doi:10.31725/0367-7966-2024-232-49-53
Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове, № 232

Изучение прогресса повышения точности прогноза координат небесного полюса за последние 16 лет

З. М. Малкин*

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

Аннотация

Прогноз параметров вращения Земли (ПВЗ), в том числе координат небесного полюса (углов прецессии-нутации), необходим для многих практических приложений. Настоящая работа посвящена исследованию изменения точности прогноза углов прецессии-нутации со временем на протяжении последних 16 лет. Исследование проведено на материале реальных прогнозов, вычисленных в 2007–2022 гг. в Морской обсерватории США (USNO), которая функционирует, как Центр срочной службы и прогнозов Международной службы вращения земли и опорных систем отсчета (IERS), и в ГАО РАН. В результате работы оказалось, что точность прогнозов USNO заметно улучшилась со временем, тогда как явного улучшения точности прогнозов ГАО РАН не наблюдается. При этом можно отметить более высокую точность прогнозов ГАО РАН на всем 16-летнем интервале. Для обоих центров анализа заметно уменьшение зависимости ошибок прогноза от его длины.

Введение

Прогноз параметров вращения Земли (ПВЗ), в том числе координат небесного полюса (углов прецессии-нутации) не так востребован, как прогноз координат полюса Земли и всемирного времени, потому что современная стандартная модель прецессии-нутации МАС (Petit и Luzum, 2010) достаточна для приложений, в которых требуется точность знания положения небесного полюса на уровне 1 мсд (миллисекунды дуги) или около 3 см на поверхности Земли. Для решения задач, требующих более высокой точности, для вычисления координат небесного полюса dX и dY применяется комбинированная модель: модель МАС плюс получаемые из наблюдений поправки к этой модели, которые называются смещениями небесного полюса (celestial pole offsets, СРО). Именно величины СРО вычисляются и распространяются службами ПВЗ, такими как Международная служба вращения Земли и опорных систем отсчета (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS, Vondrák и Richter (2004)). IERS также вычисляет прогнозы ПВЗ, в том числе и прогноз СРО. Оперативные вычисления ПВЗ IERS вычисляются в Центре оперативных решений и прогноза (IERS Rapid Service/Prediction Center[1], Stamatakos, Davis и Shumate (2020)), который работает в Морской обсерватории США (U.S.Naval Observatory, USNO).

В ГАО РАН в рамках экспериментальных исследований также вычисляются прогнозы рядов ПВЗ IERS в оперативном режиме, т.е. в реальном времени, сразу после появления нового решения ПВЗ IERS. Поскольку основные (так называемые *final*) решения публикуются раз в неделю, прогнозы в ГАО РАН также вычисляются еженедельно (как и прогнозы USNO). Таким образом прогнозы USNO и ГАО РАН вычисляются по одним и тем же исходным данным, что делает их сравнение максимально независимым от посторонних факторов. Настоящая работа посвящена исследованию изменения точности прогноза двух центров анализа ПВЗ углов прецессии-нутации со временем по данным прогнозов за последние 16 лет.

*e-mail:malkin@gaoran.ru
[1] https://maia.usno.navy.mil/

1 Использованные данные

В качестве данных для этой работы использованы еженедельные прогнозы СРО, сделанные в ГАО РАН и USNO в период с начала 2007 г. по конец 2022 г., вычисленные в реальном времени и накопленные в соответствующем архиве. Данные 2023 г. здесь не использовались, чтобы обеспечить сравнение прогнозов с точными окончательными значениями ПВЗ. Прогнозы USNO делаются на 90 дней, а прогнозы ГАО РАН на два года (это не имеет практического значения, но интересно в исследовательских целях). Поэтому в настоящем сравнении были использованы первые 90 суток прогнозов ГАО РАН.

Методика прогнозирования ПВЗ в USNO описана в годовых отчетах IERS IERS[2]. Для прогноза ПВЗ ГАО РАН используется ряд СРО (вариант, использованный в настоящей работе, ZM2N), вычисляемый экспоненциальным сглаживанием ряда USNO с учетом весов, определяемых из ошибок ПВЗ. Серия СРО ZM2N, регулярно обновляется и доступна на сайте ГАО РАН[3].

На рис. 1 приведены ряд СРО USNO и ряд СРО автора ZM2N с прогнозом по состоянию на 12 февраля 2024 г.

2 Вычисление ошибок прогнозов ПВЗ

Ошибки прогнозов ПВЗ для каждого центра определялись следующим образом. Пусть мы имеем n прогнозов. Для каждого из них вычисляются разности прогнозных значений с окончательными значениями ПВЗ, в данном случае с окончательным рядом USNO, d_{ij}, где i – номер прогноза в наборе прогнозов данного центра, i=1 . . . n, а j – число дней (длина) прогноза, j=1 . . . 30. Затем могут быть вычислены различные статистики, характеризующие ошибки прогнозов ПВЗ в зависимости от длины прогноза j. В литературе, посвященной сравнению и исследованию точности прогнозов ПВЗ, применяются несколько различных оценок ошибок прогноза (Malkin и Tissen, 2022). В последней работе также проведено сравнение этих оценок и показано, что все оценки, кроме максимальной ошибки, в целом эквивалентны с точностью до постоянного фактора. Для настоящего исследования в качестве оценки точности прогноза были использована средняя абсолютная ошибка, которая в последние годы применяется в проектах IERS по сравнению точности прогнозов в разных центрах вычисления ПВЗ (Kalarus и др., 2010; Kur и др., 2022).

Средняя абсолютная ошибка вычисляется как

$$MAE_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} |d_{ij}|}{n}, \tag{1}$$

Ошибки прогнозов, вычисленные указанным способом, усреднялись по неперекрывающимся двухлетним интервалам. В каждый из них попало примерно одинаковое число прогонов от 93 до 105. Полученные таким образом усредненные ошибки прогнозов приведены на Рис. 2.

3 Заключение

В работе прослежена эволюция точности прогнозов координат небесного полюса, сделанных в международной службе ПВЗ (IERS/USNO) и в ГАО РАН (модель ZM2N) в 2007–2022 годах. Для этого были обработаны 823 прогноза IERS и 814 прогнозов ГАО РАН. В качестве меры точности прогнозов использована средняя абсолютная ошибка, чаще всего используемая в последних работах по этой тематике.

Анализ полученных результатов вычислений, приведенных на Рис. 2, показывает, что точность прогнозов USNO заметно улучшилась со временем, тогда как явного улучшения точности

[2] https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/AnnualReports/AnnualReports.html
[3] http://www.gaoran.ru/english/as/persac/index.htm

doi:10.31725/0367-7966-2024-232-49-53

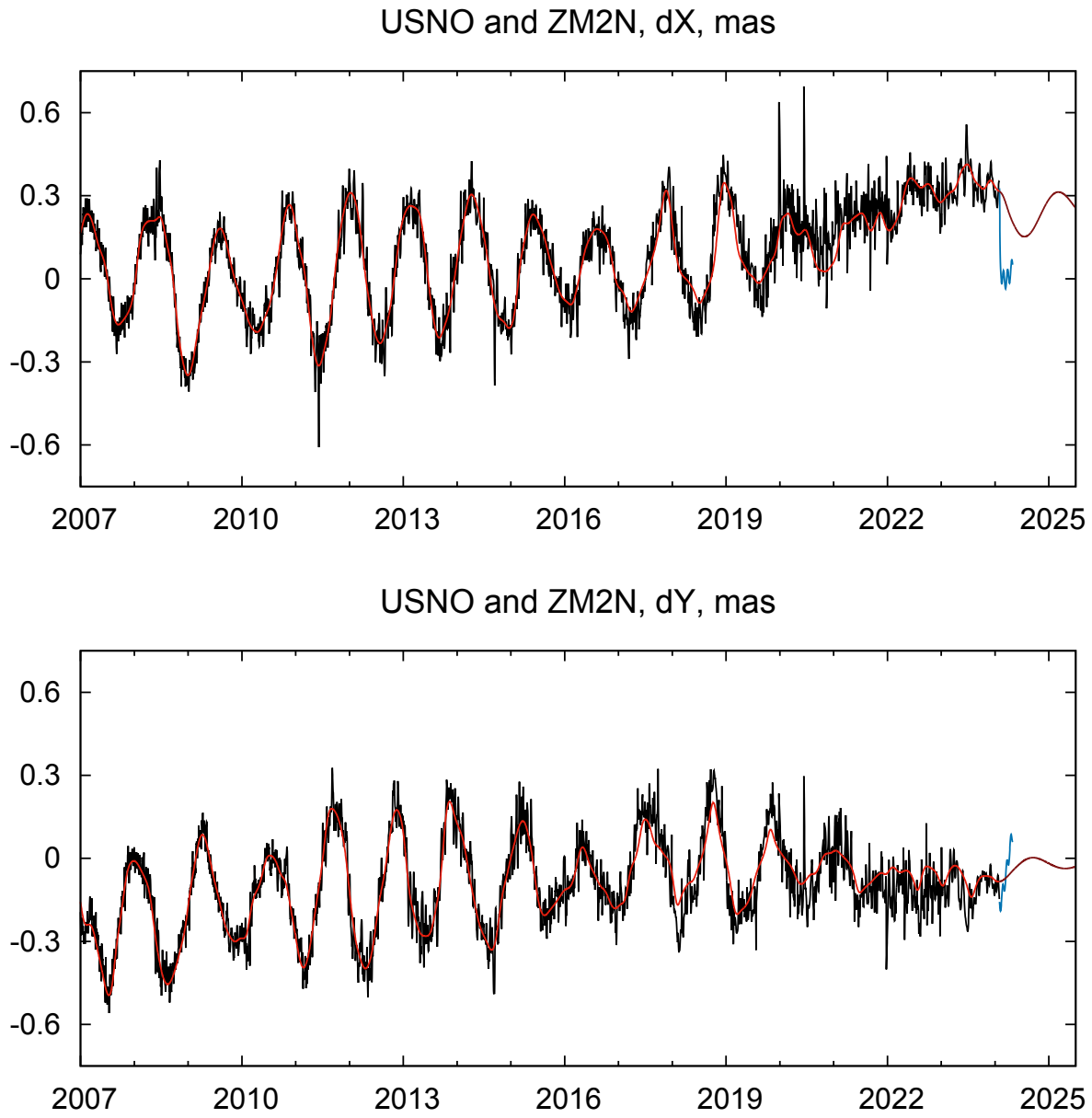

Рис. 1: Ряды СРО USNO (черная линия) и ZM2N (красная линия) с прогнозами (синяя линия для USNO и коричневая линия для ZM2N) по состоянию на 12 февраля 2024 г.

прогнозов ГАО РАН не наблюдается. Для обоих центров анализа заметно уменьшение зависимости ошибки прогноза от его длины. Также можно сделать вывод о более высокой, в целом, точности прогнозов ГАО РАН, хотя разница в качестве прогнозов ГАО РАН и USNO со временем уменьшается. При этом точность краткосрочных прогнозов длиной в несколько дней (наиболее важных для практики) остается практически такой же, тогда как точность более длительных прогнозов существенно улучшилась для обоих центров анализа данных.

Также в данных USNO за последние годы можно заметить разницу между ошибками прогнозов dX и dY, а также значительную разницу в точности краткосрочных и долгосрочных прогнозов. Для более ранних прогнозов USNO и всех прогнозов ZM2N такая зависимость носит плавный характер и уменьшается со временем. Такие изменения в результатах прогнозирования координат небесного полюса в USNO могут быть вызваны, в частности, изменениями во входных данных и алгоритма прогнозирования, используемых в USNO (Stamatakos, Davis и Shumate, 2020).

doi:10.31725/0367-7966-2024-232-49-53

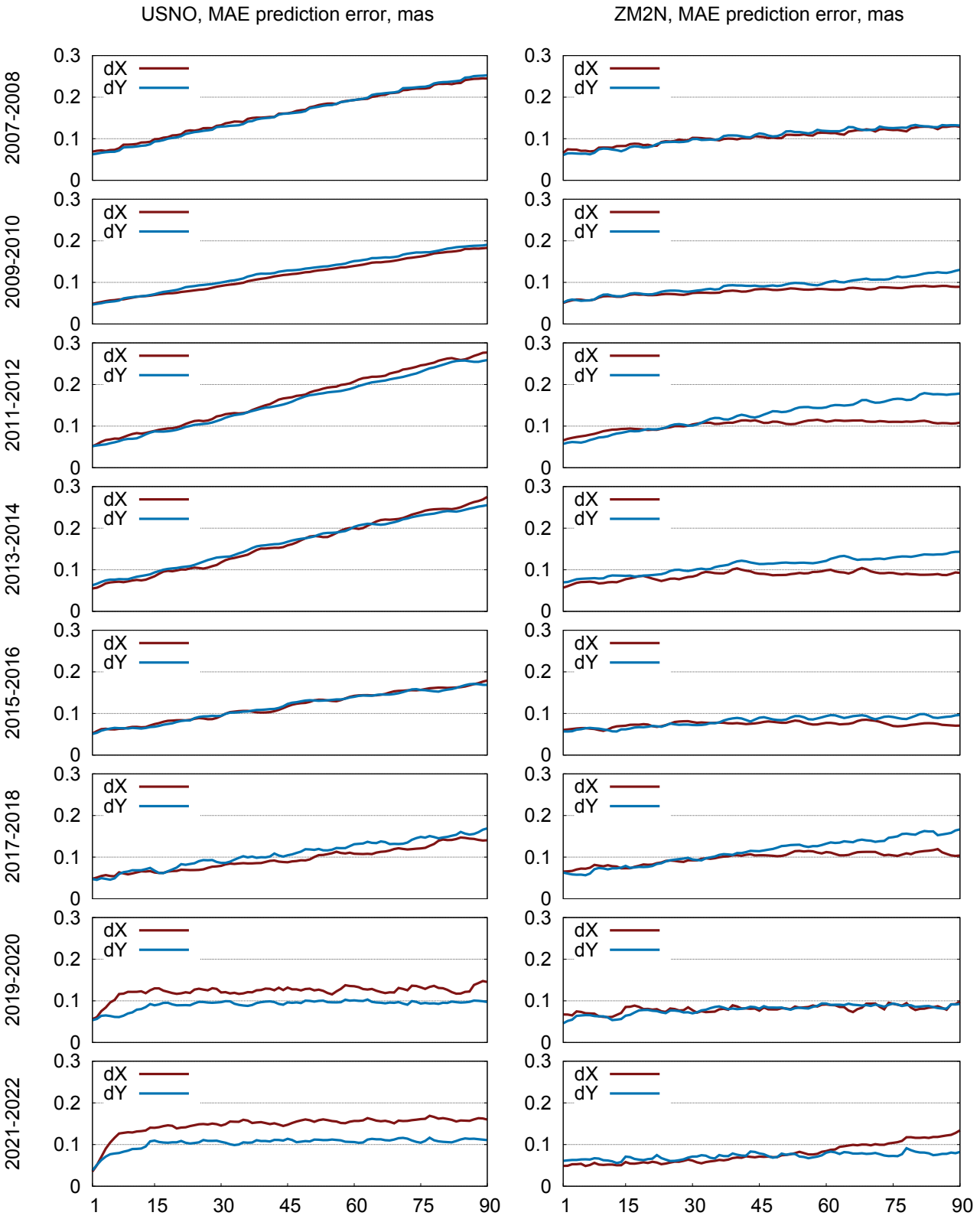

Рис. 2: Ошибки прогнозов USNO (слева) и ГАО РАН (модель ZM2N, справа) на длину до 90 суток. По оси абсцисс дана длина прогноза в сутках, по оси ординат дана средняя абсолютная ошибка прогноза в мсд. Все данные приведены для двухлетних интервалов.

doi:10.31725/0367-7966-2024-232-49-53

Список литературы

Petit, G. и B. Luzum, ред. (2010). *IERS Conventions (2010)*. IERS Technical Note No. 36, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.

Vondrák, Jan и Bernd Richter (2004). International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) web: www.iers.org. *Journal of Geodesy* 77.10-11, с. 585—678.

Stamatakos, N., M. Davis и N. Shumate (2020). IERS Rapid Service / Prediction Center products and services: improvements, changes, and challenges, 2017 to 2019. В: *Astrometry, Earth Rotation, and Reference Systems in the GAIA era*. Под ред. Christian Bizouard, с. 99—105.

Malkin, Z. M. и V. M. Tissen (2022). Comparison of Different Estimates of the Accuracy of Forecasts of the Earth's Rotation Parameters. *Astronomy Reports* 66.1, с. 75—79.

Kalarus, M. и др. (2010). Achievements of the Earth orientation parameters prediction comparison campaign. *Journal of Geodesy* 84.10, с. 587—596.

Kur, Tomasz и др. (2022). Evaluation of selected short-term predictions of UT1-UTC and LOD collected in the second earth orientation parameters prediction comparison campaign. *Earth, Planets and Space* 74.1, с. 191.

Analysis of progress in improving the prediction accuracy of Celestial Pole coordinates over the past 16 years

Z.M. Malkin

[1] Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS

Abstract

The prediction of the Earth's rotation parameters, including the coordinates of the celestial pole (precession-nutation angles), is necessary for many practical applications. This work is devoted to the study of changes in the accuracy of the prediction of precession-nutation angles over time over the past 16 years. This study was conducted on the basis of real predictions computed in 2007–2022 at the U.S. Naval Observatory, which serves as the Center of Rapid Service and Predictions of the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), and at the Pulkovo Observatory. As a result, it turned out that the accuracy of IERS predictions has improved significantly over time, whereas there is no obvious improvement in the accuracy of predictions of the Pulkovo Observatory. For both analysis centers, there is a noticeable decrease in the dependence of prediction errors on its length. It can also be concluded that the predictions of the Pulkovo predictions are more accurate.