

Исследование и эмпирическое моделирование свободной нутации ядра

З. М. Малкин, Н. О. Миллер

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, С.-Петербург

Введение

Свободная нутация земного ядра (FCN – Free Core Nutation) является основным фактором, ограничивающим точность моделирования движения оси вращения Земли в небесной системе координат. Поэтому повышение точности учета FCN имеет важное значение для многих практических приложений, связанных с преобразованием систем координат. С другой стороны, период и амплитуда FCN зависят от ряда параметров внутреннего строения Земли, и изучение свойств FCN, таких как ее период, фаза и амплитуда, важно для геофизических приложений. Предложенные к настоящему времени эмпирические модели FCN базируются на одномодовом характере нутации ядра. В то же время, некоторые результаты обработки РСДБ-наблюдений указывают на возможное наличие двух близких периодов FCN. Теоретическое объяснение наличию второй частоты FCN дал Г. Красинский в теории вращения Земли с двухслойным жидким ядром ERA2005. В настоящей работе для более детального изучения этого явления ряды координат небесного полюса, полученные из обработки наблюдений, а также определенные по теории ERA2005, исследованы с помощью нескольких статистических методов, которые уверенно показывают наличие двух колебаний в нутационном движении оси вращения Земли с периодами около -452 и -410 средних суток.

1. Эмпирические модели FCN

К настоящему времени предложено три эмпирических модели FCN: Т. Херринга (MHB2000) [1], З. Малкина (ZM) [2], С. Ламберта (SL) [3]. Сравнение этих моделей с наблюдениями показывает, что все три модели позволяют примерно в одинаковой мере существенно повысить точность учета FCN при обработке РСДБ-наблюдений. Однако, как видно из рис.1, модель ZM обеспечивает плавное и, по-видимому, более реалистичное представление вариаций основных геофизических параметров амплитуды и фазы FCN, в отличие от других моделей.

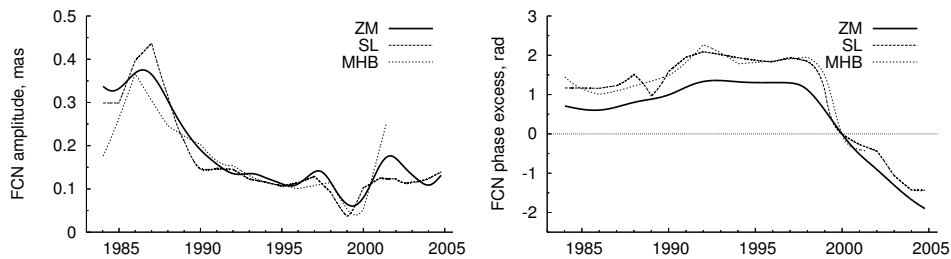


Рис.1. Вариации амплитуды и фазы FCN.

Дальнейшее развитие модели FCN может быть достигнуто путем рассмотрения двухчастотной модели. Ранее в работах [4, 5] в рядах нутации было обнаружено кроме колебания с основным периодом около 434 средних суток второе колебание с периодом около 410 средних суток. Позднее, два близких по частоте колебания в области FCN были найдены в работе [6], авторы которой определили наличие двух периодов -435 и -410 суток. Теоретическое объяснение этого явления было дано Г.Красинским при построении численной теории вращения Земли ERA2005 [7], где наличие второго периода FCN было объяснено двухслойной структурой жидкого ядра. Величина этого периода была найдена равной -420.31 суток [8].

В настоящей работе проведен более детальный анализ рядов координат небесного полюса по данным Международной службы РСДБ для геодезии и астрометрии (IVS) за период с 1989 по 2006 гг. Более ранние наблюдения не исследовались ввиду их сравнительно низкой точности. Анализу подвергались сглаженные разности между наблюдаемыми значениями и моделью IAU200A.

2. Спектральный анализ

Первое исследование было проведено методом классического спектрального анализа путем вычисления периодограммы Шустера для комплексного ряда $X+iY$. Для спектрального анализа обычно используется быстрое преобразование Фурье, которое обеспечивает вычисление спектральных оценок на сетке частот, кратных частоте Найквиста, что не обеспечивает детального разрешения по частоте. Для повышения частотного разрешения мы использовали прямое вычисление спектральных оценок, при котором возможно использовать любую, сколь угодно плотную сетку частот (периодов). Также для повышения разрешения по частоте не использовалось частотное окно, что не приводит к ухудшению результатов в данном случае, поскольку исходные данные достаточно гладкие, и мы изучаем достаточно узкий участок спектра. На рис.2 приведены спектры ряда IVS и модели Красинского ERA2005, которые показывают достаточно хорошее согласие теории и наблюдений. Также в исследуемой полосе частот уверенно определяется годовая компонента с существенно меньшей амплитудой, чем компоненты FCN.

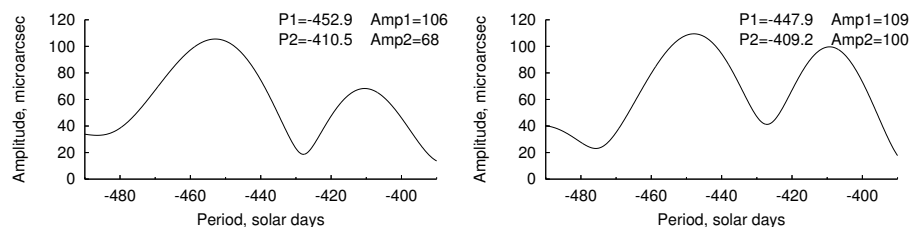


Рис.2. Спектры рядов нутации IVS (слева) и ERA2005 (справа).

3. Выделение главных компонент

Для дальнейшего исследования мы применили метод сингулярного спектрального анализа, также известный как метод главных компонент. Использовалась модификация этого метода «Гусеница», разработанная в Санкт-Петербургском университете [9]. На рис.3 приведен результат разложения ряда IVS на главные компоненты методом «Гусеница». Следует отметить, что кроме квазипериодических компонент метод SSA позволяет выделить реальный долговременный тренд во временном ряде, не отягощенный ошибками модели, как при некоторых других методах определения тренда. Обычно вклад трендовой составляющей достаточно велик (в нашем случае 40.5%). Поэтому для повышения качества выделения квазигармонических составляющих вычисления были проделаны с двумя итерациями. На первой из них были выделены все главные компоненты (PC), а на второй из исходного ряда был вычтен тренд, определенный на первой итерации. В результате были выделены три главные компоненты с периодами 452 (вклад 53.8%), 409 (вклад 19.0%) и 366 (вклад 6.8%) средних суток (периоды определялись путем спектрального анализа отдельных выделенных компонент), что хорошо согласуется с результатами приведенными выше.

4. Вейвлет-анализ

Кроме того, исходный ряд, его главные компоненты, определенные методом «Гусеница», и ряд ERA2005 были дополнительно исследованы методом вейвлет-анализа. Для вычислений использовалась программа WWZ, разработанная в Американской ассоциации наблюдателей переменных звезд¹. Программа реализует метод, предложенный в [10]. Полученные результаты, приведенные на рис.4, явно указывают на присутствие двух колебаний с частотами, близкими к найденным выше. В частности, можно опять отметить хорошее согласие теории ERA2005 с наблюдениями.

¹ <http://www.aavso.org/data/software/winwwz.shtml>

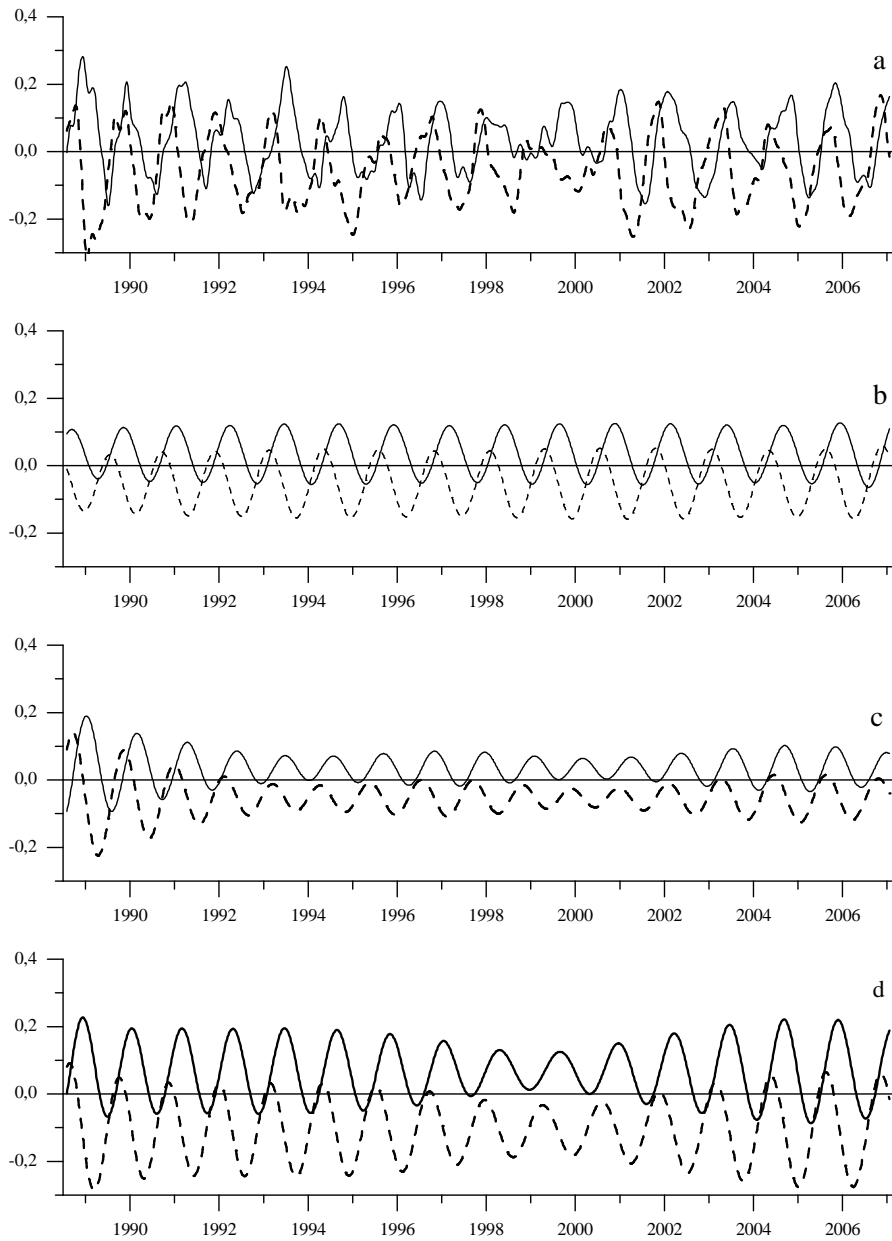
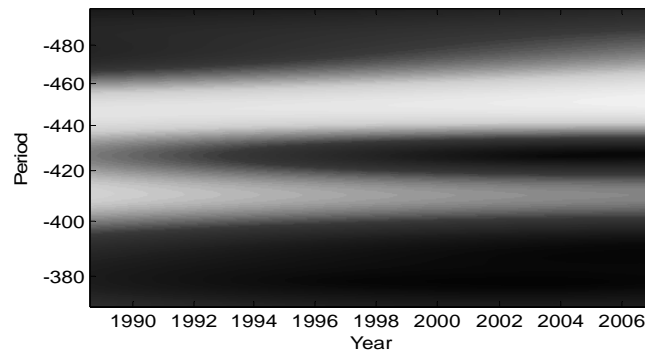
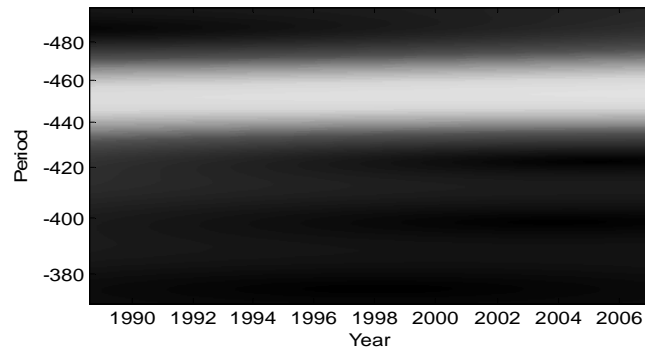


Рис.3. Разности между рядом координат небесного полюса IVS и моделью IAU2000 и их главные компоненты (непрерывные линии – X, пунктирные – Y): а – исходные разности, б – первая главная компонента с периодом около 452 суток, с – вторая главная компонента с периодом около 409 суток, d – сумма двух главных компонент.

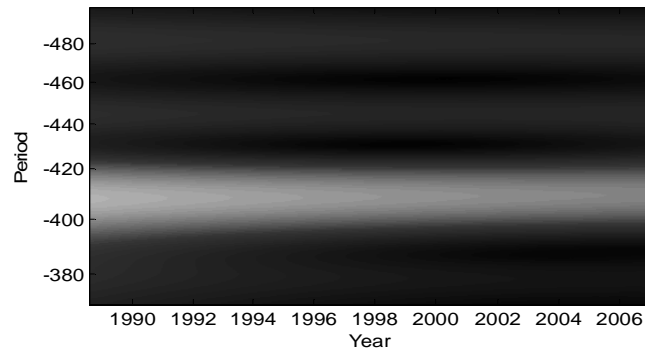
IVS



PC1



PC2



ERA2005

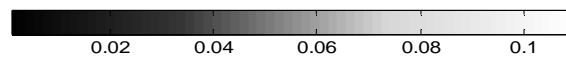
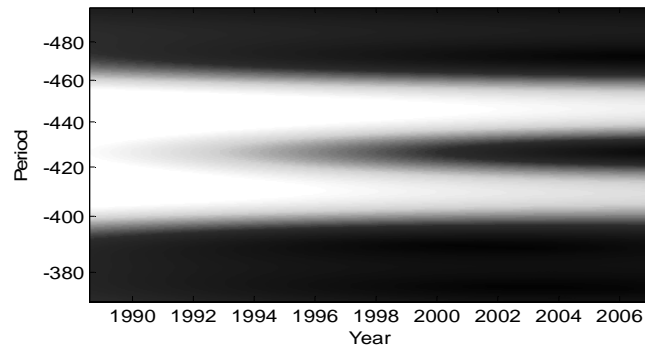


Рис.4. Вейвлет-анализ ряда FCN по данным IVS, двух его главных компонент и модели ERA2005. Внизу показана шкала амплитуд в mas.

5. Заключение

В работе проведен анализ разностей координат небесного полюса сводного ряда IVS с моделью IAU2000A в области частот свободной нутации внешнего земного ядра (FCN) методами классического и сингулярного спектрального анализа и вейвлет-анализа. Все три метода уверенно показывают наличие в исследуемом ряде двух колебаний с периодами около -410 и -452 средних суток. С одной стороны, это подтверждает результаты, полученные из обработки наблюдений в [4-6] и теории ERA2005 [7,8] о наличии второй вращательной моды жидкого ядра Земли. Однако сами нутационные периоды, найденные в разных работах, существенно различаются между собой, что требует дальнейшего изучения.

Литература

1. *Herring T. A., Mathews P. M., Buffe B. A.* Modelling of nutation-precession: Very long baseline interferometry results // *J. Geophys. Res.*, 2002. 107, No. B4. P. 2069–2080.
2. *Malkin Z. M.* Comparison of VLBI nutation series with the IAU2000A model // In: *Proc. Journees Systemes de Reference Spatio-temporels 2003*. St. Petersburg, 22-25 Sep 2003, Eds. A. Finkelstein, N. Capitaine, 2004. P. 24–31.
3. *McCarthy D. D.* The free core nutation // In: *Proc. Journees Systemes de Reference Spatio-temporels 2004*, Paris, France, 20-22 Sep 2004, Ed. N. Capitaine. 2005. P. 101–105.
4. *Malkin Z., Terentev D.* Preliminary analysis of the Free Core Nutation from VLBI data // In: *Proc. 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, Leipzig, Germany, 9–10 May 2003. P. 227–235.
5. *Malkin Z., Terentev D.* Investigation of the Parameters of the Free Core Nutation from VLBI data // *Comm. IAA RAS*, 2003. No. 149. – 24 P.
6. *Schmid M., Tesmer V., Schuh H.* Wavelet analysis of VLBI nutation series with respect to FCN // *EGU 2nd General Assembly*, Vienna, 24-29 Apr 2005.
7. *Krasinsky G. A.* Numerical theory of rotation of the deformable Earth with the two-layer fluid core. Part1: Mathematical model // *Cel. Mech. Dyn. Astron.*, 2006. 96. P. 169–217.
8. *Krasinsky G. A., Vasilyev M. V.* Numerical theory of rotation of the deformable Earth with the two-layer, fluid core. Part2: Fitting to VLBI data. // *Cel. Mech. Dyn. Astron.*, 2006. 96. P. 219-237.
9. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница», ред. Д. Л. Данилов, А. А. Жиглявский, СПб.: СПбГУ, 1997. –308 С.
10. *Foster G.* Wavelets for period analysis of unevenly sampled time series. *Astron.J.*, 1996. 112. No. 4, P. 1709–1729.