

СРАВНЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СВОБОДНОЙ НУТАЦИИ ЯДРА

Малкин З.М.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Свободная нутация земного ядра (FCN – Free Core Nutation) является основным фактором, ограничивающим точность моделирования движения оси вращения Земли в небесной системе координат. К настоящему времени предложено несколько моделей FCN. В работе проведен сравнительный анализ современных моделей, включая модели, предложенные автором. Показано, что применение модели FCN позволяет существенно повысить точность учета нутации. Кроме того, выделенная из наблюдаемого движения оси вращения Земли составляющая FCN является важным источником геофизической информации.

1. Введение

Прецессионно-нутационное движение оси вращения Земли в пространстве, точнее в небесной или инерциальной (квазиинерциальной) системе координат, является одной из основных составляющих вращения Земли. Движение оси вращения Земли в пространстве описывается теорией прецессии и нутации, точность которой в настоящее время (официальная модель MAS IAU2000A) составляет около 0.1 мс дуги (mas). Однако сравнение этой теории с РСДБ-наблюдениями (радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами) показывает различия, достигающие величин порядка 0.3 mas. Основной из них является свободная нутация жидкого ядра Земли (FCN – Free Core Nutation) с номинальным периодом около 430 средних суток. На рис. 1. показаны разности между наблюдаемыми координатами небесного полюса X и Y и теорией нутации IAU2000A по данным Международной службы РСДБ для геодезии и астрометрии IVS (Schlueter и Behrend., 2007). Эта составляющая вращения Земли, в отличие от лунно-солнечных и планетных членов теории IAU2000A, носит нерегулярный характер и не может быть предсказана теоретически на достаточно длительный период времени на нужном уровне точности, почему, собственно, она и не была включена в модель MAS.

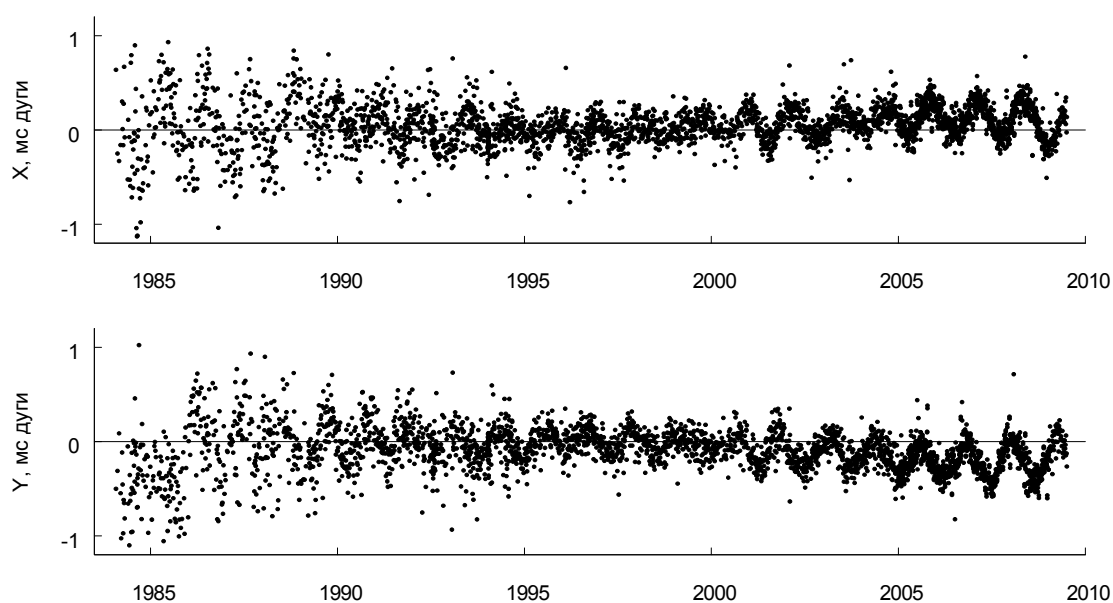


Рис. 1. Разности между наблюдаемыми углами нутации и теорией IAU2000A, mas.

Частота свободной нутации ядра является фундаментальной величиной, входящей в уравнение передаточной функции, связывающей амплитуду нутационных колебаний абсолютно твердой и реальной Земли. Период и амплитуда FCN зависят от ряда параметров внутреннего строения Земли таких, как структуры и динамического сжатия ядра, его моментов инерции, дифференциального вращения ядра и мантии, а также динамического взаимодействия оболочек Земли и их реологических характеристик. Однако наши знания обо всех этих факторах пока недостаточно полны для того, чтобы построить модель FCN с достаточной точностью. Поэтому наблюдательные данные и построенные на их основе эмпирические модели дают важную информацию для уточнения параметров теоретических моделей. С другой стороны, повышение точности эмпирических моделей позволяет повысить точность вычисления нутационного движения оси вращения Земли, что важно для многих практических приложений. Наконец, усилия по построению моделей FCN не в последнюю очередь стимулируются потребностью в высокоточном прогнозе углов нутации, что необходимо для решения ряда прикладных задач.

В этой статье, являющейся продолжением работы (Малкин, 2007), проводится детальное сравнение эмпирических моделей FCN Ламберта (Lambert, 2008) и автора (Malkin, 2007), единственных, поддерживаемых в настоящее время. К сожалению, недавно опубликованное исследование Губанова (2009) не может быть использовано для такого сравнения, поскольку его модель недоступна в числовом виде. Проведено сравнение моделей с точки зрения представления ими наблюдаемых значений углов нутации, а также вариаций амплитуды и фазы FCN. Результаты сравнения показали, что модель, предложенная автором, имеет в этом отношении преимущество. В сравнение также включена непараметрическая модель FCN, полученная сглаживанием наблюдательных данных. Показано, что она обеспечивает минимальную величину остаточных невязок в наблюдениях углов нутации.

2. Эмпирические модели FCN

Все известные эмпирические модели FCN построены на основе анализа разностей между координатами небесного полюса, определяемыми из РСДБ-наблюдений, и теорией IAU2000A. Первую модель FCN, широко использовавшуюся в практике, предложил Herring. Последовательные версии этой модели, отличающиеся добавлением новых наблюдательных данных, были включены в модели нутации KSV и MNB2000 (Herring и др., 2002). Вклад FCN в координаты небесного полюса по этой модели вычисляется следующим образом:

$$\begin{aligned}dX &= -A_1 \sin \varphi + A_2 \cos \varphi, \\dY &= -A_1 \cos \varphi - A_2 \sin \varphi,\end{aligned}\tag{1}$$

где $\varphi = -2\pi r(1+f_0)t$, $f_0 = -1.00231810920$ – частота FCN, которая соответствует периоду 431.39 звездных суток, $r = 1.002737909$ – коэффициент перехода от среднего к звездному времени, t – эпоха в юлианских днях, отсчитываемая от стандартной эпохи $t_0 = J2000.0 = 2451545$. Исходные значения амплитуд A_1 и A_2 вычислены на основе анализа разностей наблюдаемых и теоретических углов нутации на моменты времени 1979.0, 1984.0–2000.0 с интервалом 2 года, 2001.41 (последняя эпоха, после которой модель не поддерживается). Анализ производился на шести последовательных интервалах дат для обеих составляющих нутации независимо. При практическом применении этой модели амплитуды линейно интерполируются на нужный момент. Поскольку эта модель давно не поддерживается, а ее принципы построения и результаты применения очень близки к модели Ламберта (см. ниже), эту модель мы дальше рассматривать не будем.

Следующая модель была предложена автором (Malkin, 2004; Малкин, 2007). Обозначим ее ZM1. В соответствии с этой моделью вклад FCN вычисляется по формулам:

$$\begin{aligned} dX &= A(t) \sin \Phi(t), \\ dY &= A(t) \cos \Phi(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $A(t)$ – амплитуда, а $\Phi(t)$ – фаза FCN. Переменная амплитуда FCN вычисляется по разностям между наблюдаемыми и теоретическими углами нутации:

$$A(t) = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}. \quad (3)$$

Исходные разности предварительно сглаживаются гауссовым полосовым фильтром с центральной частотой, близкой к f_0 , что позволяет отсеять высокочастотные и низкочастотные составляющие, лежащие за пределами полосы частот FCN. Одновременно со сглаживанием производится интерполяция на равноотстоящие эпохи, обычно с шагом 10 суток, что упрощает и ускоряет последующие вычисления. Можно отметить, что в работе Malkin и Terentev (2003) было проведено сравнение результатов вычислений, проведенных с исходными и сглаженными разностями, которое не показало заметных различий.

Переменная фаза $\Phi(t)$ вычисляется следующим образом. Сначала производится вейвлет-анализ разностей наблюдаемых и теоретических углов нутации, с помощью которого определяется изменение частоты FCN со временем $\omega(t)$. Далее фаза FCN находится путем интегрирования частоты:

$$\Phi(t) = \int_{t_0}^t \omega \cdot dt + \varphi_0, \quad (4)$$

где φ_0 – начальная фаза на эпоху J2000.0. Фаза вычисляется на те же эпохи, на которые определена амплитуда. Окончательно, вклад FCN вычисляется по (2). Заметим, что для вейвлет-анализа характерно наличие краевого эффекта, искажающего данные на крайних отрезках изучаемого интервала дат. Поэтому, хотя для построения модели использованы все наблюдения за 1979–2009 гг., итоговый ряд приводится только для периода 1984.0–2008.0.

В 2004 г. S. Lambert предложил модель FCN, базирующуюся на принципах, схожих с моделью МНВ. Обозначим ее как SL. В отличие от модели МНВ, анализ разностей наблюдаемых и теоретических углов нутации производится строго по двухлетним интервалам, при этом обе составляющие нутации используются одновременно так, что вклад FCN находится методом наименьших квадратов в комплексной форме:

$$dX + i dY = A \exp(i \omega_0 t) + X_0 + i Y_0, \quad (5)$$

где ω_0 – круговая частота FCN, соответствующая периоду –430.23 средних суток (что равно периоду модели МНВ), X_0 и Y_0 – смещение. В результате получаются формулы учета FCN, аналогичные модели МНВ. Модель SL постоянно поддерживается в актуальном состоянии, включая прогноз (Lambert, 2009). Начало ряда приходится на 1984.0.

3. Сравнение моделей

Сравнение описанных выше моделей FCN было проведено по двум критериям. В первом тесте модели сравнивались по уменьшению остаточных невязок в наблюдениях углов нутации. Во втором тесте сравнивалось качество представления изменений амплитуды и фазы FCN со временем.

Для полноты, мы также включили в это сравнение ряд FCN, который получен простым сглаживанием наблюдаемых разностей между наблюдаемыми и модельными углами нутации. Фактически, это ряд (обозначим его ZM2), получаемый на первом эта-

пе построения модели ZM1. Он легко прогнозируется как вперед, так и назад, что позволяет применять его для оперативных и прогнозных работ, а также для обработки старых наблюдений. Принципиальная разница между непараметрической моделью ZM2 с одной стороны и моделями ZM1 и SL с другой стороны заключается в том, что последние не включают в себя тренд, хорошо видный на рис. 1, в то время как ZM2 представляет полное уклонение наблюдаемых значений координат небесного полюса от модели IAU2000A.

Уменьшение остаточных невязок наблюдений при использовании моделей FCN проверялось на примере их спектра, а также вычислением их среднеквадратического значения. На рис. 2 показан спектр остаточных невязок до и после применения модели ZM1. Из рисунка видно, что после применения модели FCN в остаточных невязках практически исчезает соответствующий ей спектральный пик. Аналогичный результат получается с остальными моделями FCN, описанными в настоящей работе.

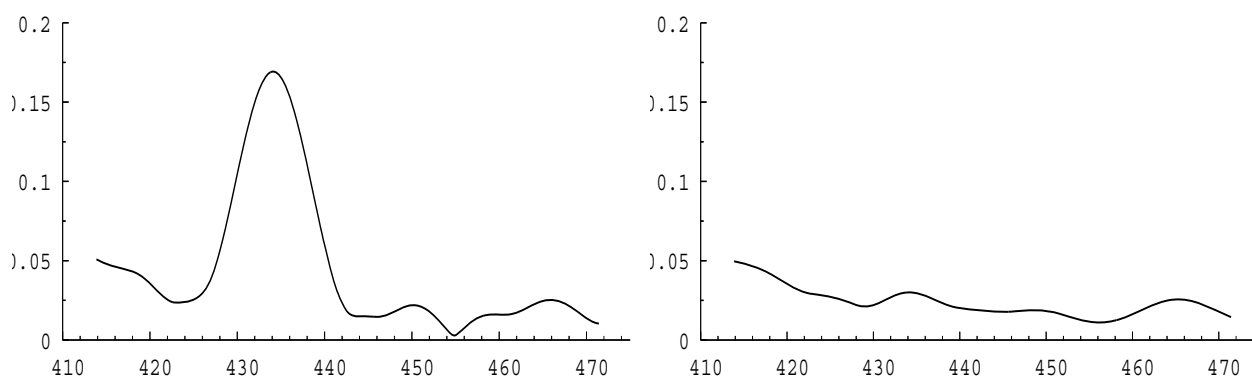


Рис. 2. Спектр остаточных невязок до (слева) и после (справа) применения модели FCN (период в днях, амплитуда в mas).

Численные данные об уменьшении остаточных невязок после применения различных моделей FCN приведены в табл. 1, где содержатся значения взвешенных среднеквадратических разностей (среднее для X и Y координат) между величинами углов нутации, определенными из РСДБ-наблюдений (сводный ряд IVS) и исправленными за модель FCN, и моделью IAU2000A. В первой строке таблицы приведены данные для всех имеющихся наблюдений до эпохи 2008.0 (общий интервал для всех сравниваемых моделей), во второй данные за последние три года. Значения среднеквадратических разностей вычислены в двух вариантах: «как есть» и после удаления постоянного сдвига. Это объясняется тем, что в последние годы разности между наблюдаемыми и модельными значениями углов нутации показывают заметный тренд, что ясно видно на рис. 1.

Таблица 1. Среднеквадратические значения остаточных разностей, мкс дуги.

Интервал дат	Без учета сдвига				С учетом сдвига			
	Модель FCN				Модель FCN			
	Нет	SL	ZM1	ZM2	Нет	SL	ZM1	ZM2
1984.0–2008.0	188	188	162	90	156	156	120	90
2005.0–2008.0	219	219	191	78	147	147	82	77

Из данных табл. 1 видно, что наличие тренда сказывается на величине остаточных разностей для моделей ZM1 и SL, в которых тренд удаляется при построении. В то же

время для модели ZM2 тренд практически не влияет на величину остаточных разностей, что является следствием того, что при построении этой модели тренд не удаляется. Отсюда можно сделать важный вывод об области оптимального применения различных моделей. Первые две модели наилучшим образом подходят для геофизической интерпретации наблюдаемых данных о свободной нутации жидкого ядра, в то время как ZM2 обеспечивает наиболее точный результат при практических вычислениях, связанных с преобразованием систем координат.

Сравним модели ZM1 и SL с точки зрения представления изменений амплитуды и фазы FCN. Для любой модели FCN, заданной в виде рядов приращений координат небесного полюса X и Y , амплитуда FCN может быть вычислена по (3), а фаза как $\arctg(X/Y)$. Для более наглядного представления изменений фазы из ее значений был вычтен одинаковый для обеих моделей линейный тренд, соответствующий значению периода FCN 430 средних суток. Результаты вычислений, приведенные на рис. 3, показывают, что все модели обнаруживают схожие вариации амплитуды и фазы FCN. Однако для модели ZM1 эти вариации носят более плавный характер, что, по-видимому, лучше соответствует реальным изменениям во вращении Земли. Из принципов построения моделей FCN можно видеть, что модель ZM1 обеспечивает практически непрерывное во времени определение параметров FCN с любым наперед заданным шагом, в отличие от модели SL для которой эти параметры определяются с интервалом порядка 2 лет, что приводит к скачкам в параметрах FCN, хорошо видимых на рис. 3.

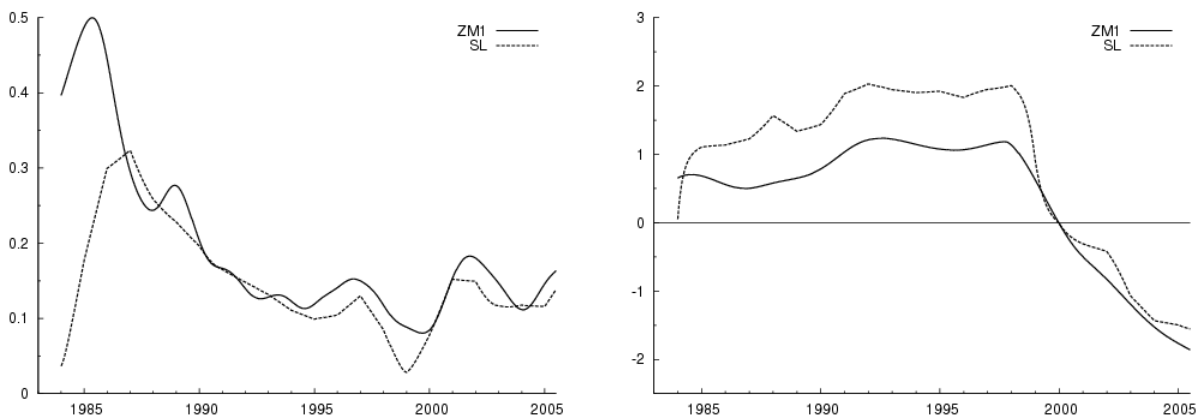


Рис. 3. Изменение амплитуды (слева, мас), и фазы (справа, радианы) для разных моделей FCN.

Заметим, что с математической точки зрения, полученное из анализа изменение фазы может быть следствием изменения периода нутационного колебания. Вообще говоря, можно говорить об изменениях и периода, и фазы, которые можно разделить только с привлечением геофизического анализа. В ряде работ, напр. Hinderer и др. (2000), Zharov (2005), показано, что период FCN остается постоянным в пределах ± 2 суток. Поэтому наиболее вероятной причиной найденной зависимости являются изменения именно фазы, которые могут быть сопоставлены с другими геофизическими наблюдениями (см., например, Shirai и др., 2005). Таким образом, изменения амплитуды и фазы, определенные на основе эмпирических моделей являются наиболее интересным материалом для дальнейшей геофизической интерпретации.

4. Заключение

В настоящей работе проведено сравнение трех поддерживаемых в настоящее время моделей FCN. Из результатов работы следует, что все современные модели позволяют достаточно эффективно учитывать FCN при решении задач координатных преобразований, при этом непараметрическая модель ZM2 имеет заметное преимущество.

Что касается параметрических моделей, наиболее интересных с точки зрения выделения геофизического сигнала (амплитуды и фазы FCN) из данных наблюдений, модель ZM1 имеет определенное преимущество в силу отсутствия скачков на границе интервалов, используемых при построении модели SL. Однако можно заметить, что этот недостаток модели SL легко может быть устранен при уменьшении величины сдвига между пробными интервалами до 10-15 суток.

В заключение отметим, что модели ZM1 и ZM2 обновляются ежедневно и доступны для пользователей на сайте ГАО РАН (http://www.gao.spb.ru/english/as/ac_vlbi/).

Литература

- Губанов В.С.* Динамика земного ядра по данным РСДБ-наблюдений. Письма в АЖ, 2009, т. 35, № 4, 304-311.
- Малкин З. М.* Эмпирические модели свободной нутации земного ядра. Астрон. вестник, 2007, т. 41, No. 6, 531-536.
- Herring T.A., Mathews P.M., Buffet B.A.* Modelling of nutation-precession: Very long baseline interferometry results. J. Geophys. Res., 2002. V. 107, No. B4, 2069-2080.
- Hinderer J., Boy J.P., Gegout P. et al.* Are the Free Core Nutation parameters variable in time? Phys. Earth Planet. Int. 2000, V. 117, No. 1, 37-49.
- Lambert S.L.*, Empirical Modeling of the Retrograde Free Core Nutation (Technical Note), 2009, <http://syrtel.obs-epm.fr/~lambert/fcn/notice.pdf>.
- Malkin, Z., Terentev D.* Investigation of the Parameters of the Free Core Nutation from VLBI data. Comm. IAA RAS. 2003. № 149.
- Malkin Z.M.* Comparison of VLBI nutation series with the IAU2000A model. Proc. Journées Systèmes de Référence Spatio-temporels 2003, St. Petersburg, 2004, 24-31.
- Schluter, W., Behrend, D.* The International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS): current capabilities and future prospects. J. of Geodesy, 2007, V. 81, No. 6-8, 379-387.
- Shirai T, Fukushima T., Malkin Z.* Detection of phase disturbances of free core nutation of the Earth and their concurrence with geomagnetic jerks. Earth Planets and Space, 2005, V. 57, 151-155.
- Zharov V.E.* Model of the Free Core Nutation for Improvement of the Earth Nutation Series. Proc. Journées Systèmes de Référence Spatio-temporels 2004, Paris. 2005, 106-109.

A COMPARISON OF EMPIRIC FREE CORE NUTATION MODELS

Malkin Z.M.

Main (Pulkovo) Astronomical Observatory of RAS

Free core nutation (FCN) is the main factor that limits the accuracy of the modeling of the motion of Earth's rotational axis in the celestial coordinate system. Several FCN models have been proposed. A comparative analysis is made of the known models including the model proposed by the author. The use of the FCN model is shown to substantially increase the accuracy of the modeling of Earth's rotation. Furthermore, the FCN component extracted from the observed motion of Earth's rotational axis is an important source for the study of the shape and rotation of the Earth's core. A comparison of different FCN models has shown that models proposed by the author are better than other models if used to extract the geophysical signal (the amplitude and phase of FCN) from observational data and provide better fit to observed nutation angles.