

19. **Iorio A.** Quantum field theory in curved grapheme spacetimes, Lobachevsky geometry, Weyl symmetry, Hawking effect, and all that // ArXiv. 2013. 1308.0265. P. 1—76.

20. **Jariwala D., Srivastava A., Ajayan P. M.** Graphene synthesis and band gap opening // J. Nanosci. nanotechnol. 2011. V. 11. P. 6621—6641.

21. **Исаев Л. К., Кононогов С. А., Хрущев В. В.** О переопределении четырех основных единиц СИ // Измерительная техника. 2013. № 2. С. 3—8; **Isaev L. K., Kononogov S. A., Khrushchov V. V.** On the redefinition of the four base SI units // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N. 2. P. 113—120.

22. **Andreas B. e. a.** (IAC) Counting the atoms in a ^{28}Si crystal for a new kilogram definition // Metrologia. 2011. V. 48. P. S1—13.

23. **Хилл Т. П., Хрущев В. В.** Существует ли объективная необходимость скорейшего переопределения килограмма и моля? // Измерительная техника. 2013. № 7. С. 14—17; **Hill T. P., Khrushchov V. V.** Is there an objective need for an urgent redefinition of the kilogram and mole? // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N. 7. P. 747—752.

Дата принятия 24.03.2014 г.

521.92

Расщепление частоты свободной нутации ядра в магнитном поле Земли

Л. А. КУЗНЕЦОВА*, С. Л. ПАСЫНОК**

* Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, e-mail: leila@infm1.sai.msu.ru

** Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: pasynok@vniiftri.ru

Анализ остаточных расхождений принятой теории MAC2000 и измерений последних лет показал, что структура этих расхождений не соответствует предсказанной. Согласно указанной теории детерминированная часть расхождений должна представлять собственные колебания на частоте свободной нутации ядра, однако корреляционный анализ выявляет большее число гармоник. Предложена модель, позволяющая полностью объяснить две главные составляющие в остаточных расхождениях теории и измерений. Полученные периоды совпадают с периодами, выделенными из расхождений модели MAC2000 и результатов измерений.

Ключевые слова: вращение Земли, магнитное поле, глобальная геодинамика, свободная нутация ядра.

The analysis of last years measurements has shown that the accepted IAU2000 theory has the best characteristics in comparison with other nutation models. However the analysis of residual divergences of the theory and measurement results has shown that the structure of these divergences does not correspond to predictions of IAU2000 nutation theory. According to this predictions the quasi-systematic part of these divergences should represent its own fluctuations on frequency of the core free nutation. However, the correlation analysis reveals the greater number of harmonics. A model allowing to explain completely the presence of two main components in residual divergences of IAU2000 nutation theory and measurements is suggested. The received periods coincide with periods allotted from residual divergences of IAU2000 model and the results of measurements.

Key words: Earth rotation, magnetic field, geodynamics, core free nutation.

Принятая Международным астрономическим союзом (МАС) теория MAC2000 (IAU2000) обладает наилучшими характеристиками в сравнении с другими моделями нутации. Однако анализ остаточных расхождений углов нутации указанной теории и измерений показал, что расхождения имеют довольно сложную структуру в отличие от предсказанной. Согласно данной теории основную часть расхождений должны составлять свободные колебания на частоте свободной нутации ядра. Многие специалисты не отступали от предсказанной интерпретации [1—3], но некоторые неоднократно обращали внимание на отличие остаточных расхождений от этой простой структуры [4, 5]. Они указывали на то, что главным элементом расхождений является суперпозиция двух гармоник на частотах, близких к частоте свободной нутации ядра. На основе этих данных была предложена и разработана теория нутации ERA2006 с двухслойным жидким ядром [6, 7]. В результате удалось достичь высокой точности,

близкой к точности теории MAC2000 [7, 8], однако сложности физической интерпретации расслоения [5] привели к критике теории ERA2006 зарубежными специалистами [9].

Отличие структуры остаточных расхождений от теоретически предсказанной указывает лишь на то, что при переходе к новым субмикро- и микросекундным требованиям к точности определения углов нутации принятая теория нуждается в дальнейшем совершенствовании. Особенно это будет актуально с вводом в работу сети нового поколения на основе быстровращающихся антенн малого диаметра — международной радиоинтерферометрической сети со сверхдлинными базами (РСДБ) [10].

В 2013 г. в МАС была создана рабочая группа № 19 под руководством Д. Феррандиша, известного международного специалиста в области аналитической и небесной механики и теории вращения Земли. Он — один из создателей теории вращения Земли GF99 [11], основанной на рассмотрении

вращательного движения с помощью формализма гамильтоновой механики. Таким образом, настоящее исследование проводится в русле международных работ в этой области.

Поскольку результаты измерений главной части теории MAC2000 достаточно приближены к предсказанным, то изменения, которые необходимо ввести в теорию, не должны быть слишком революционными. В настоящей работе показано, что основная часть остаточных расхождений может быть качественно и количественно объяснена с помощью учета частотной зависимости компонентов тензора электромагнитного взаимодействия (сцепления) мантии, жидкого и твердого ядер, определенного в [12]. Учет этой зависимости, не приводя к кардинальному изменению основных формул теории, позволит правильно описать остаточные расхождения теории и измерений.

Постановка задачи. В [12] показано, что моменты сил электромагнитного сцепления, воздействующие на жидкое и твердое ядра, в частотной области могут быть вычислены по формулам

$$\begin{aligned} \tilde{L}_f^{EM}(\sigma) &\approx -iA_f\Omega_0^2 \times \\ &\times \left\{ K^{CMB}(\sigma)(1-i)\tilde{m}_f(\sigma) + \tilde{K}^{ICB}(\sigma)(\tilde{m}_f(\sigma) - \tilde{m}_s(\sigma))A_s/A_f \right\}; \\ \tilde{L}_s^{EM}(\sigma) &\approx -iA_s\Omega_0^2 \tilde{K}^{ICB}(\sigma)(\tilde{m}_s(\sigma) - \tilde{m}_f(\sigma)), \end{aligned}$$

где величины с тильдами образованы из экваториальных компонентов соответствующих векторов по правилу $\tilde{m} = m_x + im_y$; $i = \sqrt{-1}$; Ω_0 — номинальная угловая скорость вращения Земли; σ — частота в оборотах за звездные сутки относительно *ITRF* (для нутации она выражается в виде $-1 + \tau$, а для главных нутационных гармоник близка к -1 , так как τ близка к нулю, τ — безразмерная частота относительно *ICRS*); A_s , A_f — экваториальные моменты инерции твердого и жидкого ядер, соответственно; $\tilde{L}_s^{EM}$, $\tilde{L}_f^{EM}$ — комплексные компоненты моментов сил электромагнитного взаимодействия.

Компоненты электромагнитного тензора $K^{CMB}(\sigma)$, $\tilde{K}^{ICB}(\sigma)$ обладают следующей зависимостью от частоты в области нутационных частот:

$$K^{CMB}(\sigma) \equiv \tilde{K}^{ICB}(\sigma) \equiv (1-i)|\sigma|^{-1/2}. \quad (1)$$

Так как зависимость (1) слаба для приливных частот, в теории MAC2000 предполагается, что $K^{CMB}(\sigma)$, $\tilde{K}^{ICB}(\sigma)$ можно приближенно считать постоянными. Тогда для собственных частот в нутационном диапазоне получаются следующие выражения [12]:

$$\begin{cases} \tau_{RFCN} \approx -\left(e_f - \beta + K^{CMB}(1-i) + \tilde{K}^{ICB}A_s/A_f\right)A/A_m; \\ \tau_{PFCN} \approx \alpha_2 e_s + v - \tilde{K}^{ICB}, \end{cases} \quad (2)$$

где e_s , e_f — динамические сжатия твердого и жидкого ядер, соответственно; β — упругая постоянная (число Лява); A_m — экваториальный момент инерции мантии; α_2 — постоянная гравитационного сцепления твердого и жидкого ядер; τ_{RFCN} , τ_{PFCN} — частоты обратной и прямой свободных нутаций ядра относительно *ICRF*.

В области отрицательных нутационных частот ($\tau < 0$) есть только одна частота, откуда и следуют все дальнейшие рассуждения о структуре остаточных расхождений. Если же учесть зависимость (1), то уравнение (2) будет неявным для определения собственных частот, которых в данном случае должно быть больше, чем одна. Таким образом, задача состоит в следующем: необходимо найти такие значения $K^{CMB}(\sigma)$, $\tilde{K}^{ICB}(\sigma)$ с учетом частотной зависимости (1), чтобы частоты, определяемые первым уравнением из (2) совпали в пределах погрешностей измерений с выделенными из измерений частотами, которым соответствуют периоды 405,3 и 462,3 звездных суток [5].

Определение параметров магнитного поля. Итак, следуя сформулированной задаче, запишем первое уравнение из (2) в виде

$$\tau - \tau_{RFCN} - \sqrt{(1-\tau_0)/(1-\tau)} \left[\tau_{RFCN} + (e_f - \beta)A/A_m \right] = 0, \quad (3)$$

где $\tau_{RFCN} = -\left(e_f - \beta + K_0^{CMB}(1-i) + \tilde{K}_0^{ICB}A_s/A_f\right)A/A_m$ — частота свободной нутации ядра в *ICRF*, полученная при заданных значениях электромагнитного тензора на опорной частоте $\sigma_0 = -1 + \tau_0$; $\tau_{0RFCN} = -(e_f - \beta)A/A_m$.

Решим (3) и одновременно подберем значения параметров τ_{0RFCN} , τ_0 в (1) так, чтобы расщепление собственных частот, определенное по (3) в пределах погрешностей измерений, совпало со значениями, определенными в [5].

Заведомо известно, что величина

$$\tau - \tau_{RFCN} + \sqrt{(1-\tau_0)/(1-\tau)} \left[\tau_{RFCN} + (e_f - \beta)A/A_m \right]$$

не равна нулю и на нее можно умножить обе части (3). В результате получим

$$-\tau^2 + 2\tau\tau_{0RFCN} - \tau_{0RFCN}^2 + \frac{1-\tau_0}{1-\tau} \left[\tau_{RFCN} + (e_f - \beta)A/A_m \right] = 0. \quad (4)$$

Приведем уравнение (4) к кубическому уравнению

$$\begin{aligned} \tau^3 - \tau^2(1 + 2\tau_{0RFCN}) + (\tau_{0RFCN} + 2)\tau_{0RFCN}\tau - \tau_{0RFCN}^2 + \\ + (1-\tau_0) \left[\tau_{RFCN} + (e_f - \beta)A/A_m \right] = 0. \end{aligned}$$

Решение кубического уравнения определяется формулами Кардано [13]. В результате численного моделирования выявлено, что существуют такие значения параметров τ_{0RFCN} , τ_0 , при которых достигается полное совпадение расщепленных собственных частот, полученных из решения (3), и частот, выделенных из остаточных расхождений теории MAC2000 и измерений.

Выводы. Показана принципиальная возможность описания наблюдаемой структуры остаточных расхождений углов нутации модели MAC2000 и углов нутации, полученных из измерений, путем введения в уравнения теории нутации компонентов электромагнитного тензора, зависящих от частоты. Существуют такие значения параметров частотной зависимости компонентов электромагнитного тензора и частоты τ_{0RFCN} , для которых достигается количественное совпадение собственных частот модели и главных частот остаточных расхождений. Для применения полученных результатов

определения углов нутации Земли в теории и на практике необходимо проведение дальнейших научных исследований в этом направлении.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-02-00735).

Л и т е р а т у р а

1. **Vondrak J., Ron C.** Resonant period of free core nutation — its observed changes and excitations // *Acta Geodyn. Geomater.* 2006. N. 3(143). P. 53—60.
2. **Brzeziński A., W. Kosek.** Free core nutation: Stochastic modelling versus predictability // *Proc. JOURNEES-2003: Inst. Appl. Astron. Russian Acad. Sci., St. Petersburg, 2004.* P. 99—106.
3. **IERS Conventions (2010).** Gérard Petit and Brian Luzum (eds.) // *IERS Technical Note N. 36.* Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. P. 58.
4. **Malkin Z., Miller N.** An analysis of celestial pole offset observations in the free core nutation frequency band // *Proc. 18th Europ. VLBI Geodesy and Astrometry Working Meeting.* Vienna, Austria, 2007. P. 93—97.
5. **Pasynok S., Kaufman M.** The model of the disagreements between IAU2000 nutation theory and observations // *Observing and Understanding Earth Rotation: Abstracts book of a Joint GGOS/IAU Science Workshop.* Shanghai, China. 2010. P. 28.

6. **Krasinsky G.** Numerical theory of rotation of the deformable Earth with the two-layer fluid core. Part 1: Mathem. model // *CMDA.* 2006. V. 96. P. 169—217.

7. **Krasinsky G., Vasilyev M.** Numerical theory of rotation of the deformable Earth with the two-layer fluid core. Part 2: Fitting to VLBI data // *CMDA.* 2006. V. 96. P. 219—237.

8. **Pasynok S.** Comparison of the Prediction Force of the Nutation Theories IAU2000 and ERA-2005 // *Measuring the Future: Proc. 5th IVS General Meeting, 2008.* P. 236.

9. **Capitane N. e. a.** Comparisons of Precession-Nutation Models // *Measuring the Future: Proc. 5th IVS General Meeting.* 2008. P. 236.

10. **Petrachenko B. e. a.** Design Aspects of the VLBI2010 System // *Progress Report of the IVS VLBI2010 Committee.* NASA/TM-2009-214180, 2009.

11. **Getino J. Ferrandiz J.** Effects of dissipation and liquid core on forced nutations in Hamiltonian theory // *Geophys. J. Int.* 2000. V. 142. P. 703—715.

12. **Mathews P. M., Herring T. A., Buffet B. A.** Modeling of nutation and precession: New nutation series for nonrigid Earth and insights into the Earth's interior // *J. Geophys. Res.* 2002. 107(B4). 10.1029/2000JB000390.

13. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1977.

Дата принятия 01.04.2014 г.

621.398.98

Нейроморфная инерциально-спутниковая система оценки параметров вращения

А. С. ДЕВЯТИСИЛЬНЫЙ, К. А. ЧИСЛОВ*

* Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия, e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru, kirillche@rambler.ru

Рассмотрена бортовая сеть приемников спутниковой навигационной системы и гироскопических датчиков угловых скоростей, объединенных вычислительной нейросетью, имитирующей механизм самоорганизации биологических нейронов. Отмечено общее между проблемой некорректности математических задач определения движения по измерениям и парадоксами квантовой механики. Приведены результаты вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: инерциальные измерители, навигационная спутниковая система, нейронная сеть, биологический нейрон.

The onboard network of satellite navigation information receivers and gyroscopic sensors of angular velocities integrated by computational neural network imitating the process of self-organization of biological neurons, is considered. The similarity between unreasonableness of mathematical problems of motion determination by measurements and paradoxes of quantum mechanics is noticed. The results of computational experiment are presented.

Key words: inertial meters, satellite navigation system, neural network, biological neuron.

Для определения параметров вращения подвижной технологической платформы (ТП) предложена интегрированная система (ИС), включающая блок инерциальных измерителей (трех гироскопических датчиков угловых скоростей с взаимортогональными осями чувствительности) и систему бортового многопозиционного приема (БМП) навигационной

спутниковой системы (НСС) типа ГЛОНАСС. Последняя выполняет функцию первичной оценки матрицы ориентации ТП, что и отличает ее от системы, описанной в [1], где решение этой задачи возлагается на астросистему. Следует отметить, что обе ИС могут быть реализованы одновременно на базе единого блока гироскопов в качестве автономного