

Нейроподобная инерциально-спутниковая векторная гравиметрическая система

А. С. ДЕВЯТИСИЛЬНЫЙ, К. А. ЧИСЛОВ

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия
e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Предложены концепция нейроподобия и модель системы оценки аномалии напряженности гравитационного поля Земли. Приведены результаты вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: нейроморфизм, гравитационное поле Земли, инерциальная навигационная система.

The conception of neurosimilarity and a model of system for determining the Earth's gravitational field strength anomaly are proposed. The results of numerical experiment are presented.

Key words: neuromorphism, Earth's gravitational field, inertial navigation system.

В статье рассмотрена модель интегрированной системы, основанная на общности теоретико-механических представлений об инерциальной навигации и гравиметрии. Система комплексируется динамическим блоком трехкомпонентной инерциальной навигационной системы (3D-ИНС) — источником инерциальной информации, получаемой только от ньютонометров, а также приемным блоком навигационной спутниковой системы (НСС, например ГЛОНАСС) в качестве источника текущей информации о координатах места объекта-носителя и его скорости относительно Земли. Такой состав системы достаточен для построения на борту объекта приборного координатного трехгранника, являющегося физической моделью некоторого трехгранника, выбранного в качестве идеального, относительно которого предполагается судить об угловых эволюциях самого объекта.

Ниже проблема комплексирования инерциальной и спутниковой информации интерпретируется как задача коррекции 3D-ИНС по позиционной спутниковой информации или в математической постановке как обратная задача в форме «состояние—измерение», обуславливающей возможность оценки аномалии напряженности гравитационного поля Земли (GE-поля) на траектории движения объекта. Для решения указанной задачи коррекции предлагается мульти-модельный алгоритм динамического обращения нейроподобного типа, интерпретирующий некоторые достаточно общие положения нейрофизиологии и нейроморфизма [1—4], реализуемые в рамках калмановской теории наблюдения [5].

Основные модельные представления. Полагаем, что приборный координатный трехгранник $\tilde{\mathbf{q}} = \tilde{q}_1 \tilde{q}_2 \tilde{q}_3$ с началом $\tilde{\mathbf{o}}$ в центре масс объекта-носителя физически моделирует правый ортогональный трехгранник $\mathbf{o}_1 \mathbf{o}_2 \mathbf{o}_3$ с началом в центре масс Земли, осями $\mathbf{o}_1$ и $\mathbf{o}_2$, направленными соответственно на географические Восток и Север, и осью $\mathbf{o}_3$ — по радиусу-вектору места объекта, так что в идеальном случае соответствующие оси трехгранников $\tilde{\mathbf{q}}$ и $\mathbf{o}$ параллельны. Кроме того, рассматриваем ограниченную модель 3D-ИНС, представляя ее только динамической группой урав-

нений (ДГУ). Тогда при наличии полной позиционной информации (т. е. о радиусе-векторе места объекта), наиболее доступным источником которой является НСС, например, типа ГЛОНАСС, исходная идеализированная математическая модель задачи наблюдения может быть отождествлена со следующей обратной задачей вида «состояние—измерение»:

$$\mathbf{D}\mathbf{q} = \mathbf{p}, \quad \mathbf{q}(0) = \mathbf{q}_0; \quad \mathbf{D}\mathbf{p} = \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}, \quad \mathbf{p}(0) = \mathbf{p}_0; \quad \mathbf{z} = \mathbf{q},$$

где $\mathbf{q}$, $\mathbf{p}$ — векторы положения и абсолютной линейной скорости в проекциях на оси трехгранника $\mathbf{o}\mathbf{q}$; $\mathbf{D} = d/dt + \hat{\boldsymbol{\omega}}$ — оператор абсолютной производной; $\boldsymbol{\omega}$ — абсолютная угловая скорость вращения трехгранника $\mathbf{o}\mathbf{q}$; $\hat{\boldsymbol{\omega}}$ — кососимметричная матрица (тензор вращения), так что $\hat{\boldsymbol{\omega}}\mathbf{q} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{q}$; $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ — напряженность GE-поля; $\mathbf{F}$ — равнодействующая сил негравитационной природы; $\mathbf{z}$ — вектор измерений, доставляемых НСС.

Уравнения, описывающие эволюцию во времени векторов $\mathbf{q}$ и $\mathbf{p}$, — это ДГУ или уравнения состояния, которые при функционировании системы интегрируются. При этом наличие погрешностей $\delta\mathbf{q}_0$ и $\delta\mathbf{p}_0$ в начальных данных $\mathbf{q}_0$ и $\mathbf{p}_0$, инструментальных погрешностей $\mathbf{f}$ при измерениях ньютонометрами равнодействующей сил негравитационной природы $\mathbf{F}$, погрешностей $\mathbf{v}$ оценки абсолютной угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$ по данным НСС, а также погрешности $\mathbf{g} = (g_1, g_2, g_3)^T$ при моделировании напряженности GE-поля $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ приводит к погрешностям $\delta\mathbf{q}$ и $\delta\mathbf{p}$ интегрирования ДГУ. С учетом этого можно поставить задачу оценки значений $\delta\mathbf{q}$, $\delta\mathbf{p}$ и $\mathbf{g}$, отождествляемую с обратной задачей «в малом» типа «состояние—измерение»:

$$\mathbf{D}\delta\mathbf{q} = \delta\mathbf{p} - \hat{\mathbf{v}}\mathbf{q}, \quad \delta\mathbf{q}(0) = \delta\mathbf{q}_0;$$

$$\mathbf{D}\delta\mathbf{p} = -\frac{\mu}{r^3}\delta\mathbf{q} + \mathbf{g} + \mathbf{f} - \hat{\mathbf{v}}\mathbf{p} + \frac{3\mu\epsilon_r}{r^4}\mathbf{q}, \quad \delta\mathbf{p}(0) = \delta\mathbf{p}_0; \quad (1)$$

$$\dot{\mathbf{g}} = \boldsymbol{\chi}(\mathbf{t}), \quad \mathbf{g}(0) = \mathbf{g}_0; \quad \delta\mathbf{z} = \delta\mathbf{q} + \boldsymbol{\epsilon},$$

где $r = |q_3|$; $g = G(q) - G_m(q)$ — аномалия напряженности GE-поля; $G_m(q) = -\mu q/r^3$ — модель напряженности GE-поля, в которой при интегрировании ДГУ значение r замещается измеренным значением $r + \varepsilon_r$; ε_r — погрешность измерения; μ — гравитационный параметр Земли; $\chi(t)$ — скорость изменения вектора g на траектории объекта-носителя; δz — вектор невязок измерений; $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)^T$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_{q_1}$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_{q_2}$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_r = \varepsilon_{q_3}$; ε_{q_1} , ε_{q_2} , ε_r — погрешности определения координат носителя при помощи НСС.

Для последующего удобно представить (1) в общем виде

$$\delta \dot{x} = A \delta x + w, \quad \delta x(0) = \delta x_0; \quad \delta z = H \delta x + \varepsilon,$$

где $\delta x^T = (\delta q^T, \delta p^T, g^T)$ — вектор состояния, $\dim \delta x = n = 9$; A , H — матрицы, а w — вектор, содержание и смысл которых соответствуют (1) и вполне очевидны. Для решения задач типа «состояние—измерение» применяются алгоритмы динамического обращения [6].

Требуется получить оценку вектора δx , т. е. $\delta x^* = (\delta q_1^*, \delta q_2^*, \delta q_3^*, \delta p_1^*, \delta p_2^*, \delta p_3^*, g_1^*, g_2^*, g_3^*)^T$, содержащую оцен-

ку $g^* = (g_1^*, g_2^*, g_3^*)^T$ аномалии g напряженности GE-поля, и оценку α^* вектора малого угла α поворота приборного трехгранника oq относительно идеального трехгранника ou . Оценки α^* имеют компоненты $\alpha_1^* = -\delta q_2^*/r$, $\alpha_2^* = \delta q_1^*/r$, $\alpha_3^* = \alpha_2^* \tan \varphi$, где φ — широта места объекта, которые далее используются в процедуре приведения трехгранника oq к трехграннику ou . Заметим, что рассмотренная система не содержит гироскопических измерителей угловой скорости ω , и алгоритм функционирования не требует интегрирования известных [7] уравнений кинематической группы (уравнений Пуассона).

Концепция нейросетевого алгоритма динамического обращения. Известно, что понятие «искусственная нейросеть» ассоциировано с представлениями о деятельности мозга. В связи с этим отметим некоторые из положений, характеризующих мышление, а именно: целенаправленность [2, 3] — ориентация процессов в центральной нервной системе (ЦНС) на устойчивое решение конкретной задачи; структурная блочность нейросистемы как необходимое условие мышления [1] — формирование синхронизированных блоков в ЦНС, которые по-разному откликаются на поступающую в ЦНС информацию, при этом возможно множество решений, вообще говоря, разноудаленных от оптимального, но содержащих наилучшее на каждом временном шаге выбора одного из них; привыкание [4] — ситуация, когда наблюдается изменяющаяся во времени динамика отклика нейросети на стимуляцию и сеть может даже перестать реагировать на очередной стимул.

В представляемой здесь искусственной нейросети на базе алгоритма калмановского типа реализуются первые два положения — целенаправленность, проявляющая себя как свойство асимптотической устойчивости процесса динамического обращения, и блочность — многомодельная структура сети. Последнее же из положений — привыкание — интерпретируется как свойство асимптотической устойчивой системы наблюдения, реализуемой сетью, с некоторого

момента времени выходить на режим функционирования, близкий к стационарному (квазистационарному), и слабо реагировать на возмущения, динамические характеристики которых далеки от характеристик системы.

В качестве исходной парадигмы алгоритма динамического обращения для решения задачи рассмотрим линейный алгоритм (фильтр) следующего вида:

$$\delta \dot{x}^* = A \delta x^* + K(\delta z - H \delta x^*), \quad \delta x^*(0) = \delta x_0, \quad (2)$$

где $K = K^*$; $K^* = \arg \min_K J$; $J = 0,5 \|\delta z - H \delta x^*\|^2$; $\|\cdot\|$ — евклидова

норма вектора.

Если пара матриц (A, H) наблюдаема, то выбор матричного коэффициента обратной связи K в соответствии с указанным может обеспечить асимптотическую устойчивость алгоритма (2). О достижимости этого свойства алгоритма свидетельствует следующее: если интерпретировать (2) как алгоритм калмановского типа, т. е. положить $K = D H^T R^{-1}$, где D удовлетворяет матричному уравнению Риккати $\dot{D} = A D + D A^T - D H^T R^{-1} H D + Q$, $D(0) = D_0$ с симметрическими положительно определенными матрицами Q , R , D_0 , то уравнение (2) асимптотически устойчиво [5].

Из изложенного следует, что помимо прямого выбора — $K = K^*$, $K = \arg \min_K J$ — допустим альтернативный: $K = K^*$,

$$K^* = K^*(Q^*, R^*), \quad (Q^*, R^*) = \arg \min_{Q, R} J, \quad \text{на который обращено}$$

внимание в этой статье. Достоинство его в том, что он гарантирует асимптотическую устойчивость (2) и сходимость предлагаемого ниже решения экстремальной задачи.

Теперь заметим следующее. Модель (1) построена на основе теоретико-механических и математических представлений, т. е. на абстрактных образах как продуктах деятельности и развития человеческого мозга. Эти абстракции обязаны нейролингвистическому сегменту мозга, в значительной степени локализованному в неокортексном модуле (новая кора больших полушарий мозга) [1]. Поэтому об алгоритме (2), построенном на представлениях модели (1), можно говорить, что он нейроморфен (нейроподобен), и отождествлять его с искусственной динамической нейросетью с синаптическими (по сути) коэффициентами A , H , K и вектором-функцией активации $\psi[\cdot]$, такой, что $\psi[K(\delta z - H x^*)] = K(\delta z - H x^*)$. Особенность этой нейросети состоит в том, что ее структура и значения части синаптических коэффициентов (A и H) предопределены теоретически, а обучение происходит в процессе решения экстремальной задачи и отождествимо с адаптивной настройкой матричного параметра $K = K(Q, R)$.

При численном исследовании задачи (2) Q и R выбраны в виде $Q = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_1^2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_2^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \sigma_3^2, \sigma_3^2)$, $R = \text{diag}(\sigma_4^2, \sigma_4^2, \sigma_4^2)$; таким образом, в этом варианте экстремальная задача решается в пространстве только четырех параметров: $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2$ и σ_4^2 . Заметим, что в исходном случае ее пришлось бы решать в пространстве 27 параметров K_{ji} .

Для решения экстремальной задачи предлагается использовать мультисистему из $3^4 = 81$ параллельных систем — алгоритмов калмановского типа (в этом суть механизма нейроморфизма). Работа каждого из них выполняется при одинаковых для всех стартовых условиях на шаге решения, но при разных значениях параметров $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{R}$. В таком соревновательном процессе победившей признается система с наименьшим значением J , а значения ее переменных $\mathbf{x}^*$ и $\mathbf{D}$ принимаются в качестве стартовых на следующем шаге решения для всех систем мультисистемы; новый же набор значений параметров $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{R}$ формируется около значений этих параметров (как центра) победившей системы. Например, если $\tilde{\sigma}_1$ — значение параметра σ_1 системы-победителя, то новым набором значений этого параметра будет $\{\tilde{\sigma}(1 - \alpha), \tilde{\sigma}_1, \tilde{\sigma}(1 + \alpha)\}$; $0 < \alpha < 1$; аналогичным образом назначаются новые значения параметров σ_2, σ_3 и σ_4 . Реализация такой нейросети требует моделирования 4374 эволюционных уравнений первого порядка (включая уравнения Риккати).

Еще раз возвращаясь к исходному варианту экстремальной задачи с 27 параметрами K_{ij} , отметим, что при формировании наборов значений параметров K_{ij} так же, как параметров σ_i , пришлось бы реализовывать мультисистему с $3^{27} = 7,625597484987 \cdot 10^{12}$ параллельными системами (2) (с общим числом эволюционных уравнений первого порядка $9 \cdot 3^{27} = 3^{29} = 6,8630377364883 \cdot 10^{14}$) и, кроме того, приводить совокупность значений параметров K_{ij} в область (вообще говоря, априорно неизвестную), в которой обеспечивается асимптотическая устойчивость динамической нейросистемы.

Закljučая раздел, отметим, что концепция блочности (многомодельности) сохраняется при обоих вариантах экстремальной задачи, если мощности вычислителей на временном шаге принятия решения допускают последовательные реализации отдельных моделей (алгоритмов) в циклах с полными переборами комбинаций значений параметров (т. е. K_{ij} или σ_i) в режиме реального времени. Именно так организован вычислительный эксперимент, некоторые результаты которого представлены ниже.

Вычислительный эксперимент. Его цель — верификация предложенной концепции нейросетевой системы коррекции векторной гравиметрической 3D-ИНС и оценка возможности ее практической реализации. Эксперимент проводился в вычислительной среде пакета Matlab для случая движения объекта по географической параллели (широта 45°) с относительной (к Земле) скоростью 100 м/с в восточном направлении. Предполагалось, что погрешности всех измерителей представлены равномерно распределенными шумами с нулевыми средними и среднеквадратическими значениями соответственно $\sigma_\omega = 0,001^\circ/\text{ч}$ — для НСС при оценке угловой скорости, $\sigma_f = 10^{-3} \text{ м/с}^2$ — для ньютометров и $\sigma_{\text{поз}} = 1 \text{ м}$ по каждой координате для системы спутникового позиционирования. Интервал дискретизации решения задачи по времени — 1 с. Функции $g_i(t)$, $i = \overline{1,3}$, взяты синусоидальными и отличающимися друг от друга амплитудами и фазами.

На рис. 1 представлены графики функции $g_1(t)$ (белая линия) и ее нейросетевой оценки $g_1^*(t)$. Аналогичную картину имеют компоненты g_2, g_3 аномалии напряженности GE-поля.

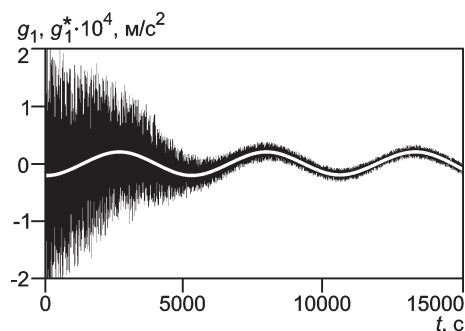


Рис. 1. Функция g_1 (белая линия) и ее оценка g^* в зависимости от времени

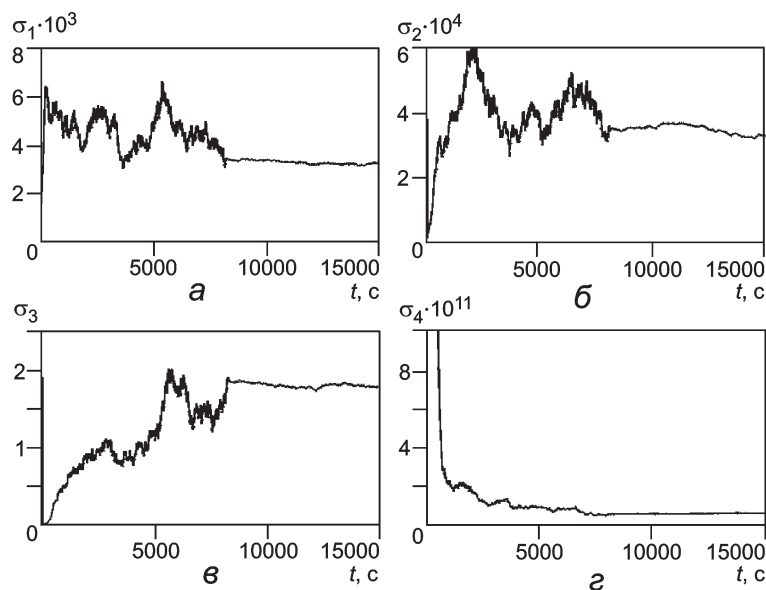


Рис. 2. Эволюции параметров $\sigma_1 - \sigma_4$, управляющих синаптическими коэффициентами K_{ij}

На рис. 2 приведены графики эволюции параметров $\sigma_1 - \sigma_4$, управляющих синаптическими коэффициентами K_{ij} .

Для оценки возможности работы предложенной нейросетевой системы в режиме реального времени введен показатель $\tau = T_p / T_m$, где T_m — интервал времени, затрачиваемый при численном моделировании реального процесса длительностью T_p . Этот показатель в рассматриваемом случае $\tau = 11$, что вполне приемлемо (очевидно, должно быть $\tau > 1$), тем более, если учесть, что система коррекции будет реализовываться специализированными вычислительными средствами.

Выводы. Предложена концепция нейроморфизма, основанная на интерпретации современных представлений о развитии и функционировании головного мозга человека; разработан и численно исследован нейроморфный алгоритм коррекции безгироскопной 3D-ИНС с функцией оценки аномалии напряженности GE-поля, в основу которого положена мультимодельная интерпретация калмановского фильтра; расширено представление об алгоритмах динамического обращения.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ-ДВО (грант № 11-01-98501-р_восток_а) и ДВО РАН (грант № 12-1-0-03-005).

Л и т е р а т у р а

1. Иваницкий Г. Р., Медвинский А. Б., Цыганов М. А. От динамики популяционных волн, формируемых живыми клетками, к нейроинформатике // Успехи физических наук. 1994. Т. 164. № 10. С. 1041—1072.
2. Олескин А. В. Нейрохимия и симбиотическая микрофлора человека: биополитические аспекты // Вестник РАН. 2009. Т. 79. № 5. С. 431—438.

3. Аршавский Ю. И., Гельфанд И. М. О математике и нейрофизиологии // Вестник РАН. 2010. Т. 80. № 10. С. 937—940.
4. Павлов А. Н. и др. Вейвлет-анализ в нейродинамике // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. № 9. С. 905—938.
5. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971; Kalman R. E. et al. Topics in mathematical system theory. N.Y.: McGraw-Hill, 1969.
6. Осипов Ю. С., Кряжмский А. В. Задачи динамического обращения // Вестник РАН. 2006. Т. 76. № 7. С. 615—624.
7. Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации. Корректируемые системы. М.: Наука, 1967.

Дата принятия 24.05.2013 г.

621.3.014.33:389

Концепция индукционно-динамической катапульты баллистического лазерного гравиметра

В. Ф. БОЛЮХ*, А. И. ВИННИЧЕНКО**

* Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, e-mail: vfbolyukh@gmail.com

** Национальный научный центр «Институт метрологии», Харьков, Украина, e-mail: vinn96@eandex.ua

Предложена конструктивная схема индукционно-динамической катапульты баллистического лазерного гравиметра, содержащая неподвижный индуктор и электропроводящий якорь, который вместе с пробным телом перемещается вдоль вертикальной оси. Катапульта позволяет повысить точность гравиметра при прямом преобразовании электрической энергии в кинетическую. Электронная схема катапульты обеспечивает два последовательных импульса тока в индукторе для подбрасывания и торможения якоря в рабочем цикле.

Ключевые слова: баллистический лазерный гравиметр, индукционно-динамическая катапульта, математическая модель, подбрасывание и торможение якоря.

A design scheme of induction-dynamic catapult of laser ballistic gravimeter containing the static inductor and electroconductive armature moving together with the test object along the vertical axis is suggested. The catapult allows to improve the gravimeter accuracy by direct conversion of electrical energy into kinetic. Its electronic circuit provides two successive pulses of current in the inductor for armature tossing and braking during operating cycle.

Key words: ballistic laser gravimeter, induction-dynamic catapult, mathematical model, tossing and braking armature.

Для высокоточных измерений абсолютного значения ускорения свободного падения g применяются баллистические лазерные гравиметры (БЛГ), в которых осуществляется подбрасывание пробного тела (ПТ), представляющего собой оптический уголкового отражателя в специальном корпусе и являющегося составной частью измерительной системы лазерного интерферометра Майкельсона [1—4]. Наиболее точно измерения g проводятся симметричным способом, при котором определяются интервалы пути и времени, пройденные ПТ на симметричных относительно вершины восходящей и нисходящей траекториях свободного движения в вакуумной камере БЛГ [5].

Высокая точность измерения абсолютного значения g достигается на БЛГ — установке ДЕТУ 02-02—96. Однако в полной мере ее метрологические параметры не удовлетворяют современным требованиям, что в значительной степени связано с конструкцией катапульты, в которой осуществляется опосредованное преобразование электрической

энергии источника в вертикальное подбрасывание ПТ [6, 7]. Катапульта данного гравиметра выполнена на основе симметричного шестизвенного рычажного механизма (пантографа) с центральной осью, закрепленной в камере. При подаче на обмотку электромагнита импульса тока массивный ферромагнитный якорь втягивается во внутреннюю полость. Перемещаясь вертикально вниз, он тянет пантограф, который из-за уменьшения радиальных и увеличения аксиальных размеров подбрасывает каретку с ПТ вертикально вверх с последующим улавливанием. Таким образом, в катапulte взаимосвязаны следующие процессы: перемещение якоря под действием магнитного поля обмотки электромагнита, передача электромагнитной силы тяги на центральную ось, поворот секций пантографа вокруг соответствующих осей, перемещение каретки. Для устранения боковых смещений якоря и каретки установлены в подшипниках, связанных со стенками вакуумной камеры.