

Модификация базового метода сингулярного спектрального анализа для повышения точности прогнозирования неравномерности вращения Земли

А. К. ГРЕЧКОСЕЕВ¹, А. С. ТОЛСТИКОВ², В. М. ТИССЕН², В. С. КАРМАНОВ^{3,†},
А. И. ВАГАНОВА³

¹АО “Информационные спутниковые системы” имени академика М.Ф. Решетнева”,
Железногорск, Россия

²Сибирский государственный ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский институт метрологии, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

[†]Контактный автор: Карманов Виталий С., e-mail: karmanov@corp.nstu.ru

Поступила 10 марта 2020 г., доработана 23 марта 2020 г., принята в печать 10 апреля 2020 г.

Растущие потребности в точности координатно-временных определений со стороны многих прикладных наук о Земле и практических задач приводят к необходимости постоянного совершенствования средств и методов определения и прогнозирования параметров вращения Земли. Параметр “всемирное время”, характеризующий фазу вращения Земли, в наибольшей степени среди других влияет на точность координатно-временных определений. В данной статье приводится описание применения метода сингулярного спектрального анализа к прогнозированию временных рядов параметров вращения Земли. Предлагается модификация базового метода, направленная на повышение точности прогноза. Выполнены сравнительные оценки точности прогнозов всемирного времени, рассчитанных методом сингулярного спектрального анализа, с аналогичными прогнозами Международной службы вращения Земли. Показана целесообразность применения метода сингулярного спектрального анализа для прогнозирования на интервалы более 50 дней.

Ключевые слова: прогнозирование, вращение Земли, спектральный сингулярный анализ.

Цитирование: Гречкосеев А.К., Толстикова А.С., Тиссен В.М., Карманов В.С., Ваганова А.И. Модификация базового метода сингулярного спектрального анализа для повышения точности прогнозирования неравномерности вращения Земли. Вычислительные технологии. 2020; 25(3):54–65.

Введение

С появлением и развитием в последние десятилетия новых методов космической и физической геодезии на порядки повысились точность и скорость определения местоположения наземных объектов. Современные глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) предоставляют широкие возможности для синхронизации часов в разных частях земного шара, отслеживания пути и скорости движения наземного и воздушного транспорта, беспилотной посадки самолетов и во многих других сферах прикладной деятельности человека. Эффективность работы ГНСС определяется в том числе

точностью представляемых данных о параметрах вращения Земли (ПВЗ), задающих положение Земли в пространстве на текущее время. Полный набор ПВЗ включает в себя универсальное всемирное время UT1, координаты Северного полюса x_p и y_p и постоянные члены нутации ψ и прецессии ε . Из них всемирное время и координаты полюса, характеризующие соответственно текущие фазу суточного вращения Земли и точку пересечения ее оси вращения на земной поверхности, считаются основными. Отклонения $d\psi$ и $d\varepsilon$ текущего направления оси вращения Земли в пространстве от средних значений ψ и ε , рассчитываемые с помощью детально разработанной теории лунно-солнечных приливов в океане и твердой поверхности, относятся к дополнительным параметрам [1]. Несмотря на то что явление прецессии наиболее значительно по своей величине (50.3 угл. с за год), в настоящее время проблем с ее учетом не возникает, поскольку для вычисления прогнозов используются достаточно точные аналитические выражения. Поэтому проблему высокоточного прогнозирования ПВЗ с необходимой для практики точностью принято относить только к координатам полюса и неравномерности вращения Земли.

С помощью ПВЗ осуществляется переход от вращающейся земной системы координат, закрепленной координатами Северного полюса и гринвичского меридиана, к инерциальной небесной системе координат, в которой описывается движение искусственных и естественных небесных тел, в том числе и аппаратов ГНСС. С развитием методов длинно-базисной радиоинтерферометрии в качестве опорных точек для построения инерциальной системы координат стали использоваться наиболее удаленные объекты в видимой части Вселенной — квазары [1, 2].

Повышение интереса к прогнозам ПВЗ в последние десятилетия связано в том числе и с задачами эфемеридно-временного обеспечения ГНСС в режиме расчета эфемерид и неравномерности вращения Земли для навигационного радиосигнала на борту навигационного космического аппарата с использованием бортовой модели ПВЗ, рассчитанной в наземном сегменте навигационной системы и заложенной на борт [2, 3].

Основная проблема в создании адекватных моделей вращения Земли связана с неоднозначностью выбора аппроксимирующих функций и применяемых методов для моделирования различных по длительности и амплитуде изменений временных рядов ПВЗ, вызываемых различными природными процессами на поверхности Земли и в ее недрах. Главными влияющими факторами являются приливные влияния Солнца и Луны, перенос воздушных масс, таяние ледников, морские течения, динамическое взаимодействие оболочек Земли [4].

Сложный характер вращения Земли приводит к трудностям при разработке адекватных моделей прогноза ПВЗ, которые можно было бы применять длительное время для вычисления прогнозов на любые сроки. Следует отметить, что развитие методов прогнозирования временных ПВЗ происходит в двух направлениях — анализ статистических закономерностей в исследуемых рядах ПВЗ и создание численно-аналитических моделей вращения Земли. Каждый из подходов сталкивается со своими проблемами. В численно-аналитических методах необходимо иметь данные о распределении масс внутри Земли и физических процессах, происходящих на ее поверхности и в атмосфере. Эти данные являются исходными при составлении дифференциальных уравнений и их последующего интегрирования в принятых моделях вращения Земли. При анализе статистических закономерностей возникает проблема выбора моделей прогнозирования.

Официальным мировым поставщиком данных о ПВЗ является Международная служба вращения Земли (МСВЗ, International Earth Rotation and Reference Systems

Service, IERS) [5, 6]. Расчетные значения ПВЗ, полученные в результате совокупной обработки данных от всех имеющихся средств наблюдений за ПВЗ, а также их прогнозы до 90 дней регулярно обновляются на сайтах IERS.

В нашей стране проблемами прогнозирования ПВЗ занимаются многие учреждения, такие как Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (г. Москва), Пулковская обсерватория и Институт прикладной астрономии РАН (г. Санкт-Петербург), Сибирский научно-исследовательский институт метрологии (г. Новосибирск) и другие институты астрономического и метрологического профиля. Для прогнозирования применяются различные методы: фурье-анализ, метод наименьших квадратов, регрессионный и дисперсионный анализ, модели Бокса — Дженкинса, вейвлет-анализ, фильтр Калмана, нейронные сети и другие классические и новые методы.

Метод сингулярного спектрального анализа (Singular Spectrum Analysis, SSA) совмещает в себе достоинства спектрального и регрессионного анализов, а также многих других методов [7–9]. Он позволяет представить сложную структуру ряда в виде разложения на простые компоненты, которые могут быть интерпретированы как медленные тренды, периодические, квазипериодические и шумовые составляющие нестабильностей вращения Земли [10, 11]. Для достижения более точных результатов используются сочетания методов, например SSA и модели Бокса — Дженкинса (ARMA).

Метод SSA не требует стационарности ряда, знания модели тренда, сведений о наличии в ряде периодической составляющей, так как может адаптивно настраиваться на закономерности в данных и выделять содержательно интерпретируемые компоненты из исходного ряда [8]. Базовый алгоритм метода основывается на трех этапах: разложения, восстановления и прогнозирования. Рассмотрим алгоритм SSA более детально.

1. Постановка задачи прогнозирования

Имеется временной ряд $\mathbf{F} = (f_1, f_2, \dots, f_N)$ длиной N , где членом ряда является либо выбранная координата Северного полюса Земли, либо разность между универсальным и координированным временем $dUT = UT1 - UTC$. Требуется получить M прогнозных значений ряда на заданную длину интервала.

2. Описание базового метода

1-й этап: разложение

Процедура разложения состоит в переводе исходного временного ряда \mathbf{F} длиной N в последовательность векторов, на основе которых строится траекторная матрица X .

Выбирается целочисленный параметр L — так называемая длина окна, $1 < L < N$. Перемещением окна по ряду строится траекторная матрица X , столбцами которой являются скользящие отрезки ряда длиной L [7–9]:

$$X = (x_{ij})_{\substack{i=1\dots L \\ j=1\dots K}} = \begin{pmatrix} f_1 & f_2 & f_3 & \dots & f_K \\ f_2 & f_3 & f_4 & \dots & f_{K+1} \\ f_3 & f_4 & f_5 & \dots & f_{K+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_L & f_{L+1} & f_{L+2} & \dots & f_N \end{pmatrix}.$$

Следующий шаг — это сингулярное разложение траекторной матрицы X в сумму элементарных матриц, в основе которого лежит рекуррентная процедура — поиск наилучшего приближения произвольной $m \times n$ -матрицы $X = (x_{ij})$ матрицей вида $\mathbf{b} \mathbf{a}^T = (b_i a_j)$ (где \mathbf{b} — m -мерный вектор-столбец, а \mathbf{a} — n -мерный вектор-столбец) методом наименьших квадратов [12, 13]:

$$F(\mathbf{b}, \mathbf{a}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_{ij} - b_i a_j)^2 \rightarrow \min.$$

Решение этой задачи выполняется последовательными итерациями по явным формулам. При фиксированном векторе $\mathbf{a} = (a_j)$ значения $\mathbf{b} = (b_i)$, доставляющие минимум форме $F(\mathbf{b}, \mathbf{a})$, однозначно и явно определяются из равенств

$$\frac{\partial F}{\partial b_i} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial b_i} = - \sum_{j=1}^n (x_{ij} - b_i a_j) a_j = 0, \quad b_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} a_j / \sum_{j=1}^n a_j^2.$$

Аналогично при фиксированном векторе $\mathbf{b} = (b_i)$ определяются значения вектора $\mathbf{a} = (a_j)$.

Векторы \mathbf{a} и \mathbf{b} находятся рекуррентным методом: в качестве начального приближения вектора \mathbf{a} выбирается случайный вектор единичной длины, вычисляется вектор \mathbf{b} , далее для этого вектора \mathbf{b} вычисляется вектор \mathbf{a} и т. д. Каждый шаг уменьшает значение $F(b_i, a_j)$. Повторяем до тех пор, пока $\Delta F(b_i, a_j)$ не остается больше заданного значения точности.

В результате для матрицы $X = (x_{ij})$ на первом шаге получим наилучшее приближение матрицей P_1 вида $\mathbf{b}^1 \cdot \mathbf{a}^1 = (b_i^1 a_j^1)$. Далее, из матрицы X вычитаем полученную матрицу P_1 , и для полученной матрицы уклонений $X_1 = X - P_1$ вновь ищем наилучшее приближение P_2 этого же вида и т. д., пока норма X_q не станет достаточно малой. Таким образом, получим итерационную процедуру разложения матрицы X в виде суммы матриц ранга 1, т. е. $X = P_1 + P_2 + \dots + P_q$ (здесь $P_r = \mathbf{b}^r \cdot \mathbf{a}^r$, $r = 1, \dots, q$).

Положим $\lambda_r = |\mathbf{a}^r| |\mathbf{b}^r|$ и нормируем векторы $\mathbf{u}^r = \mathbf{a}^r / |\mathbf{a}^r|$, $\mathbf{v}^r = \mathbf{b}^r / |\mathbf{b}^r|$. В результате получим сингулярное разложение $X = U \Sigma V^T$, где $U_{L \times L}$ и $V_{K \times K}$ — матрицы соответственно правых и левых собственных векторов матрицы X ; $\Sigma_{L \times K}$ — прямоугольная диагональная матрица, по главной диагонали которой находятся сингулярные значения матрицы X .

С помощью сингулярного разложения матрицы X формируются так называемые собственные тройки $(\sqrt{\lambda_i}, \mathbf{U}_i, \mathbf{V}_i)$, где λ_i — собственные числа матрицы XX^T .

2-й этап: восстановление

Выберем число $d = \max\{i : \lambda_i > \delta\}$ — количество положительных собственных чисел, больших, чем заданное значение δ , которое является параметром метода и определяет точность модели.

Проведем процедуру группировки множества индексов $\{1, \dots, d\}$ на m непересекающихся подмножеств I_1, \dots, I_m . Обычно группировка производится на основе близости значений собственных чисел матрицы X . Номера близких собственных значений попадают в одну группу, разложение на элементарные матрицы X записывается в виде суммы элементарных матриц, индексы которых входят в одну группу. Тогда результирующая матрица X_{I_l} , соответствующая группе $I_l = \{i_1, \dots, i_p\}$, $l = 1, \dots, m$, определяется как $X_{I_l} = X_{i_1} + \dots + X_{i_p}$.

Такие матрицы вычисляются для всех групп $I \in \{I_1, \dots, I_m\}$, тем самым разложение траекторной матрицы в сумму элементарных матриц может быть записано в сгруппированном виде

$$X = X_{I_1} + \dots + X_{I_m}.$$

На последнем шаге каждая матрица сгруппированного разложения переводится в новый ряд g_1, \dots, g_N длины N с использованием диагонального усреднения:

$$f_k = \begin{cases} \frac{1}{k} \sum_{m=1}^k x_{m,k-m+1}^*, & \text{для } 1 \leq k < L^*; \\ \frac{1}{L^*} \sum_{m=1}^{L^*} x_{m,k-m+1}^*, & \text{для } L^* \leq k \leq K^*; \\ \frac{1}{N-k+1} \sum_{m=k-K^*+1}^{N-K^*+1} x_{m,k-m+1}^*, & \text{для } K^* < k \leq N; \end{cases}$$

где $L^* = \min(L, K)$, $K^* = \max(L, K)$, $x_{ij}^* = x_{ij}$, если $L < K$, и $x_{ij}^* = x_{ji}$ иначе.

Применяя диагональное усреднение к результирующим матрицам X_{I_k} , получаем ряды $\tilde{F}^{(l)} = (\tilde{f}_1^{(l)}, \dots, \tilde{f}_N^{(l)})$, каждый из которых соответствует содержательно интерпретируемой компоненте исходного ряда, — тренд (чаще всего в виде полинома), гармонические составляющие и пр., в зависимости от группировки элементарных матриц по близости собственных значений. Их сумма представляет собой непараметрическую модель исходного ряда $\tilde{F} = (\tilde{f}_1, \dots, \tilde{f}_N) = \tilde{F}^{(1)} + \tilde{F}^{(2)} + \dots + \tilde{F}^{(m)}$, точность которой определяется заданными параметрами L и d .

3-й этап: прогнозирование

Прогноз значений временного ряда $G_{N+M} = (g_{N+1}, \dots, g_{N+M})$ производится по рекуррентной формуле

$$g_i = \begin{cases} \tilde{f}_i, & \text{для } i = 1, \dots, N, \\ \sum_{j=1}^{L-1} a_j g_{i-L+j}, & \text{для } i = N+1, \dots, N+M, \end{cases} \quad (1)$$

при этом вектор коэффициентов $\mathbf{A} = (a_1, \dots, a_{L-1})$ может быть представлен в виде

$$\mathbf{A} = \frac{\sum_{i=1}^d \text{Last}(\mathbf{U}_i) \cdot \text{First}(\mathbf{U}_i)}{1 - \sum_{i=1}^d \text{Last}(\mathbf{U}_i)^2}. \quad (2)$$

Здесь $\text{First} : R^L \rightarrow R^{L-1}$ — оператор проектирования, оставляющий первые $L-1$ координат исходного вектора; $\text{Last} : R^L \rightarrow R^1$ — оператор проектирования, оставляющий последнюю координату исходного вектора; \mathbf{U}_i — левый собственный вектор матрицы X ; d — количество собственных векторов, выбираемых в качестве базиса траекторного пространства ряда (для исключения вырожденного случая требуется выполнение условия $d < L$) [14].

3. Результаты прогнозирования

Применим базовый метод SSA к получению модели прогноза ПВЗ (рис. 1).

Данные о рядах ПВЗ взяты на сайте MCBЗ [15].

MJD	Year	Month	Day	Type	x_pole	sigma_x_p	y_pole	sigma_y_p	Type	UT1-UTC
58792	2019	11	5	final	0.163139	0.000091	0.278229	0.000092	final	-0.1592849
58793	2019	11	6	final	0.162359	0.000092	0.277972	0.000090	final	-0.1594606
58794	2019	11	7	final	0.161470	0.000092	0.277875	0.000091	final	-0.1597884
58795	2019	11	8	prediction	0.160403	0.000601	0.277745	0.000401	prediction	-0.1602838
58796	2019	11	9	prediction	0.159242	0.000893	0.277598	0.000660	prediction	-0.1609189
58797	2019	11	10	prediction	0.157982	0.001125	0.277412	0.000884	prediction	-0.1616238
58798	2019	11	11	prediction	0.156641	0.001325	0.277182	0.001087	prediction	-0.1623334

Рис. 1. Данные службы MCBЗ (фрагмент) / Fig. 1. A piece of IERS service data

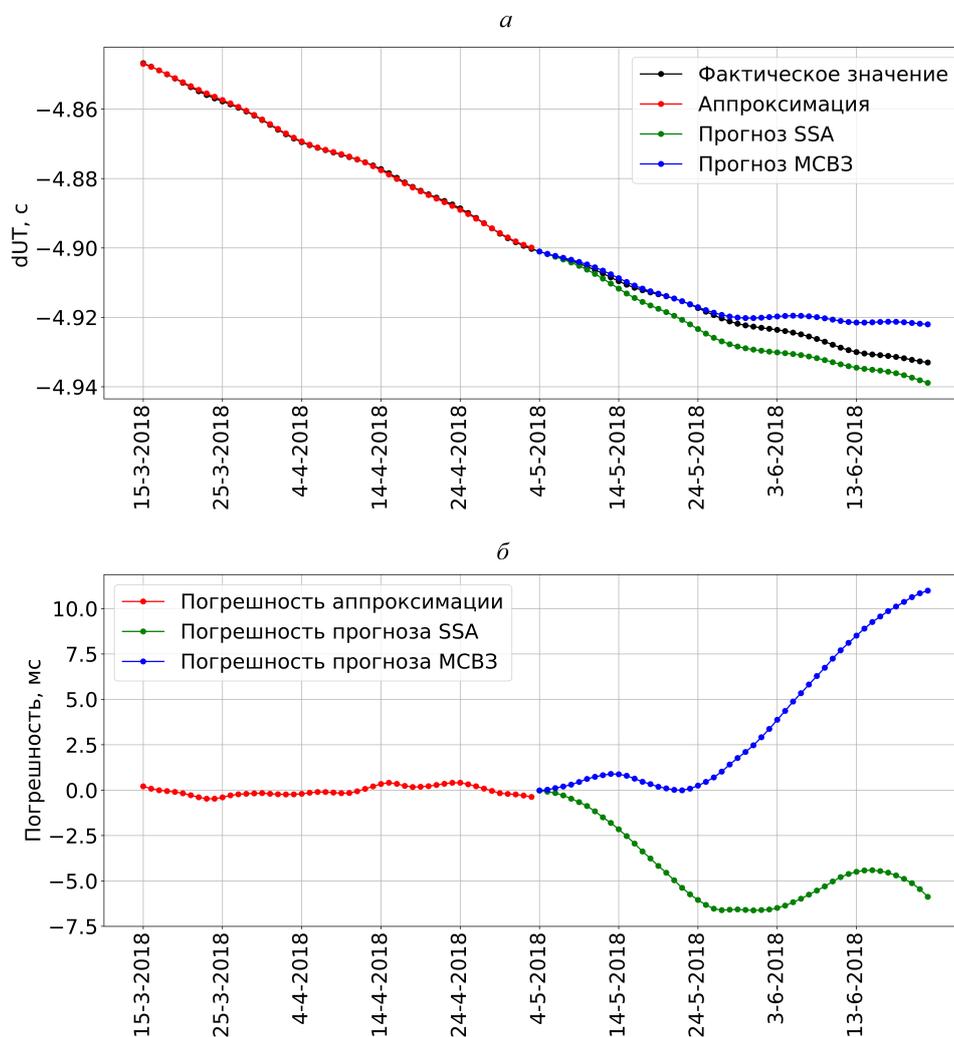


Рис. 2. Данные прогноза dUT методом SSA и методами MCBЗ на участке ряда, близком к линейному: *a* – прогнозирование, *б* – погрешность прогнозирования

Fig. 2. Comparison of the dUT forecast obtained with the SSA method and the IERS methods; the part of the series is approximately linear: *a* – forecast, *б* – error of the forecast

Временной ряд представляет собой последовательность координат Северного полюса или величин прогнозируемой разницы $dUT = UT1 - UTC$, где $UT1$ — универсальное время, UTC — всемирное координированное время. Значения взяты на период с 01.01.2014 по 01.01.2019. Поскольку наиболее значительная погрешность прогнозирования наблюдается у dUT , в дальнейшем моделирование проводим только для этой величины.

Выполним прогноз значений dUT на участке ряда, близком к линейному (на интервале 50 сут. 04.05.2018–23.06.2018), и сравним с прогнозами МСВЗ (рис. 2). Анализируя характер прогнозов, можно отметить, что расхождение краткосрочного прогноза методом SSA от действительных значений dUT практически линейно возрастает до 6 мс в течение 20 сут., в то время как расхождение прогноза МСВЗ на этом участке не превосходит 1 мс. Однако в течение следующих 30 сут. ситуация меняется на противо-

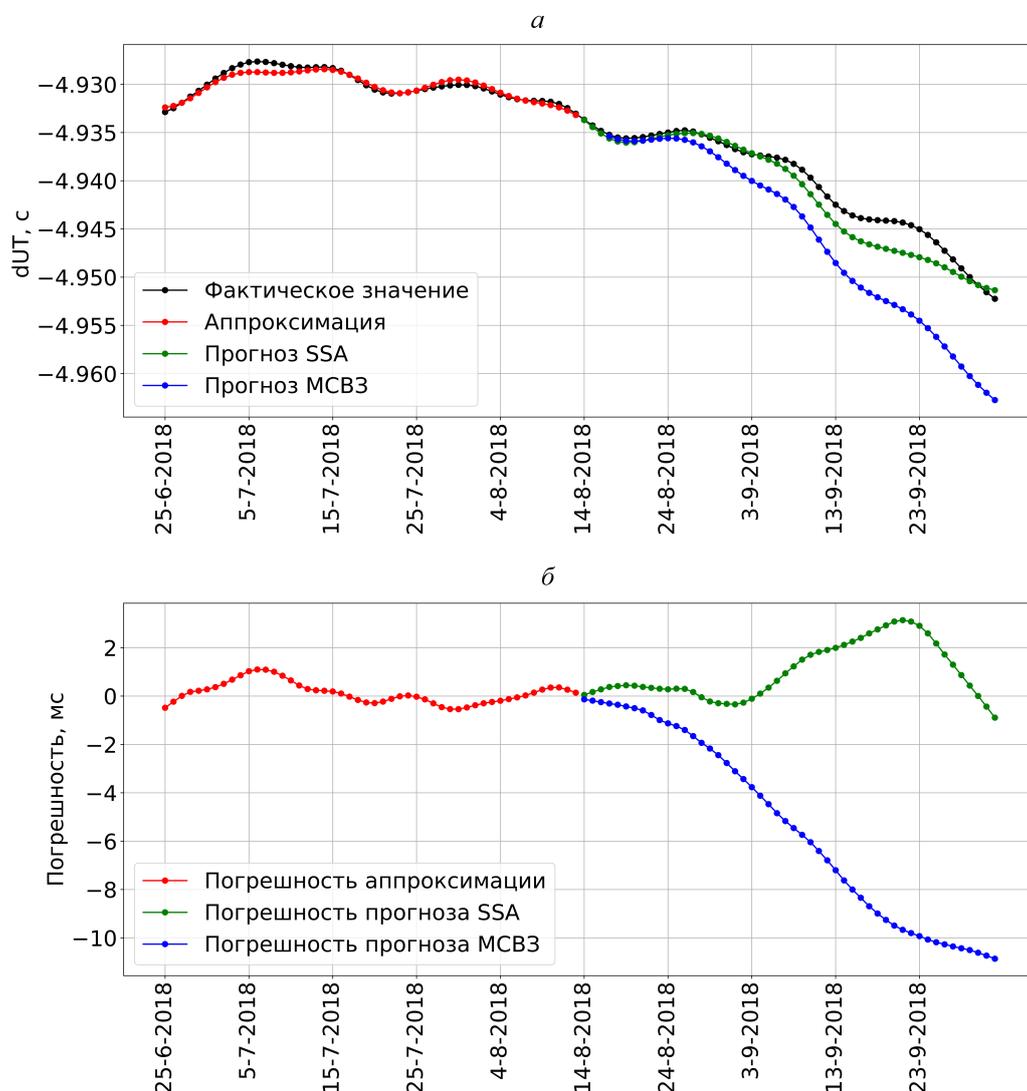


Рис. 3. Данные прогноза dUT методом SSA и методами МСВЗ на нелинейном участке ряда: *a* — прогнозирование, *b* — погрешность прогнозирования

Fig. 3. Comparison of the dUT forecast obtained with the SSA method and the IERS methods for the nonlinear part of the series: *a* — forecast, *b* — error of the forecast

положную. Расхождение прогноза МСВЗ линейно возрастает и на пятидесятые сутки достигает 10 мс, а по SSA по-прежнему остается в пределах 6 мс.

Вычислим dUT методом SSA на участке ряда со сложной нелинейной зависимостью (на интервале 50 сут. 14.08.2018–3.10.2018) и сравним с прогнозами МСВЗ (рис. 3). На этом участке ряда прогнозирование методом SSA имеет более высокую точность в течение первых двадцати суток, уменьшение точности модели происходит медленнее.

Из рис. 2 и 3 видно, что метод SSA уступает в точности краткосрочному прогнозу МСВЗ (на 5–10 сут.), но показывает лучший результат при прогнозах на интервале 20–50 сут., причем на линейных и нелинейных участках точность различна.

Сравним погрешность прогнозов методов МСВЗ и SSA на большом числе реализаций.

4. Методика сравнения точности прогноза

Были взяты данные за период с 01.01.2015 по 31.12.2018 (количество реализаций равно 1461, так как сдвиг окна выполнялся с дискретностью одни сутки), ширина окна для выборки данных $N = 5000$ сут., параметр метода SSA (ширина окна для построения траекторной матрицы) $L = 730$ сут., длина интервала прогнозирования $M = 100$ сут., $\delta = 10^{-4}$. Погрешность оценивалась по уровню вероятности 0.95 (5% худших результатов отброшено). В таблице приведены результаты сравнения точности прогноза методов МСВЗ и SSA. Видно, что прогнозы МСВЗ в среднем являются более точными на интервале прогнозирования до 100 сут. Как показали исследования, точность прогноза можно повысить за счет модификации базового алгоритма SSA.

5. Модификация базового метода SSA

Достоинствами метода SSA являются его параметризация и возможность настройки. Варьируя несколько параметров, можно добиться повышения точности и устойчивости метода, степени его адаптивности к данным. Также метод допускает возможность различных его модификаций.

Опишем применяемую в данной работе модификацию базового метода. В стандартном подходе при проверке статистических выводов выборка разбивается на две части —

Максимальная (по уровню вероятности 0.95) абсолютная погрешность прогноза SSA и службы МСВЗ (мс). Лучшие результаты по сравнению с методами МСВЗ выделены / The highest absolute error (for the probability level equal to 0.95) for the SSA forecast and for the IERS service. The results, which are better than the ones obtained with IERS methods, are highlighted

Метод	Сутки прогноза									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
МСВЗ	1.95	5.70	8.58	10.78	14.50	18.09	21.98	26.82	30.86	32.63
Базовый SSA	2.66	6.10	8.80	11.50	15.03	17.88	21.38	24.85	28.45	35.36
Модифицированный SSA	2.35	6.02	8.63	11.12	14.35	17.32	21.07	24.57	28.13	32.59

обучающую, по которой происходит оценка параметров модели и контрольную, по которой происходит проверка адекватности модели.

В данной версии метода выборка делится на три части — обучающую, калибровочную и контрольную. По обучающей выборке происходит оценка структуры и параметров модели (идентификация модели). На калибровочной выборке делается прогноз по модели, происходит оценка точности прогноза и далее производится уточнение вектора параметров прогнозной модели (2) с использованием функционала минимума среднеквадратичной ошибки, усредненной по множеству реализаций:

$$\tilde{\mathbf{A}} = \min_{\mathbf{A}} \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R (g_i - \tilde{g}_i(\mathbf{A}))^2, \quad (3)$$

где g_i — апостериорные значения dUT на интервале калибровки, $\tilde{g}_i(\mathbf{A})$ — прогнозные значения dUT по формулам (1), (2). На контрольной выборке происходит верификация модели — прогнозирование временного ряда с уточненным значением вектора параметров (3) и вычисление погрешности прогноза.

Проверим точность метода на тех же данных. При этом для достижения лучшего результата были подобраны оптимальные значения параметров метода — ширина окна для выборки данных $N = 1000$ сут., первые 900 значений выбраны в качестве обучающей выборки, последние 100 значений использованы для калибровки модели. В качестве контрольной выборки взяты следующие 100 значений временного ряда. Результаты сравнения с базовым методом SSA и методом МСВЗ приведены в таблице. Видно, что модифицированный алгоритм показывает точность выше, чем базовый, практически на всех интервалах прогнозирования, а также показывает точность выше, чем МСВЗ, на интервалах прогнозирования от 50 до 100 дней.

Представляют интерес дальнейшие исследования, связанные с вопросами применения данного метода к прогнозам рядов ПВЗ, другие его модификации, а также валидация построенных моделей, т. е. прогноз не на исторических, а на неизвестных данных (прогноз “вперед” и последующее сравнение с фактическим значением).

Приведенные в данной работе исследования выполнялись с использованием программного обеспечения, разработанного в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ) совместно со специалистами из Сибирского НИИ метрологии (СНИИМ).

Выводы

Рассмотрен метод спектрального сингулярного анализа для прогнозирования параметров вращения Земли. Предложена модификация базового метода, направленная на повышение точности прогноза. Прогноз dUT, полученный с помощью SSA, может конкурировать по точности с прогнозами Международной службы вращения Земли. Кроме того, имеется дальнейший потенциал повышения точности прогнозирования путем проведения дополнительных исследований на предмет влияния выбора параметров метода (ширина окна, количество выбираемых собственных троек и способ группировки элементарных матриц), а также путем применения комбинации методов (SSA совместно с преобразованием Фурье, методом наименьших квадратов, авторегрессионными моделями и др.).

Список литературы

- [1] Пасынок С.Л. Методы и средства определения параметров вращения Земли. Альманах современной метрологии. 2016; 3(8):269–323.
 - [2] Бартенева В.А., Гречкосеев А.К., Козорез Л.А., Красильщиков М.Н. и др. Современные и перспективные информационные ГНСС-технологии в задачах высокоточной навигации. Под ред. В.А. Бартенева, М.Н. Красильщикова. М.: Физматлит; 2014:192.
 - [3] Толстикова А.С., Тиссен В.М. Параметры вращения Земли в задачах эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС и результаты, достигнутые в их прогнозировании. Мир измерений. 2012; (6):43–49.
 - [4] Тиссен В.М., Толстикова А.С., Балахненко А.Ю. Применение гармонической модели вращения Земли для целей высокоточного прогнозирования всемирного времени в интересах ГНСС ГЛОНАСС. ГЕО-СИБИРЬ. 2009; 1(2):290–294.
 - [5] International Earth Rotation Service (IERS) service international de la rotation terrestre. Available at: <http://hpiers.obspm.fr/eoppc/bul/bulb/explanatory.html> (accessed 15.01.2020).
 - [6] International Earth rotation and reference systems service. Available at: <https://www.iers.org/IERS/EN/Links/IERS/IERS.html> (accessed 15.01.2020).
 - [7] Ефимов В.М., Галактионов Ю.К., Шушпанова Н.Ф. Анализ и прогноз временных рядов методом главных компонент. Новосибирск: Наука; 1988: 70.
 - [8] Golyandina N., Korobeynikov A., Zhigljavsky A. Singular spectrum analysis with R. Berlin; Heidelberg: Springer; 2018: 272. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57380-8>
 - [9] Голяндина Н.Э. Метод “Гусеница”-SSA: анализ временных рядов: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ.; 2004: 76.
 - [10] Горшков В.Л., Миллер Н.О. Прогнозирование параметров вращения земли с помощью сингулярного спектрального анализа. Известия ГАО РАН. 2009; 219(1):91–100.
 - [11] Балахненко А.Ю., Ваганова А.И., Карманов В.С., Тиссен В.М., Толстикова А.С. Автоматизация процесса прогнозирования параметров вращения земли для нужд эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС. Материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (11–15 ноября 2019, Красноярск), в 2-х ч. Красноярск: Изд-во СибГУ; 2019: (2):141–143. Адрес доступа: <https://disk.sibsau.ru/index.php/s/L9sHG1DFLhGZbCх>
 - [12] Gentle J.E. Singular Value Factorization. §3.2.7 in Numerical Linear Algebra for Applications in Statistics. Berlin: Springer-Verlag; 1998: 102–103.
 - [13] Nash J.C. The Singular-Value Decomposition and Its Use to Solve Least-Squares Problems. Ch. 3 in Compact Numerical Methods for Computers: Linear Algebra and Function Minimisation. 2nd ed. Bristol, England: Adam Hilger; 1990: 30–48.
 - [14] Голяндина Н.Э. Метод “Гусеница”-SSA: прогноз временных рядов: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ; 2004: 52.
 - [15] Earth orientation data. Available at: <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html> (accessed 15.01.2020).
-

The modification of the singular spectral analysis basic method for improving the accuracy of forecasting the irregularity of the Earth rotationGRECHKOSEEV ALEKSANDR K.¹, TOLSTIKOV ALEKSANDR S.², TISSEN VIKTOR M.²,
KARMANOV VITALIY S.^{3,*}, VAGANOVA ANNA I.³¹JSC Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems, 662972, Zheleznogorsk, Russia²Siberian Metrological Scientific-Research Institute, 630004, Novosibirsk, Russia³Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia

*Corresponding author: Karmanov Vitaliy S., e-mail: karmanov@corp.nstu.ru

Received March 10, 2020, revised March 23, 2020, accepted April 10, 2020

Abstract

Growing demand for accuracy of coordinate-time determinations from both many applied Earth sciences and practical problems requires the continuous improvement of means and methods for determining and predicting the parameters of the Earth rotation. Parameter “World time” characterizes phase of the Earth’s rotation and mostly affects the accuracy of coordinate-time determinations. This article describes application of method of singular spectral analysis for forecasting the time series of the Earth’s rotation parameters. We propose modification of basic method, which aims at increasing forecast accuracy. We made comparative estimates for accuracy of world time forecasts calculated by the method of singular spectral analysis with similar forecasts by the International Earth Rotation Service. The expediency of using the method of singular spectral analysis for predicting intervals of more than 50 days is shown.

Keywords: prediction, Earth rotation, spectral singular analysis.

Citation: Grechkoseev A.K., Tolstikov A.S., Tissen V.M., Karmanov V.S., Vaganova A.I. The modification of the singular spectral analysis basic method for improving the accuracy of forecasting the irregularity of the Earth rotation. Computational Technologies. 2020; 25(3):54–65. (In Russ.)

References

1. Pasyok S.L. Determining the parameters of the Earth’s rotation. Al’manac of Modern Metrology. 2016; 3(8):269–323. (In Russ.)
2. Bartenev V.A., Grechkoseyev A.K., Kozorez L.A., Krassilchtchikov M.N. et al. Sovremennye i perspektivnye informatsionnye GNSS-tehnologii v zadachakh vysokotochnoy navigatsii [Modern and perspective GNSS information technologies in high-precision navigation problems]. Eds. V.A. Bartenev, M.N. Krassilchtchikov. Moscow: Fizmatlit; 2014:192. (In Russ.)
3. Tolstikov A.S., Tissen V.M. Earth rotary parameters in GLONASS ephemeris time support objectives and outcomes of their prediction. Mir Izmereniy. 2012; (6):43–49. (In Russ.)
4. Tissen V.M., Tolstikov A.S., Balakhnenko A.Yu. Application of Earth rotation harmonic model for accurate forecasting of universal time in the interests of GNSS GLONASS. GEO-SIBIR. 2009; 1(2):290–294. (In Russ.)
5. International Earth Rotation Service (IERS) service international de la rotation terrestre. Available at: <http://hpiers.obspm.fr/eoppc/bul/bulb/explanatory.html> (accessed 15.01.2020).
6. International Earth rotation and reference systems service. Available at: <https://www.iers.org/IERS/EN/Links/IERS/IERS.html> (accessed 15.01.2020).
7. Efimov V.M., Galaktionov Yu.K., Shushpanova N.F. Analiz i prognoz vremennykh ryadov metodom glavnnykh komponent [Analysis and forecast of time series by the method of principal components]. Novosibirsk: Nauka; 1988: 70. (In Russ.)

8. Golyandina N., Korobeynikov A., Zhigljavsky A. Singular Spectrum Analysis with R. Berlin; Heidelberg: Springer; 2018: 272. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57380-8>
9. Golyandina N. Metod “Gusenitsa”-SSA: analiz vremennykh ryadov: Ucheb. posobie [Method “Caterpillar”-SSA: analysis of time series: Textbook]. SPb: Izd-vo SPbGU; 2004: 76. (In Russ.)
10. Gorshkov V.L., Miller N.O. The forecasting of earth orientation parameters by singular spectrum analysis. Izvestiya GAO RAN. 2009; 219(1):91–100. (In Russ.)
11. Balakhnenko A.Yu., Vaganova A.I., Karmanov V.S., Tissen V.M., Tolstikov A.S. Automation of the process of forecasting the parameters of the Earth’s rotation for the needs of ephemeris-time GLONASS support. Materials of the XXII Intern. Scientific Conf. “RESHETNEV READINGS”. November 11–15, 2019, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Izd-vo SibGU; 2019; (2):141–143. Available at: <https://disk.sibsau.ru/index.php/s/L9sHG1DFLhGZbCx> (In Russ.)
12. Gentle J.E. Singular Value Factorization. §3.2.7 in Numerical Linear Algebra for Applications in Statistics. Berlin: Springer-Verlag; 1998: 102–103.
13. Nash J.C. The Singular-Value Decomposition and Its Use to Solve Least-Squares Problems. Ch. 3 in Compact Numerical Methods for Computers: Linear Algebra and Function Minimisation. 2nd ed. Bristol, England: Adam Hilger; 1990: 30–48.
14. Golyandina N.E. Method “Caterpillar”-SSA: prognoz vremennykh ryadov: Ucheb. posobie. [Method “Caterpillar”-SSA: forecast of time series: Textbook] SPb.: Izd-vo SPbGU; 2004: 52. (In Russ.)
15. Earth orientation data. Available at:
<https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html>