские погрешности (СКП или RMS в западной интерпретации) прогнозов всемирного времени UT1 и координат полюса x_p , y_p , взятые из финального отчета ЕОРСРРР [20], на сроки

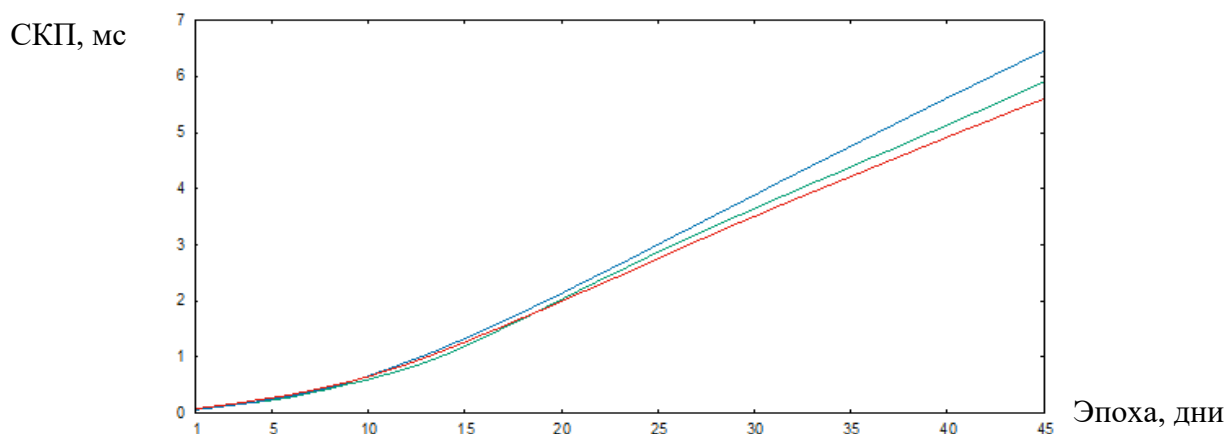
1, 10, 30, 60 и 90 дней, полученные по предлагаемой методике за время ее апробации в проекте ЕОРСРРР в сравнении с аналогичными данными обсерватории USNO, которая также участвовала в данном проекте.

Анализируя данные таблицы, можно отметить, что независимо от выбранного параметра ВЗ прогнозы, вычисляемые по предлагаемой методике, имеют меньшие погрешности. Исключение составляют только краткосрочные (от 1 до 10 суток) прогнозы, где погрешности оказались приблизительно одинаковыми. Более полное представление о результатах проекта ЕОРСРРР представлено в [20].

На рисунке приведены графики погрешностей СКП (RMS) прогнозов всемирного времени UT1 на каждый день до глубины 45 дней, ежедневно вычисляемых по предлагаемой методике в сравнении с аналогичными погрешностями, вычисляемыми в USNO и в лаборатории реактивного движения JPL (США) за период с 1 сентября 2010 г. по 31 декабря 2019 г. Данные графики любезно предоставлены доктором физ. мат. наук, главным научным сотрудником Пулковской обсерватории ГАО РАН З. М. Малкиным.

Сравнение СКП методов прогнозирования по данным ЕОРСРРР

СКП _{прогн.} параметров ВЗ	Метод прогнозирования	Дальность прогноза, дни				
		1	10	30	60	90
СКП _{прогн.} всемирного времени, мс	Предлагаемый	0,057	0,63	2,90	6,60	9,75
	Применяемый в USNO	0,060	0,62	3,12	7,20	11,55
СКП _{прогн.} x_p , mas	Предлагаемый	0,340	3,60	9,70	15,90	20,50
	Применяемый в USNO	0,370	4,00	10,00	17,20	23,40
СКП _{прогн.} y_p , mas	Предлагаемый	0,290	2,60	7,30	11,20	16,10
	Применяемый в USNO	0,320	2,70	7,70	12,30	18,30



СКП (RMS) прогнозов всемирного времени USNO (зеленый), JPL (синий) и по предлагаемой методике (красный)

Из графиков, приведенных на рисунке, видно, что до 10 дней погрешности прогнозов, вычисленных в USNO, JPL и по предложенной методике, отличаются незначительно, а после 20 дней наблюдается пропорциональное увеличение разности между ними, что показывает преимущества предложенного авторами метода в сравнении с USNO, JPL.

Заключение

В заключение следует отметить, что приведенные методика и алгоритмы прогнозирования ПВЗ основаны на способе применения обычного МНК к анализу временных рядов. При этом в разные временные эпохи вычисляемые по данной методике прогнозы ПВЗ показывали высокие по точности результаты.

Это, в частности, подтверждается результатами, полученными в ЕОРСРРР. Необходимо также отметить, что статистические методы прогнозирования временных рядов, обладающих свойствами эргодичности и стационарности, к которым при некоторых ограничениях можно отнести временные ряды ПВЗ, не могут гарантировать устойчивость результатов прогнозирования в разные временные эпохи. В любых построениях статистических моделей ПВЗ всегда остается немодулируемая составляющая, связанная с внезапными изменениями направления тренда. Тем не менее, статистическое прогнозирование ПВЗ остается на сегодняшний день единственным методом, с помощью которого возможно достижение точностей, востребованных в современных задачах КВНО, космической геодезии и во многих других науках о Земле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сидоренков Н. С. Физика нестабильностей вращения Земли. – М. : Наука. Физматлит, 2002. – 376 с.
2. Zotov L., Sidorenkov N. S., Bizouard C., Shum C. K., Shen W. B. Multichannelsingular spectrum analysis of the axial atmospheric angular momentum // *Geodesy and Geodynamics*. – 2017. – Vol. 8, No 6. – P. 433–442.
3. Tolstikov A. S., Tissen V. M., Simonova G. V. Long-term climate prediction by means of Earth rotation rate adaptive variations models // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. – 2019. – Vol. 11208. – P. 1120887-1–1120887-5.
4. Жуков А. Н., Титов Е. В. Основные направления повышения точности эфемеридного обеспечения системы ГЛОНАСС // Пятая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение (КВНО-2013)», 15–19 апреля 2013 г. – СПб., 2013. – С. 117–118.
5. О федеральном бюджете на 2015 год и на плановый период 2016 и 2017 годов : закон РФ от 01.12.2014 № 384-ФЗ [Электронный ресурс] // Федеральная целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» в рамках государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России на 2013–2020 годы». – 2014. – С. 1–144. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
6. Горшков В. Л. О методах прогнозирования в геодинимике // *Изв. ГАО РАН*. – 2004. – № 214. – С. 313–335.
7. Schuh H. e. a. Earth Orientation Parameters Prediction Comparison Campaign – first summary // *Geophys. Research Abstracts*. – 2008. – V. 10. – P. 46.
8. Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. – М. : Финансы и статистика, 2003. – С. 33–37.
9. Бакулин П. И., Блинов Н. С. Служба точного времени. – М. : Наука, 1968. – 320 с.
10. Кауфман М. Б. Точные методы измерения параметров вращения Земли в интересах навигационно-временных определений. Точные измерения для высоких технологий : монография / под общей ред. П. А. Красовского. – Менделеево : ФГУП «ВНИИФТРИ», 2008. – С. 80–118.
11. Пасынок С. Л. О влиянии землетрясений на продолжительность суток // *Измерительная техника*. – 2012. – № 5. – С. 11–13.
12. Подобед В. В., Нестеров В. В. – Общая астрометрия. – М. : Наука, 1975. – 551 с.
13. Chandler S. C. On a New Component of the Polar Motion // *Astron. J.* – 1901. – No. 494. – P. 109–112.
14. Филиппова А. С. Численно-аналитическое исследование параметров вращения Земли с приложениями для спутниковой навигации: дисс. канд. физ.-мат. наук. – М. : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2015. – 121 с.

15. Акуленко Л. Д., Кумакшев С. А., Марков Ю. Г., Рыхлова Л. В. Прогноз движения полюса деформируемой Земли // *Астрономический журнал*. – 2002. – № 10. – С. 952–960.
16. Kaufman M. N., Pasyok S. L. Russian state time and Earth rotation service: observation, EOP series, prediction // *Artificial Satellites*. – 2010. – Vol. 45, No 2. – P. 81–86.
17. McCarthy D. D., Petit G. IERS Conventions // *IERS Technical Note*. – 2004. – No 32. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie. – Frankfurt am Main, 2003.
18. International Earth Rotation and Reference Systems Service. Service International de la Rotation de la Terre et des Systemes de Reference [Electronic resource]. – Mode of access: <http://maia.usno.navy.mil/eopcrppp/eopcrppp.html> (дата обращения: 19.06.2020).
19. Тиссен В. М. СНИИМ–СГГА в Международном проекте ЕОРСРРР (Earth orientation parameters combination of prediction pilot project) // *Вестник СГГА*. – 2011. – Вып. 1 (14). – С. 97–104.
20. Earth Orientation Parameters Combination of Prediction Pilot Project [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://maia.usno.navy.mil/eopcrppp/eopcrppp.html> (дата обращения: 19.06.2020).

Получено 06.07.2020

© В. М. Тиссен, А. С. Толстиков, Г. В. Симонова, 2020

PREDICTION OF EARTH ROTATION PARAMETERS WITH USING ADAPTIVE HARMONIC PATTERNS

Victor M. Tissen

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Special Devices, Innovations, and Metrology, phone: (383)361-07-45, (383)229-75-30, e-mail: tissen@mail.ksn.ru

Aleksandr S. Tolstikov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Special Devices, Innovation and Metrology, phone: (383)361-07-45, e-mail: tolstikov@mail.ksn.ru

Galina V. Simonova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Special Devices, Innovation and Metrology, phone: (913)724-67-47, e-mail: simgal@list.ru

The article discusses the methodology for predicting the Earth's rotation parameters (ERP), which differs from the generally accepted one's in that for constructing prognostic models, time series of initial data of various durations are used. At the same time, the estimation of the parameters of models of slow trend changes performed in the interval of the training sample of about 100 years. Intervals from 6 to 40 years are used to evaluate the parameters of the faster quasiperiodic and regular components. This method of dividing the time series into training sample intervals of different durations allows obtaining adaptive models of slow and fast changes in time series with their subsequent integration into a complete prognostic model. The practical implementation of the proposed methodology showed high stability of the forecasting results for all ERP regardless start date of the forecast, which was confirmed by the results of its testing in various international projects and programs.

Keywords: Earth rotation parameters, modeling, training sample, forecasting, universal time, pole movement, approximation

REFERENCES

1. Sidorenkov, N. S. (2002). *Fizika nestabil'nostey vrashcheniya Zemli [Earth rotation instability physics]*. Moscow: Nauka. Fizmatlit Publ., 376 p. [in Russian].

2. Zotov, L., Sidorenkov, N. S., Bizouard, C., Shum, C. K., & Shen, W. B. (2017). Multichannel singular spectrum analysis of the axial atmospheric angular momentum. *Geodesy and Geodynamics*, 8(6), 433–442.
3. Tolstikov, A. S., Tissen, V. M., & Simonova, G. V. (2019). Long-term climate prediction by means of Earth rotation rate adaptive variations models. *Proceedings of SPIE – the International Society for Optical Engineering*, 11208, 1120887-1–1120887-5.
4. Zhukov, A. N., & Titov, E. V. (2013). The main directions of increasing the accuracy of the ephemeris support of the GLONASS system. In *Pyataya Vserossiyskaya konferentsiya: Fundamental'noye i prikladnoye koordinatno-vremennoye obespecheniye (KVNO-2013) [Proceedings of Fifth All-Russian Conference: Fundamental and Applied Coordinate-Time Support (KVNO-2013)]* (pp. 117–118). St. Petersburg [in Russian].
5. Law of the Russian Federation of January 12, 2014 No. 384. On the federal budget for 2015 and for the planning period 2016 and 2017, Concept of the federal target program "Maintenance, development and use of the GLONASS system for 2012–2020" within the framework of the state programs of the Russian Federation "Space activities of Russia for 2013–2020" (pp. 1–144). Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
6. Gorshkov, V. L. (2005). On forecasting methods in geodynamics. *Izvestiya GAO RAN. [Proceedings of the GAO RAS]*, 214, 313–335 [in Russian].
7. Schuh, H., & et. al. (2008). Earth Orientation Parameters Prediction Comparison Campaign – first summary. *Geophys. Research Abstracts*, 10, P. 46.
8. Lukashin, Yu. P. (2003). *Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennykh ryadov [Adaptive methods of short-term forecasting of time series]* (pp. 33–37). Moscow: Finansy i statistika Publ. [in Russian].
9. Bakulin, P. I., & Blinov, N. S. (1968). *Sluzhba tochnogo vremeni [Exact Time Service]*. Moscow: Nauka Publ., 320 p. [in Russian].
10. Kaufman, M. B. (2008). Exact methods for measuring the parameters of the Earth's rotation in the interests of navigational-temporal determinations. In *Tochnyye izmereniya dlya vysokikh tekhnologiy [Precise measurements for high technology]* (pp. 80–118). P. A. Krasovskiy (Ed.). Mendeleevo: FSUE VNIIFTRI Publ. [in Russian].
11. Pasynok, S. L. (2012). On the effect of earthquakes on the length of the day. *Izmeritel'naya tekhnika [Measuring Technique]*, 5, 11–13 [in Russian].
12. Podobed, V. V., & Nesterov, V. V. (1975). *Obshchaya astrometriya [General astrometry]*. Moscow: Nauka Publ., 551 p. [in Russian].
13. Chandler, S. C. (1901). On a New Component of the Polar Motion. *Astron. J.*, 494, 109–112.
14. Filippova, A. S. (2015). Numerically-analytical study of the Earth's rotation parameters with applications for satellite navigation. *Candidate's thesis*. Moscow, 121 p. [in Russian].
15. Akulenko, L. D., Kumakshev, S. A., Markov, Yu. G., & Rykhlova, L. V. (2002). Forecast of the movement of the pole of the deformable Earth. *Astronomicheskij zhurnal [Astronomical Journal]*, 10, 952–960 [in Russian].
16. Kaufman, M. N., & Pasynok, S. L. (2010). Russian state time and Earth rotation service: observation, EOP series, prediction. *Artificial Satellites*, 45(2), 81–86.
17. McCarthy, D. D., & Petit, G. (2004). IERS Conventions. *IERS Technical Note*, 32.
18. International Earth Rotation and Reference Systems Service. Service International de la Rotation de la Terre et des Systemes de Reference. (n. d.). Retrieved from <http://maia.usno.navy.mil/eopcxxx/eopcxxx.html>.
19. Tissen, V. M. (2011). SNIIM – SSGA in the International project EORSRP (Earth orientation parameters combination of prediction pilot project). *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 1(14), 97–104 [in Russian].
20. Earth Orientation Parameters Combination of Prediction Pilot Project. (n. d.). Retrieved from <http://maia.usno.navy.mil/eopcxxx/eopcxxx.html>.

Received 06.07.2020

© V. M. Thyssen, A. S. Tolstikov, G. V. Simonova, 2020