

**А. С. Девятисильный**, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., devyatis@iacp.dvo.ru,  
**К. А. Числов**, канд. техн. наук, науч. сотр., kirillche@rambler.ru,  
 Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

## Модель конкурентного нейроморфного комплексирования информации в интегрированной спутниково-инерциальной навигационной системе<sup>1</sup>

*Показано, каким образом при бортовом многопозиционном приеме информации навигационной спутниковой системы и по инерциальной информации, доставляемой измерениями трех ньютонометров с ортогональными осями чувствительности, образуемыми подвижным координатным трехгранником, у последнего могут быть определены ориентация и вектор угловой скорости вращения в проекциях на собственные оси.*

*Математическая модель обратной задачи вида "состояние— измерение" представлена: 1) динамической группой уравнений функционирования безгироскопной инерциальной навигационной системы с вектором состояний, включающим координаты, удельные импульсы и угловые скорости вращения приборного трехгранника и 2) уравнениями измерений координат места объекта, отождествляемых с координатами вершины трехгранника в проекциях на его оси.*

*Динамическое псевдообращение (решение) задачи реализуется нейросетью, в основу модели которой положен алгоритм калмановского типа при его мультимодельном представлении, допускающем суждение о равноправной конкуренции моделей в процессе оценки вектора состояния. Вводятся понятия "ядерного" и "безъядерного" механизмов настройки синаптических коэффициентов нейросети. Выдвигаются гипотезы о возможности трансляции характеристик, используемых при описании искусственной нейросети, в представление об организации и функционировании популяций биологических ("живых") нейронов.*

*Приведены результаты вычислительных экспериментов.*

**Ключевые слова:** угловая скорость, ньютонометр, навигационная спутниковая система, нейроморфизм, обратная задача, алгоритм решения

### Введение

В работе [1] рассматривалась интегрированная инерциально-спутниковая навигационная система с функцией оценки напряженности гравитационного поля, в которой инерциальная навигационная система (ИНС) представлена двумя трехкомпонентными блоками инерциальных измерителей — ньютонометров (акселерометров) и гироскопических датчиков угловых скоростей — с осями чувствительности, совпадающими с осями ортогональной приборной системы отсчета, а навигационная спутниковая система (НСС) — однопозиционным приемником, размещенным в начале приборной системы отсчета и доставляющим полную (три координаты) позиционную информацию о своем местоположении в системе отсчета, жестко связанной с Землей. Кроме того, в работе [1] указывалось, что ориентация приборного координатного трехгранника может быть определена независимо, например астросистемой.

В настоящей работе предложена и исследована модель интегрированной системы, включающая безгироскопную ИНС и систему бортового многопозиционного приема информации НСС, что, как показано, дает возможность не только знать ориентацию приборного трехгранника, но и восполнить отсутствие гироскопических приборов для оценки вектора угловой скорости его вращения, т. е., в ко-

нечном итоге, определить все двенадцать параметров движения объекта как твердого тела.

### Основные модельные представления

Введем следующие правые прямоугольные системы отсчета:  $o\eta = o\eta_1\eta_2\eta_3$  — инерциальная система с началом в центре  $o$  Земли и осями, направленными на удаленные звезды;  $o\xi = o\xi_1\xi_2\xi_3$  — система, жестко связанная с Землей; компоненты вектора в  $o\eta$  и  $o\xi$  связаны линейным преобразованием  $\xi = A^{\xi\eta}\eta$  с известной матрицей  $A^{\xi\eta}$  размерности  $3 \times 3$ ;  $\tilde{o}q = \tilde{o}q_1q_2q_3$  — бортовая приборная система отсчета с осями, совпадающими с осями чувствительности линейных ньютонометров, размещенных в точке  $\tilde{o}$ , с движением которой отождествляется траекторное (поступательное) движение технологической платформы, соответственно,  $q = A^{q\eta}\eta$  и  $q = A^{q\xi}\xi$ , так что  $A^{q\eta} = A^{q\xi}A^{\xi\eta}$ .

Кратко остановимся на возможностях бортового многопозиционного приема информации НСС. Пусть такой прием осуществляется в точках  $a, b, c, d$ , жестко привязанных к приборному трехграннику  $oq$ , так что точка  $a$  совпадает с точкой  $\tilde{o}$ , а точки  $b, c, d$  размещены на осях (так примем, не нарушая общности) соответственно  $\tilde{o}q_1, \tilde{o}q_2, \tilde{o}q_3$  с равным удалением каждой на расстояние  $l$  от точки  $\tilde{o}$  в положительных направлениях. Бортовые приемные устройства НСС выдают информацию о векторах  $\xi_i$ ,  $i = a, b, c, d$  (следовательно, и  $q = A^{q\xi}\xi$ ), которая далее может быть использована для построения матрицы  $A^{q\xi}$ , а следовательно, и  $A^{q\eta}$ .

<sup>1</sup> Работа частично выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований "Дальний Восток" (проект 15-1-4-006 о).

Для оценки вектора абсолютной угловой скорости  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$  вращения приборного трехгранника  $\tilde{d}q$ , а также для сглаживания отрицательных последствий ограничений на точность и частоту измерений, характерных для НСС, обратимся к информации о движении ТП, доставляемой трехкомпонентным блоком ньютонометров, измеряющим вектор кажущегося ускорения, или, по существу, вектор удельных сил негравитационной природы. Таким образом, ориентируемся на рассмотрение складывающейся информационной ситуации с позиций метода инерциальной навигации. Тогда, полагая, что ориентация трехгранника  $\tilde{d}q$  определена (это обсуждено выше), из двух групп базовых уравнений метода, динамической и кинематической [2], составляющих суть математической модели ИНС, может быть оставлена только первая из них — дифференциальные уравнения движения материальной точки, с которой совмещена точка  $\tilde{d}$ . Дополнив эти уравнения связями — уравнениями идеальных измерений места точки  $\tilde{d}$ , образуем объединенную систему уравнений в качестве идеализированной математической модели интегрированной системы и представим задачу наблюдения движения в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{q}_i &= -e_{ikj}\omega_k q_j + p_i, q_i(0) = q_i, 0; \\ \dot{p}_i &= -e_{ikj}\omega_k p_j + G_i(\mathbf{q}) + F_i, p_i(0) = p_i, 0; \\ z &= q_i, i, j, k = \overline{1, 3}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $e_{ikj}$  — псевдотензор Леви—Чивита;  $\mathbf{q} = (q_i)$ ,  $\mathbf{p} = (p_i)$ ,  $\mathbf{z} = (z_i)$  — векторы соответственно координат, удельных импульсов и измерений;  $\mathbf{F} = (F_i)$  и  $\mathbf{G} = (G_i(\mathbf{q}))$  — соответственно вектор удельных сил негравитационной природы (измеряемых ньютонометрами) и напряженность гравитационного поля (с известной, так полагаем, моделью). Целью решения поставленной задачи является оценка вектора  $(\mathbf{q}^T, \mathbf{p}^T, \omega^T)^T$  в реальных условиях присутствия погрешностей измерений,  $^T$  — символ транспонирования векторов и матриц.

Далее, следуя вполне оправдавшей себя на практике традиции метода инерциальной навигации [3], перейдем к модели задачи коррекции, полагая, что можно указать некоторые приближения искомым параметрам и перейти к линейной задаче оценки их вариаций. Тогда, учитывая (1), получаем модель следующего вида:

$$\begin{aligned} \delta \dot{q}_i &= -e_{ikj}\omega_k \delta q_j + \delta p_i + e_{ikj} q_k \delta \omega_j, \delta q_i(0) = \delta q_i, 0; \\ \delta \dot{p}_i &= -e_{ikj}\omega_k \delta p_j + e_{ikj} p_k \delta \omega_j + \Gamma_{ij} \varepsilon_j + f_i, \delta p_i(0) = \delta p_i, 0; \\ \delta \dot{\omega}_i &= \chi_i(t), \delta \omega_i(0) = \delta \omega_i, 0; \\ \delta z_i &= \delta q_i + \varepsilon_i, i, j, k = \overline{1, 3}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Gamma = (\Gamma_{ij}) = (\partial G_i / \partial q_j)$  — гессиан силовой функции гравитационного поля;  $\mathbf{f} = (f_i)$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_i)$  — векторы соответственно инструментальных погрешностей ньютонометров и погрешностей оценок координат

места ТП по данным НСС; кроме того, здесь предполагается, что при реализации модели гравитационного поля выполнено замещение  $\mathbf{G}(\mathbf{q})$  на  $\mathbf{G}(\mathbf{z})$ ,  $\chi(t) = (\chi_i(t))$  — скорость изменения вектора  $\delta \omega = (\delta \omega_i)$ .

Для удобства последующих рассуждений представим систему (2) в общем виде:

$$\begin{aligned} \delta \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{C} \delta \mathbf{x} + \mathbf{w}, \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \\ \delta \mathbf{z} &= \mathbf{H} \delta \mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\delta \mathbf{x} = (\delta \mathbf{q}^T, \delta \mathbf{p}^T, \delta \omega^T)^T$  — вектор, подлежащий определению в целях приплюсовывания его к вектору приближенных значений соответствующих навигационных параметров (т. е.  $\mathbf{q}$ ,  $\mathbf{p}$ ,  $\omega$ ) и, таким образом, получения текущих значений последних;  $\mathbf{C}$  и  $\mathbf{H}$  — матрицы соответствующих коэффициентов при компонентах вектора  $\delta \mathbf{x}$ ;  $\mathbf{w} = \mathbf{q}(\mathbf{f}, \boldsymbol{\varepsilon})$  — вектор немоделируемых компонент системы (1), имеющих случайный характер и неизвестные статистики.

Завершая данный раздел статьи, заметим, что для разрешимости задач типа (3) (обратных задач по сути) необходимо, чтобы пара матриц  $(\mathbf{C}, \mathbf{H})$  или  $(\Phi, \mathbf{H})$  была наблюдаема [4] (здесь  $\Phi$  — переходная матрица состояния системы линейных уравнений эволюции вектора  $\delta \mathbf{x}$  и, что существенно, ядро интегрального преобразования в известной формуле Коши для решения этой системы уравнений).

#### Модели алгоритма динамического обращения

Сначала обратимся к концепции квазистатического алгоритма решения задачи (2). Суть ее заключается в формировании системы линейных алгебраических уравнений для точечной оценки вектора  $\mathbf{x}$  в заданный момент времени  $t^*$  на некотором скользящем или расширяющемся интервале времени с объемом измерений на нем, большим, чем размерность вектора  $\mathbf{x}$ , и матрицей  $\mathbf{N}$  связи "состояние—измерение", образуемой из блоков  $\mathbf{H}(t_i)\Phi(t_i, t^*)$ ,  $i = \overline{1, M}$ . В этом случае матрица  $\mathbf{N}$  вполне заменяет калмановскую матрицу наблюдаемости [4], а ее вычисленное спектральное число обусловленности ( $\mu$ ) может служить конструктивной оценкой разрешимости обратной задачи (3). Именно в таком ограниченном аспекте этот алгоритм только и рассматривается здесь (со ссылкой на прецедент [5]) в следующем за этим разделе настоящей статьи.

Переходя теперь непосредственно к алгоритму динамического обращения, обратимся, как и в работе [1], к его нейросетевой концепции, взяв за основу линейный динамический алгоритм (комплементарный модели (3)) следующего вида:

$$\delta \dot{\mathbf{x}}^* = \tilde{\mathbf{C}} \delta \mathbf{x}^* + \mathbf{K} \delta \mathbf{z}, \delta \mathbf{x}^*(0) = \delta \mathbf{x}_0^*, \quad (4)$$

где  $\delta \mathbf{x}^*$  — текущая оценка вектора  $\delta \mathbf{x}$ ;  $\mathbf{K}$  — матрица синаптических коэффициентов, настраиваемых так, чтобы достигался минимум квадратичного критерия  $J = \|\mathbf{z} - \mathbf{H} \mathbf{x}^*\|^2$ ;  $\tilde{\mathbf{C}} = \mathbf{C} - \mathbf{K} \mathbf{H}$ .

Как видно из соотношения (4), одновременно с настройкой синаптических коэффициентов при

обработке информации, доставляемой вектором  $\delta z$ , происходит и изменение матрицы  $\mathbf{C}$ , или ядра  $\tilde{\Phi}$  соответствующего интегрального преобразования, если представить решение системы уравнений (4) в форме Коши. Подобный же, заметим, процесс изменения функциональных (не путать с клеточными [6]) ядер популяций биологических нейронов, отождествляемый с обучением, происходит, что вполне можно предположить, и при усвоении внешней информации "живыми" (биологическими) системами.

Настройка матрицы  $\mathbf{K}$  связана с решением нескольких содержательно и по форме близких экстремальных задач. Решение первой из них —  $\mathbf{K} = \arg \min_{\Omega_k} J$ ;  $\Omega_k$  — область значений  $\mathbf{K}$  — предполагает простейший механизм направленного (благодаря обращениям к значениям  $J$ ) перебора значений всех элементов матрицы  $\mathbf{K}$ ; при этом скорость сходимости к наилучшему решению существенно зависит от выбора начального значения  $\mathbf{K}$  и, в конечном итоге, от того, насколько успешно реализуется свойство асимптотической устойчивости решения системы (4).

Вторая экстремальная задача —  $\mathbf{K} = \mathbf{D}\mathbf{H}^T(\mathbf{R}^*)^{-1}$ ,  $\dot{\mathbf{D}} = \mathbf{C}\mathbf{D} + \mathbf{D}\mathbf{C}^T - \mathbf{D}\mathbf{H}^T(\mathbf{R}^*)^{-1}\mathbf{H}\mathbf{D} + \mathbf{Q}^*$ ,  $\mathbf{D}(0) = \mathbf{D}_0$ ,  $(\mathbf{Q}^*, \mathbf{R}^*) = \arg \min_{\mathbf{Q}, \mathbf{R}} J$ , где  $\mathbf{D}_0$ ,  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{R}$  — положительно

определенные матрицы; обращение к ней, как уже указывалось нами в работе [1], гарантирует асимптотическую устойчивость алгоритма (4), но при этом, что немаловажно, при надлежащем выборе матриц  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{R}$  позволяет существенно сократить число настраиваемых параметров; заметим, что механизм настройки матрицы  $\mathbf{K}$  включает матрицу  $\mathbf{C}$ , т. е. в неявном виде априорную информацию о характере эволюции вектора  $\delta x$ , или, что то же самое по сути, о ядре  $\Phi$ , и таким образом, этот механизм можно назвать "ядерным" в отличие от "безъядерного" предыдущего. Обращаясь к сообществам биологических нейронов, можно предположить, что подобный механизм отклика на внешнюю по отношению к этому сообществу информацию существует и у них и, по-видимому, только у высокоорганизованных организмов с высокоорганизованной центральной нервной системой (ЦНС). Третья экстремальная задача, численная верификация которой будет предложена в следующем разделе при решении рассматриваемой здесь задачи аналитического конструирования интегрированной информационно-навигационной системы, имеет вид:  $\mathbf{K} = \mathbf{D}\mathbf{H}^T(\mathbf{R}^*)^{-1}$ ,  $\dot{\mathbf{D}} = -\mathbf{D}\mathbf{H}^T(\mathbf{R}^*)^{-1}\mathbf{H}\mathbf{D} + \mathbf{Q}^*$ ,  $\mathbf{D}(0) = \mathbf{D}_0$ ,  $(\mathbf{Q}^*, \mathbf{R}^*) = \arg \min_{\mathbf{Q}, \mathbf{R}} J$ , включает, очевидно, безъядерный

(строго говоря, с "чужим" ядром  $\Phi = \mathbf{E}$ ,  $\mathbf{E}$  — единичная матрица) механизм настройки синаптических коэффициентов и имеет своим прообразом более высокий уровень самоорганизации биологических

нейронов по сравнению с первым случаем, но уступает в этом второму.

Если выбрать матрицы  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{R}$  в виде  $\mathbf{Q} = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_1^2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_2^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \sigma_3^2, \sigma_3^2)$  и  $\mathbf{R} = \text{diag}(\sigma_4^2, \sigma_4^2, \sigma_4^2)$ , то рассматриваемая далее экстремальная задача (из трех последних) будет решаться в пространстве только четырех параметров ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ ) при числе синаптических коэффициентов, равном двадцати семи.

Как и в работе [1], для решения задачи реализуется мультисистема из  $3^4 = 81$  конкурирующих между собой (что будет видно ниже при описании работы мультисистемы) параллельных вычислительных систем. И здесь, опять обращаясь к прообразам, можно допустить, что подобная мультисистемная конкурсная (по сути, с резервированием функций) организация может встречаться и у популяций биологических нейронов, что способствует повышению функциональной надежности ЦНС в целом.

Работа каждой из 81 системы — алгоритмов динамического обращения — выполняется при одинаковых для всех стартовых на шаге решения условиях, но при разных значениях параметров  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{R}$ . Победившая в таком соревновательном на шаге процессе (или, образно говоря, на этапе конкурса) признается система с наименьшим значением  $J$ , а значения ее переменных  $x^*$  и  $\mathbf{D}$  принимаются в качестве стартовых на следующем шаге решения для всех систем мультисистемы; следующий набор значений параметров  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{R}$  формируется около (как центра) значений параметров  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{R}$  победившей системы. Например, если  $\tilde{\sigma}_1$  — значение параметра  $\sigma_1$  системы-победителя, то новый набор значений параметра есть  $\{\tilde{\sigma}_1(1 - \alpha), \tilde{\sigma}_1, \tilde{\sigma}_1(1 + \alpha)\}$ ;  $0 < \alpha < 1$ ; аналогично назначаются новые значения параметров  $\sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ .

### Вычислительный эксперимент

Численная верификация модельных представлений, изложенных выше, выполнена на двух траекториях — при движении объекта с постоянной относительно Земли линейной скоростью  $V = 100$  м/с 1) вдоль меридиана и 2) по параллели на широте  $45^\circ$ . При этом в обоих случаях в качестве приближенного значения вектора  $\omega$  рассматривали вектор абсолютной угловой скорости вращения географически ориентированного (с осями, направленными на Восток, Север и по радиус-вектору места объекта) подвижного ортогонального координатного трехгранника, а в качестве оцениваемых компонент вектора  $\delta\omega$  — синусоиды одной частоты, но с различающимися амплитудами и фазами.

Прежде всего была оценена разрешимость задачи (2), (3), т. е. возможность ее численного обращения, на вычислительных средствах с относительной точностью, равной  $\varepsilon_1 = 2,2 \cdot 10^{-16}$ .

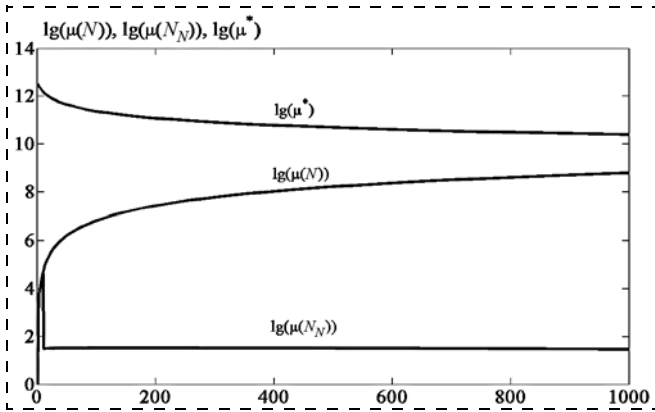


Рис. 1

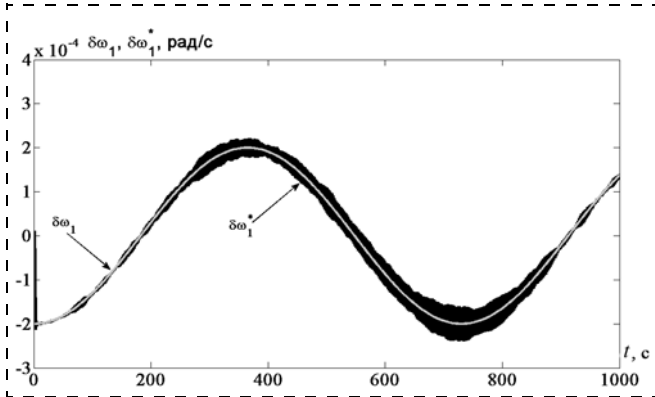


Рис. 2

На рис. 1 представлены графики эволюции (по мере накопления измерений) чисел обусловленности  $\mu(N)$  и  $\mu(N_N)$  соответственно для матрицы  $N = (N_1 : N_2 : \dots : N_n)$ ,  $\dim N = m \times n$  и нормированной матрицы  $N_N = N \cdot \text{diag}(\|N_1\|^{-1}, \|N_2\|^{-1}, \dots, \|N_n\|^{-1})$ ,  $\|N_i\|$  — евклидова норма  $i$ -го вектора столбца матрицы  $N$ ; здесь же на рис. 1 представлен график значений числа  $\mu^*$ , рассчитываемый по формуле  $\mu^* = [\varepsilon_1(\sqrt{n}(2n-3)(4m+27) + 4m+30)]^{-1}$  [5]. Как видно из рис. 1,  $\mu(N) < \mu^*$  и  $\mu(N_N) < \mu^*$ , т. е. условия разрешимости задачи (2), (3) в выбранной вычислительной среде выполняются.

На рис. 2 в качестве репрезентативного представлен пример численного оценивания значения одной из компонент ( $\delta\omega_1$ ) вектора  $\delta\omega$ . Эксперимент проводили при среднеквадратических значениях погрешностей ньютонометров  $\sigma_f = 10^{-3}$  м/с<sup>2</sup> и погрешностей оценок места объекта НСС  $\sigma_e = 1$  м. Как видно из рис. 2, оба графика значений  $\delta\omega_1(t)$  и ее оценки  $\delta\omega_1^*(t)$  достаточно слабо различимы, что можно рассматривать как свидетельство эффективности предложенного метода формирования интегрированной системы. Отдельно, но то же самое, можно сказать и об эффективности по быстрдействию нейросетевого алгоритма с безъядерным механизмом настройки синаптических коэффициентов, так как значение показателя быстрдействи-

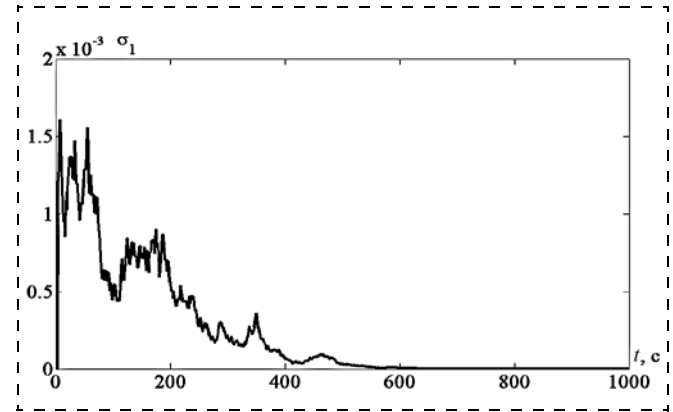


Рис. 3

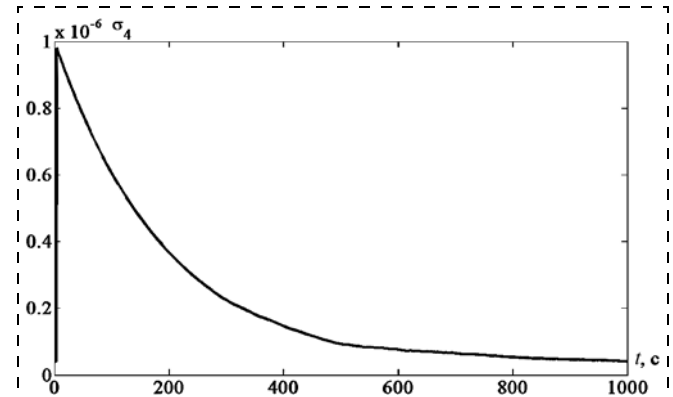


Рис. 4

вия  $\tau = T_R/T_M$ , где  $T_M$  — время численного моделирования реального процесса оценивания длительностью  $T_R$ , весьма высоко, а именно,  $\tau > 12$ .

Для полноты представлений о работе предложенной нейросети на рис. 3 и рис. 4 представлены соответственно графики эволюции параметров настройки  $\sigma_1$  и  $\sigma_4$ .

### Заключение

Как видно из изложенного выше, полученные результаты безгироскопной оценки угловой скорости весьма эффективны и могут быть учтены при создании навигационных систем для высокоманевренных подвижных объектов.

### Список литературы

1. Девятисильный А. С., Числов К. А. Нейросетевая коррекция безгироскопной инерциальной навигационной системы по спутниковой навигационной информации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 11. С. 67–70.
2. Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации. Автономные системы. М.: Наука, 1966.
3. Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации. Корректируемые системы. М.: Наука, 1967.
4. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971.
5. Девятисильный А. С., Числов К. А. Модель векторной гравиметрии на базе модели интеграции двухкомпонентной инерциальной, спутниковой и астронавигационной систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 8. С. 61–63.
6. Лескова Н. Л. В стране лилипутов // В мире науки / Scientific American. 2014. № 6. С. 48–53 (Русская версия SA).

# A Model of Competitive Neuromorphic Aggregation of Information in the Integrated Satellite-Inertial Navigation System

**A. S. Devyatisil'nyi**, devyatis@iacp.dvo.ru✉, **K. A. Chislov**, kirillche@rambler.ru,  
Institute of Automation and Control Processes (IACP), Far Eastern Branch  
of the Russian Academy of Sciences (FEB RAS), Vladivostok, 690041, Russian Federation

*Corresponding author: Devyatisil'nyi Aleksandr S.*, Chief Researcher, Institute of Automation and Control Processes (IACP), Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (FEB RAS), Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Received on December 23, 2014

Accepted on February 05, 2015

*The authors of this paper demonstrate how, with the on-board multi-position information received from a satellite navigation system and the inertial information delivered from three dimension accelerometers with orthogonal axes of sensitivity, forming a movable coordinate trihedron, for the latter one the orientation and angular velocity of the rotation in projections on its own axis can be determined. The mathematical model of the inverse problem in the "state-measurement" form is presented as 1) a dynamic group of equations of functioning of the inertial navigation system (without gyroscopes), with the state vector, which includes the coordinates, specific impulses and angular velocities of the instrumental trihedron rotation, and 2) equations for measurement of the object's location coordinates, identified with the coordinates of trihedron tops in the projections on its axis. A dynamic pseudo inversion (solution) of the problem is realized by the neural network, the model of which is based on Kalman-type algorithm in its multi-model presentation, which allows a judgment about a fair competition between the models in the progress of the state vector evaluation. The concept of "nuclear" and "nuclear-free" setting mechanisms of the neural network synaptic coefficients is introduced. Hypothesizes about a possibility of broadcasting of the characteristics, used in the description of an artificial neural network, are introduced in presentations concerning organization and functioning of the populations of the biological ("live") neurons.*

*The results of the computational experiments are presented.*

**Keywords:** angular velocity, accelerometer, satellite navigation system, neuromorphism, inverse problem, algorithm of solution

For citation:

**Devyatisil'nyi A. S., Chislov K. A.** A Model of Competitive Neuromorphic Aggregation of Information in the Integrated Satellite-Inertial Navigation System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 10, pp. 716—720.

DOI: 10.17587/mau.16.716-720

## References

1. **Devyatisil'nyj A. S., Chislov K. A.** *Nejrosetevaja korekcija bez-gيروسкопной инерциальной навигационной системы по спутниковой навигационной информации* (Neural Network Correction of the Inertial Navigation System without Gyroscopes by Satellite Navigation Information), *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2013, no. 11, pp. 67—70 (in Russian).

2. **Andreev V. D.** *Teorija inercial'noj navigacii. Avtonomnye sistemy* (Theory of inertial navigation. Autonomous systems.), Moscow, Nauka, 1966 (in Russian).

3. **Andreev V. D.** *Teorija inercial'noj navigacii. Korrektiruemye sistemy* (Theory of inertial navigation. Correctable system.), Moscow, Nauka, 1967 (in Russian).

4. **Kalman R., Falb P., Arbib M.** *Očerki po matematicheskoj teorii system* (Essays on mathematical systems theory), Moscow, Mir, 1971.

5. **Devyatisil'nyj A. S., Chislov K. A.** *Model' vektornoj gravimetrii na haze modeli integracii dvuhkomponentnoj inercial'noj, sputnikovoj i astronavigacionnoj system* (The Model Vector Gravimetry on the Base of Two-Component Inertial, Satellite and Astronavigation Systems) *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2012, no. 8, pp. 61—63 (in Russian).

6. **Leskova N. L.** *V strane liliputov / V mire nauki* (In Lilliput / In the world of science), *Scientific American* (Russian version), 2014, no. 6, pp. 48—53 (in Russian).

---

---

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 30.07.2015. Подписано в печать 15.09.2015. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН1015. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.