

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 автоматизации 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

бортового измерителя для двух видов внешней информации — астро- и спутниковой — с учетом доступности каждого из них.

В настоящей работе аналитическое комплексирование ИС приводит к постановке обратной задачи вида «состояние—измерение» [2], для решения которой предлагается мультимодельный алгоритм динамического обращения нейрореподобного типа [1, 3], ассоциированный с некоторыми положениями нейродинамики и нейроморфизма, характеризующими мышление следующим образом: целенаправленность [4, 5], т. е. ориентация процессов в центральной нервной системе (ЦНС) на устойчивое решение конкретной задачи; структурная блочность нейросистемы как необходимое условие мышления [6] — формирование ЦНС синхронизированных блоков, разыгрывающих разные возможные сценарии отклика на поступающую в ЦНС информацию; привыкание [7] — изменяющаяся во времени динамика отклика нейросети на стимуляцию.

Отметим, что наряду с приведенными ассоциациями допустимы и обратные: процесс устойчивого усвоения информации конкретной технической системой можно сопоставить с процессом формирования и эволюции популяций «живых» (биологических) нейронов в неокортекстном модуле мозга [4], продуцирующем образы (в данном случае математические) реальных объектов, и механизм настройки синаптических коэффициентов «живых» нейронов, обуславливающий функциональность данной популяции в условиях неопределенности информации, поступающей из внешней среды.

Основные модельные представления. Рассмотрим геометрические образы, порождаемые формализмом функционирования НСС. Введем правые ортогональные системы отсчета $o\xi = o\xi_1\xi_2\xi_3$ с началом o в центре масс Земли и осями $o\xi_1$, $o\xi_3$, направленными соответственно в созвездие Овна и вдоль оси собственного вращения Земли; систему $o\eta = o\eta_1\eta_2\eta_3$ с осью $o\eta_3 \equiv o\xi_3$ и осью $o\eta_1$, лежащей в плоскости гринвичского меридиана; $o_1y = o_1y_1y_2y_3$ — приборную систему отсчета с началом o_1 , совмещенным с одним из N приемников сигналов (ПС) под номером $i = 0$, т. е. ПС _{i} , $i = 0$, так что векторы $y^{(i)}$, $i = \overline{1, N-1}$ с началом в o_1 характеризуют размещение в o_1y остальных ПС _{i} , $i = \overline{1, N-1}$ (далее положим $N = 3$); $o_1x = o_1x_1x_2x_3$ — подвижную систему с осью o_1x_3 , направленной вдоль радиус-вектора места ТП и осями o_1x_1 , o_1x_2 , направленными соответственно на географические Восток и Север.

НСС доставляет на борт ТП информацию о месте ПС _{i} ($i = \overline{0, 2}$) в системе отсчета $o\eta$, так что $\tilde{\eta}^{(i)} = \eta^{(i)} - \tilde{\epsilon}^{(i)}$, где $\eta^{(i)}$, $\tilde{\eta}^{(i)}$ — это соответственно фактические и измеренные векторы координат ПС _{i} , $\tilde{\epsilon}^{(i)}$ — погрешность навигационной привязки. Образует разности $\delta\tilde{\eta}^{(j)} = \tilde{\eta}^{(j)} - \tilde{\eta}^{(0)} = \delta\eta^{(j)} - \epsilon^{(j)}$, где $\delta\eta^{(j)} = \eta^{(j)} - \eta^{(0)}$, $\epsilon^{(j)} = \tilde{\epsilon}^{(j)} - \tilde{\epsilon}^{(0)}$, $j = \overline{1, 2}$, и, кроме того, исходные представления о системе ПС в $o\eta$ дополним связями $\tilde{y}^{(i)} = y^{(i)} - \tau^{(i)}$, $i = \overline{1, 2}$, интерпретируя $y^{(i)}$ как измеренные значения, а $\tau^{(i)}$ — как не зависящую от времени погрешность измерения. Очевидно, что $y^{(i)}$ и $\delta\eta^{(i)}$, $i = \overline{1, 2}$, — пред-

ставления одних и тех же векторов в разных системах — $o\eta$, связанные ортогональными преобразованиями:

$$y^{(i)} = A^{(y)} \delta\eta^{(i)}, \quad i = \overline{1, 2}. \quad (1)$$

Перейдем к «геометрии движения» [8], или кинематике, отождествив ее с представлениями об эволюции матрицы $A^{(y)}$ при вращении приборного трехгранника $o\eta$. Обозначим через ω , u , Ω векторы угловых скоростей относительного вращения координатных трехгранников $o\eta$ и $o\xi$, $o\eta$ и $o\xi$, $o\eta$ и $o\eta$, соответственно. Тогда

$$\omega = u + \Omega, \quad (2)$$

где ω измеряется гироскопическими датчиками, u — угловая скорость собственного вращения Земли, известная в проекциях на оси трехгранника $o\eta$, Ω очевидным образом вычисляется из (2). Изложенное дает основание воспользоваться для описания эволюции A кинематическим уравнением Пуассона [8]:

$$\dot{A} = -\hat{\Omega}A, \quad A(t_0) = A^{(0)}, \quad (3)$$

где $\hat{\Omega} = (\Omega_{ij})$ — кососимметрическая матрица, заполняемая

компонентами вектора $\Omega = (\Omega_k)$ так, что $\Omega_{ij} = e_{ijk}\Omega_k$; $i, j, k = \overline{1, 3}$.

Уравнения (1), (3), вместе взятые, составляют математическую модель обратной (кинематической) задачи, решая которую в реальных условиях присутствия инструментальных погрешностей измерений и вычислений, оценивают $A(t)$. Суть решения математически поставленной обратной задачи тесно связана с так называемой задачей коррекции [9] и состоит в следующем. В указанных реальных условиях

интегрируется уравнение (3), что дает оценку $\tilde{A}(t)$ матрицы $A(t)$ с некоторой погрешностью $\delta A(t)$ относительно которой принимаем, что $\delta A = -\hat{\beta}A$. Это означает, что пространственное положение трехгранника $o\eta$ отличается от того, которое

характеризуется матрицей $\tilde{A}(t)$ на вектор малого угла вращения β . Соответственно и преобразование (1) с матрицей $\tilde{A}$ выполняется с погрешностью $\delta y = \hat{y}\beta$. Изложенное позволяет, во-первых, определить задачу коррекции как задачу оценки вектора β с последующим уточнением матрицы $\tilde{A}$

в соответствии с формулой $A^* = (E + \hat{\beta}^*)\tilde{A}$, где A^* — новая оценка A , β^* — оценка β , E — единичная матрица; во-вторых, интерпретировать задачу коррекции как обратную задачу с математической моделью следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\beta} &= -\hat{\Omega}\beta + m + v; \quad \dot{m} = \mu(t); \\ \dot{\Omega} &= \chi(t); \quad \tilde{\Omega} = \Omega + m + v; \\ \delta\tilde{y}^{(i)} &= \hat{y}^{(i)}\beta + \Delta^{(i)}, \quad i = \overline{1, 2}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\tilde{\Omega}$ — значение Ω , определяемое согласно (2), m , v — математическое ожидание и несмещенная шумовая составляющая векторного случайного процесса, отождествляемого с вектором инструментальных погрешностей такого опре-

деления Ω ; $\delta \tilde{\mathbf{y}}^{(i)}$ — невязка измерений вектора $\mathbf{y}^{(i)}$, $\Delta^{(i)}$ — вектор инструментальных погрешностей этих измерений; $\mu(t)$, $\chi(t)$ — скорости изменения векторов соответственно $\mathbf{m}$, Ω .

Введем обозначения: $\mathbf{x}^T = (\beta^T, \mathbf{m}^T, \Omega^T)$ — вектор оцениваемых состояний; $\mathbf{z}^T = \left((\delta \tilde{\mathbf{y}}^{(1)})^T, (\delta \tilde{\mathbf{y}}^{(2)})^T, \tilde{\Omega}^T \right)$ — вектор измерений; $\mathbf{C}$, $\mathbf{H}$ — матрицы коэффициентов при векторе $\mathbf{x}$ в правых частях уравнений состояний и измерений, соответственно $\mathbf{q}^T = (\mathbf{v}^T, \mu^T, \chi^T)$, $\mathbf{r}^T = (\mathbf{v}^T, (\Delta^{(1)})^T, (\Delta^{(2)})^T)$ — векторы не-

делируемых составляющих возмущений; «Т» — символ транспонирования векторов и матриц.

Перепишем (4) в общем виде:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{q}, \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0; \mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{r}. \quad (5)$$

Целью решения (5) является оценка в текущем времени вектора $\mathbf{x}$. Полученные оценки могут быть использованы в режиме замыкания моделей (3), (4), когда оценка Ω^* активируется при интегрировании (3), что в конечном итоге влияет и на оценку $\mathbf{A}^*$.

Алгоритм нейросетевого динамического псевдообращения.

Задачи вида «состояние—измерение» являются задачами наблюдения. В таком качестве задача (5) или (4) поставлена математически корректно, что подтверждают легко устанавливаемый факт наблюдаемости пары $(\mathbf{C}, \mathbf{H})$ и ее верификация в условиях численного эксперимента, некоторые результаты которого приведены ниже. Заметим, что нарушение математической корректности приводит к явлениям, которые можно назвать парадоксами наблюдения — неустойчивость решения и его неоднозначность, влекущая субъективное толкование результата. С этим явлением сталкивается, например, квантовая механика — парадоксы «кота Шредингера», пребывания частицы в двух местах одновременно, превышение скорости света при передаче информации. В задачах определения движения, к которым относится и задача (4), наиболее выразительно парадоксы квантовой теории могут быть продемонстрированы примером, когда положение объекта на плоскости находят методом засечек, измеряя расстояния до двух пунктов наблюдения, и в итоге получают два решения — две пары координат объекта, симметрично расположенных относительно прямой, проходящей через пункты наблюдения. Вместе с тем любая дополнительная информация может способствовать выбору правильного решения, если известно, что пункты наблюдения расположены на береговой линии, а наблюдается морской объект.

При решении (5) следуем той же концепции нейроморфизма, что и в [1], и в качестве исходного рассматриваем алгоритм калмановского типа [2], встроенный в решение экстремальной задачи и обуславливающий механизм настройки синаптических коэффициентов, гарантирующих асимптотическую устойчивость решения. Тогда экстремальная задача в полном виде представлена следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} F &= 0,5 \|\mathbf{z} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2, \dot{\mathbf{x}}^* = \mathbf{C}\mathbf{x}^* + \mathbf{K}(\mathbf{z} - \mathbf{H}\mathbf{x}^*), \mathbf{x}^*(0) = 0, \\ \mathbf{K} - \mathbf{D}\mathbf{H}^T(\mathbf{R}^*)^{-1}, \dot{\mathbf{D}} &= \mathbf{C}\mathbf{D} + \mathbf{D}\mathbf{C}^T - \mathbf{D}\mathbf{H}^T(\mathbf{R}^*)^{-1}\mathbf{H}\mathbf{D} + \mathbf{Q}^*, \\ \mathbf{D}(0) &= \mathbf{D}_0, \\ (\mathbf{Q}^*, \mathbf{R}^*) &= \arg \min_{\mathbf{Q}, \mathbf{R}} F, \\ \mathbf{Q} &= \text{diag} \left(\sigma_v^2, \sigma_v^2, \sigma_v^2, \sigma_\mu^2, \sigma_\mu^2, \sigma_\mu^2, \sigma_\chi^2, \sigma_\chi^2, \sigma_\chi^2 \right), \\ \mathbf{R} &= \text{diag} \left(\sigma_\Delta^2, \sigma_\Delta^2, \sigma_\Delta^2, \sigma_\Delta^2, \sigma_\Delta^2, \sigma_\Delta^2 \right), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $\mathbf{x}^*$ — текущая оценка $\mathbf{x}$.

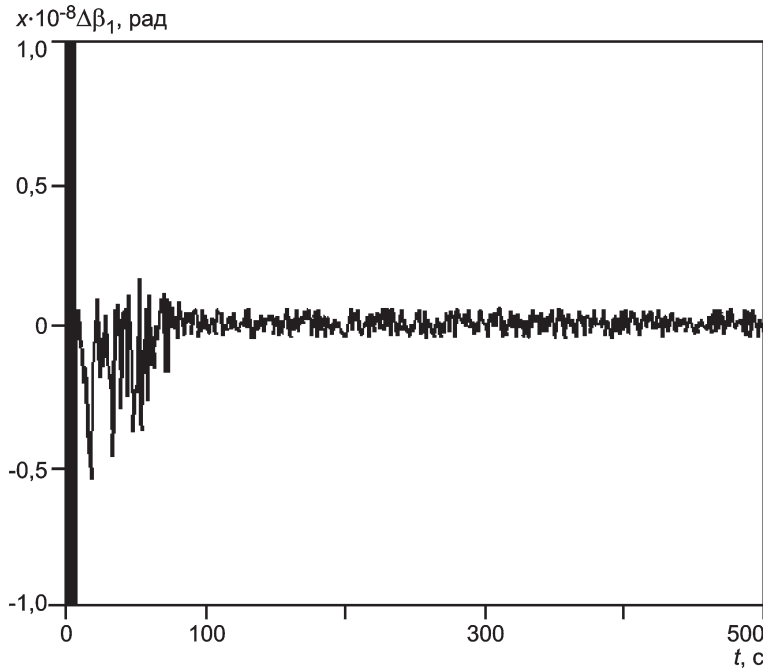


Рис. 1. Эволюция во времени погрешности оценивания β_1

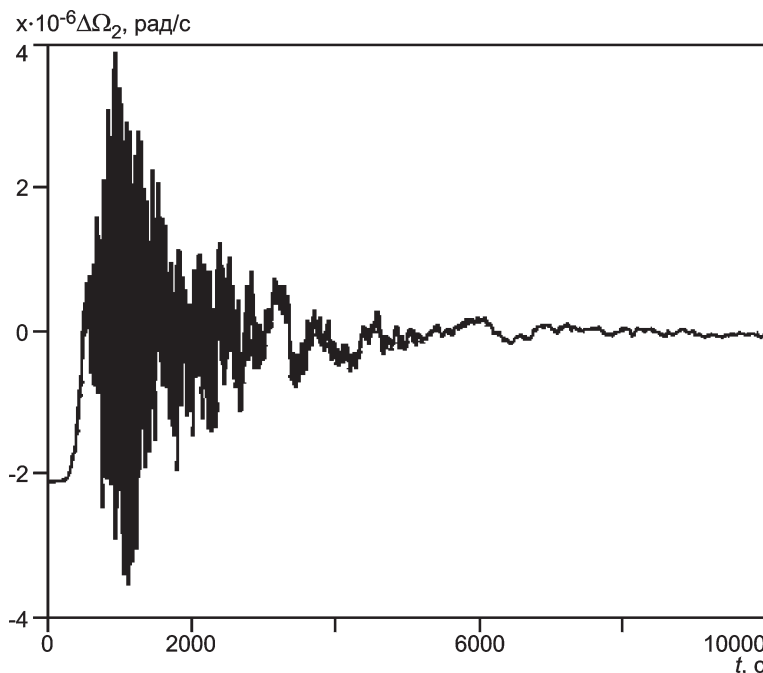


Рис. 2. Эволюция во времени погрешности оценивания величины Ω_2

Из (6) следует, что задача решается в пространстве четырех параметров — $\sigma_v, \sigma_\mu, \sigma_\chi, \sigma_\Delta$. Заметим, что в случае ее решения перебором значений элементов матрицы $\mathbf{K}$ пришлось бы иметь дело с числом параметров $9 \times 9 = 81$ и дополнительно с проблемой выхода значений $\mathbf{K}$ в область, обеспечивающую сходимость решения.

При численном решении задачи предложена реализация мультисистемы $3^4 = 81$ из параллельных систем — алгоритмов калмановского типа. Работа каждого из них выполняется при одинаковых для всех стартовых условиях, но при разных значениях параметров $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$.

Победившей в таком соревновательном процессе признается система с наименьшим значением F , а значения ее переменных $\mathbf{x}^*$, $\mathbf{D}$ принимаются в качестве стартовых на следующем шаге решения для всех систем мультисистемы; новый же набор параметров $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$ формируется около значений параметров $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$ победившей системы (как центра). Например, если $\tilde{\sigma}_\Delta$ — значение параметра σ_Δ системы-победителя, то новый набор значений этого параметра есть $\{\tilde{\sigma}_\Delta(1-\alpha), \tilde{\sigma}_\Delta, \tilde{\sigma}_\Delta(1+\alpha)\}$, $0 < \alpha < 1$. Аналогичным образом назначаются новые значения параметров $\sigma_v, \sigma_\mu, \sigma_\chi$.

Вычислительный эксперимент. Как и в [1] приведем результаты численного исследования для случая движения объекта в восточном направлении по географической параллели на широте $\varphi = 45^\circ$ с относительной (к Земле) скоростью $V = 100$ м/с, когда приборный трехгранник ou моделирует идеальный трехгранник ox .

При имитационном моделировании предполагали, что приемники НСС размещены на объекте так, что $\mathbf{y}^{(1)} = (3m, 0, 0)^T$, $\mathbf{y}^{(2)} = (0, 3m, 0)^T$, а погрешности относительных измерений — случайные процессы с равномерным распределением на интервале $[-\sqrt{3} \cdot 10^{-2}, \sqrt{3} \cdot 10^{-2}]$, м; инструментальные погрешности гироскопических измерителей — случайные процессы с равномерным распределением на интервале $[m_i(t) - 8,5 \cdot 10^{-6}, m_i(t) + 8,5 \cdot 10^{-6}]$, с^{-1} , где $i = \overline{1,3}$, $m_i(t)$ — синусоиды с разными значениями амплитуд, периодов и фаз. Таким образом, для обоих типов измерений (спутниковых и инерциальных) средние квадратические отклонения (СКО) от средних соответственно равны 0,01 м и 1,0 град/час.

При решении задачи с помощью предложенной нейроморфной сети начальные значения параметров настройки $\sigma_v, \sigma_\mu, \sigma_\chi, \sigma_\Delta$ равны соответственно 10^{-5} с^{-1} , 10^{-5} с^{-2} , 10^{-7} с^{-2} , 10^{-6} м.

Некоторые результаты, характеризующие высокую степень эффективности решения задачи, представлены на рис. 1, 2, где $\Delta\beta_1 = \beta_1 - \beta_1^*$, $\Delta\Omega_2 = \Omega_2 - \Omega_2^*$ — погрешности оценок соответствующих величин. В экспериментах величина

показателя $\tau = t_R/t_m$ достигала больших значений, а именно, $\tau > 12$, где t_m — время моделирования реального процесса длительностью t_R , что свидетельствует о высоких реализационных возможностях предложенного решения в режиме реального времени на современных вычислительных средствах.

Заключение. Предложенная нейросетевая организация ИС способна обеспечить высокую эффективность ее функционирования, а предложенный механизм работы нейросети, основанный на концепции оптимальности калмановского типа, может быть интерпретирован в качестве возможной математической модели целенаправленной самоорганизации биологических нейронов. Рассмотренная ИС, в силу глобальной доступности позиционной информации от НСС, весьма перспективна для широкого применения на маневренных ТП для физических экспериментов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 11-01-98501-р-восток_а) и ДВО РАН (грант № 12-1-0-03-005).

Литература

1. **Девятисильный А. С., Числов К. А.** Нейроморфная модель коррекции астроинерциальной системы // Измерительная техника. 2013. № 7. С. 18—20; **Devyatitsil'nyi A. S., Chislov K. A.** Neuronal model for correction of an astroinertial system // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N. 7. P. 355—358.
2. **Kalman R. E., Falb P. L., Arbib M. A.** Topics in mathematical system theory. New York, 1969.
3. **Девятисильный А. С.** Нейросетевая система коррекции векторной гравиинерциальной навигационной системы // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 12. С. 42—45.
4. **Олескин А. В.** Нейрохимия и симбиотическая микрофлора человека: биополитические аспекты // Вестник РАН. 2009. Т. 79. № 5. С. 431—438.
5. **Аршавский Ю. И.** И. М. Гельфанд о математике и нейрофизиологии // Вестник РАН. 2010. Т. 80. № 10. С. 937—940.
6. **Иваницкий Г. Р., Медвинский А. Б., Цыганов М. А.** От динамики популяционных волн, формируемых живыми клетками, к нейроинформатике // УФН. 1994. Т. 164. № 10. С. 1041—1072.
7. **Павлов А. Н. и др.** Вейвлет-анализ в нейродинамике // УФН. 2012. Т. 182. № 9. С. 905—938.
8. **Ишлинский А. Ю.** Классическая механика и силы инерции. М.: Наука, 1987.
9. **Андреев В. Д.** Теория инерциальной навигации. Корректируемые системы. М.: Наука. 1967.

Дата принятия 15.04.2014 г.