

УДК 621.396.98

© 2014 г. **К. А. Числов**, канд. техн. наук
(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

МОДЕЛЬ ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ НЕЙРОМОРФНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА

Предлагается модель интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы, в состав которой входят бортовая сеть приемников спутниковой навигационной системы и гироскопических датчиков угловых скоростей, объединенных вычислительной нейронной сетью, имитирующей механизм самоорганизации биологических нейронов. Приведены результаты вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: гироскопы, навигационная спутниковая система, нейронная сеть, биологический нейрон, обратная задача, фильтр Калмана.

Введение

Для определения параметров вращения подвижной технологической платформы (ТП) предлагается 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 возлагалось на астросистему.

Вообще говоря, 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 нейроподобного типа [1, 3], ассоциированный с некоторыми положениями нейродинамики и нейроморфизма, характеризующими мышление – это: 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.

Завершая эту часть статьи, отметим и то, что, наряду с приведенными ассоциациями, допустимы и обратные, а именно: в том как происходит процесс устойчивого усвоения информации конкретной технической системой видится процесс формирования и эволюции популяций «живых» нейронов в неокортекстном модуле мозга [4], продуцирующих образы (в данном случае – математические) реальных объектов, и механизм настройки их – «живых» (биологических) нейронов – синаптических коэффициентах, обуславливающий функциональность данной популяции в условиях неопределенности информации, поступающей из внешней по отношению к ней среды.

Основные модельные представления

Начнем с геометрических образов, порождаемых формализмом функционирования НСС. Прежде всего введем правые ортогональные системы отсчета – $o\xi = o\xi_1\xi_2\xi_3$ с началом o в центре масс Земли и осями $o\xi_1$ и $o\xi_3$, 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 $\mathbf{y}^{(i)}$, $i = \overline{1, N-1}$ 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 и 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 $\tilde{\boldsymbol{\eta}}^{(i)} = \boldsymbol{\eta}^{(i)} - \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^{(i)}$, $i = \overline{0, 2}$, где $\boldsymbol{\eta}^{(i)}$ и $\tilde{\boldsymbol{\eta}}^{(i)}$ – это соответственно фактические и измеренные векторы координат ПС $_i$, а $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^{(i)}$ – погрешность навигационной привязки. Образуем разности $\delta\tilde{\boldsymbol{\eta}}^{(j)} = \tilde{\boldsymbol{\eta}}^{(j)} - \tilde{\boldsymbol{\eta}}^{(0)} = \delta\boldsymbol{\eta}^{(j)} - \boldsymbol{\varepsilon}^{(j)}$, где $\delta\boldsymbol{\eta}^{(j)} = \boldsymbol{\eta}^{(j)} - \boldsymbol{\eta}^{(0)}$, $\boldsymbol{\varepsilon}^{(j)} = \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^{(j)} - \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^{(0)}$, $j = \overline{1, 2}$, и, кроме того, исходные представления о системе ПС в ou дополним связями $\tilde{\mathbf{y}}^{(i)} = \mathbf{y}^{(i)} - \boldsymbol{\tau}^{(i)}$, $i = \overline{1, 2}$, интерпретируя $\tilde{\mathbf{y}}^{(i)}$ как измеренные значения $\mathbf{y}^{(i)}$, а $\boldsymbol{\tau}^{(i)}$ как не зависящую от времени погрешность измерения. Очевидно, что $\mathbf{y}^{(i)}$ и $\delta\boldsymbol{\eta}^{(i)}$, $i = \overline{1, 2}$, – представления одних и тех же векторов в разных системах – ou и $o\eta$, связанные ортогональными преобразованиями

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

Перейдем теперь к «геометрии движения» [8], или кинематике, отождествляя ее с представлениями об эволюции матрицы \mathbf{A} при вращении приборного трехгранника ou . Обозначим через $\boldsymbol{\omega}$, \mathbf{u} и $\boldsymbol{\Omega}$ векторы угловых скоростей относительного вращения соответственно координатных трехгранников ou и $o\xi$, $o\eta$ и $o\xi$, ou и $o\eta$. Тогда:

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{u} + \boldsymbol{\Omega}, \quad (2)$$

где ω измеряется гироскопическими датчиками; \mathbf{u} – угловая скорость собственно-го вращения Земли известна в проекциях на оси трехгранника ou , а $\mathbf{\Omega}$ очевидным образом вычислима из (2). Изложенное дает основание воспользоваться для описания эволюции \mathbf{A} кинематическим уравнением Пуассона [8]

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

где $\hat{\mathbf{\Omega}} = (\Omega_{ij})$ – кососимметрическая матрица, заполняемая компонентами вектора $\mathbf{\Omega} = (\Omega_k)$ так, что $\Omega_{ij} = \epsilon_{ijk}\Omega_k$; $i, j, k = \overline{1,3}$.

Уравнения (1) и (3) вместе взятые составляют математическую модель обратной (кинематической) задачи «в большом», решая которую в реальных условиях присутствия инструментальных погрешностей измерений и вычислений, оценивается $\mathbf{A}(t)$. Суть решения математически поставленной обратной задачи тесно связана с так называемой на практике задачей коррекции [9] и состоит в следующем. В указанных реальных условиях интегрируется уравнение (3), что дает оценку $\tilde{\mathbf{A}}(t)$ матрицы $\mathbf{A}(t)$ с некоторой погрешностью $\delta\mathbf{A}(t)$, относительно которой принимаем, что $\delta\mathbf{A} = -\hat{\mathbf{\beta}}\mathbf{A}$. Это означает, что пространственное положение трехгранника ou отличается от того, которое характеризуется матрицей $\tilde{\mathbf{A}}(t)$, на вектор малого угла вращения $\mathbf{\beta}$. Соответственно и преобразование (1) с матрицей $\tilde{\mathbf{A}}$ выполняется с погрешностью $\delta\mathbf{y} = \hat{\mathbf{y}}\mathbf{\beta}$. Изложенное позволяет, во-первых, определить задачу коррекции как задачу оценки вектора $\mathbf{\beta}$ с последующим уточнением матрицы $\tilde{\mathbf{A}}$ в соответствии с формулой $\mathbf{A}^* = (\mathbf{E} + \hat{\mathbf{\beta}}^*)\tilde{\mathbf{A}}$, где \mathbf{A}^* – новая оценка \mathbf{A} , $\mathbf{\beta}^*$ – оценка $\mathbf{\beta}$, \mathbf{E} – единичная матрица; во-вторых, интерпретировать задачу коррекции как обратную задачу с математической моделью следующего вида:

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

где $\tilde{\mathbf{\Omega}}$ – значение $\mathbf{\Omega}$, определяемое согласно (2); \mathbf{m} и \mathbf{v} – соответственно математическое ожидание и несмещенная шумовая составляющая векторного случайного процесса, отождествляемого с вектором инструментальных погрешностей такого определения $\mathbf{\Omega}$; $\delta\tilde{\mathbf{y}}^{(i)}$ – невязка измерений вектора $\mathbf{y}^{(i)}$; $\boldsymbol{\Delta}^{(i)}$ – соответствующий вектор инструментальных погрешностей этих измерений; $\boldsymbol{\mu}(t)$ и $\boldsymbol{\chi}(t)$ – скорости изменения векторов соответственно \mathbf{m} и $\mathbf{\Omega}$.

Введем обозначения: $\mathbf{x}^T = (\mathbf{\beta}^T, \mathbf{m}^T, \mathbf{\Omega}^T)$ – вектор оцениваемых состояний; $\mathbf{z}^T = ((\delta\tilde{\mathbf{y}}^{(1)})^T, (\delta\tilde{\mathbf{y}}^{(2)})^T, \tilde{\mathbf{\Omega}}^T)$ – вектор измерений; \mathbf{C} и \mathbf{H} – матрицы коэффициентов при векторе \mathbf{x} в правых частях соответственно уравнений состояний и измерений; $\mathbf{q}^T = (\mathbf{v}^T, \boldsymbol{\mu}^T, \boldsymbol{\chi}^T)$ и $\mathbf{r}^T = (\mathbf{v}^T, (\boldsymbol{\Delta}^{(1)})^T, (\boldsymbol{\Delta}^{(2)})^T)$ – векторы немоделируемых компонент возмущений; «Т» – символ транспонирования векторов и матриц.

Перепишем систему (4) в общем виде:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{q}, \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad (5)$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{r}.$$

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

Алгоритм нейросетевого динамического псевдообращения

Задачи типа «состояние-измерение», как известно, являются задачами наблюдения. В качестве таковой задача (5) или (4) математически корректно поставлена, что подтверждают легко устанавливаемый факт наблюдаемости пары (\mathbf{C}, \mathbf{H}) и ее верификация в условиях численного эксперимента, некоторые результаты которого приведены в разделе статьи, следующим за этим. Заметим, что нарушение математической корректности приводит к явлениям, которые можно назвать парадоксами наблюдения – неустойчивость решения и его неоднозначность (что, следовательно, влечет возможность субъективного толкования результата), с чем, если проводить некоторые параллели, 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 безусловно относится и задача (4), наиболее выразительно парадоксы квантовой теории могут быть проинтерпретированы примером, когда положение объекта на плоскости находят методом засечек двумя измеренными значениями расстояний до двух пунктов наблюдения и в итоге получают два решения – два места объекта, симметрично расположенных относительно прямой, проходящей через пункты наблюдения; вместе с тем уже самая незначительная дополнительная информация может способствовать выбору правильного решения – если известно, к примеру, что пункты наблюдения расположены на береговой линии, а наблюдается морской объект.

При решении задачи (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 представляется следующим образом:

$$\begin{aligned} F &= 0.5\|\mathbf{z} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2, \quad \dot{\mathbf{x}}^* = \mathbf{C}\mathbf{x}^* + \mathbf{K}(\mathbf{z} - \mathbf{H}\mathbf{x}^*), \quad \mathbf{x}^*(0) = 0, \quad \mathbf{K} = \mathbf{D}\mathbf{H}^T(\mathbf{R}^*)^{-1}, \\ \dot{\mathbf{D}} &= \mathbf{C}\mathbf{D} + \mathbf{D}\mathbf{C}^T - \mathbf{D}\mathbf{H}^T(\mathbf{R}^*)^{-1}\mathbf{H}\mathbf{D} + \mathbf{Q}^*, \quad \mathbf{D}(0) = \mathbf{D}_0, \\ (\mathbf{Q}^*, \mathbf{R}^*) &= \arg \min_{\mathbf{Q}, \mathbf{R}} F, \quad \mathbf{Q} = \text{diag}(\sigma_v^2, \sigma_v^2, \sigma_v^2, \sigma_\mu^2, \sigma_\mu^2, \sigma_\mu^2, \sigma_\chi^2, \sigma_\chi^2, \sigma_\chi^2), \\ \mathbf{R} &= \text{diag}(\sigma_\Delta^2, \sigma_\Delta^2, \sigma_\Delta^2, \sigma_\Delta^2, \sigma_\Delta^2, \sigma_\Delta^2), \end{aligned} \quad (6)$$

где \mathbf{x}^* – текущая оценка \mathbf{x} .

Как видно из (6), задача решается в пространстве четырех параметров – σ_v , σ_μ , σ_χ , σ_Δ . Заметим, что в случае ее решения путем перебора 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 предлагается реализация мультисистемы из $3^4 = 81$ параллельных систем – алгоритмов калмановского типа. Работа каждого из них выполняется при одинаковых для всех стартовых на шаге решения условиях, но при разных значениях параметров \mathbf{Q} и \mathbf{R} .

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

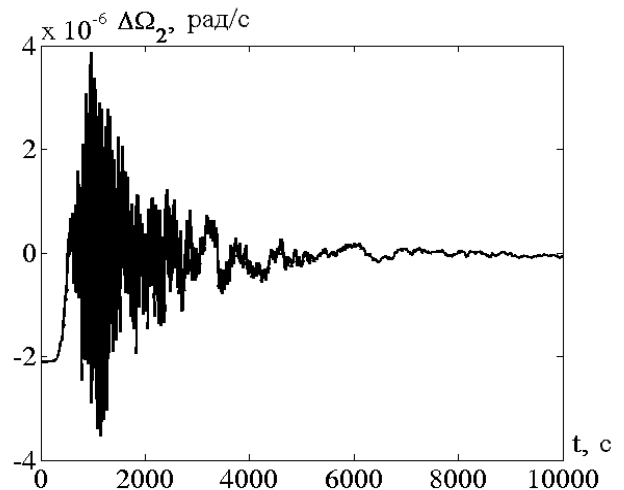
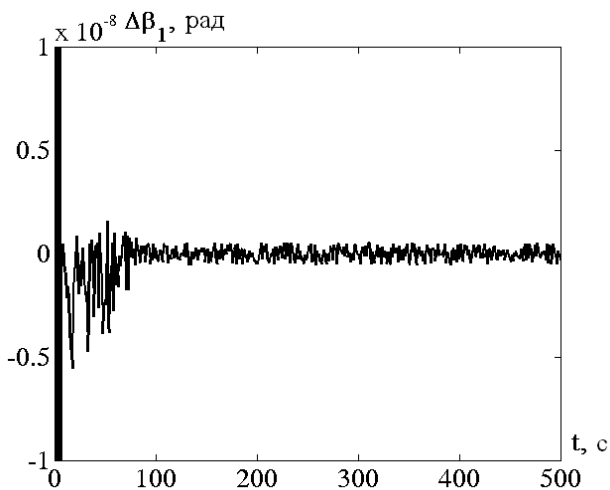
Вычислительный эксперимент

Как и в [1], здесь приводятся 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 предполагалось, что приемники НСС размещены на объекте так, что $\mathbf{y}^{(1)} = (3\text{м}, 0, 0)$, $\mathbf{y}^{(2)} = (0, 3\text{м}, 0)$, а погрешности относительных измерений – случайные процессы с равномерным распределением на интервале $[-\sqrt{3} \cdot 10^{-2}\text{м}, \sqrt{3} \cdot 10^{-2}\text{м}]$; инструментальные погрешности гироскопических измерителей – случайные процессы с равномерным распределением на интервале $[m_i(t) - 8.5 \cdot 10^{-6}\text{с}^{-1}, m_i(t) + 8.5 \cdot 10^{-6}\text{с}^{-1}]$, $i = \overline{1,3}$, где функции $m_i(t)$ синусоиды с разными значениями амплитуд, периодов и фаз. Таким образом, для обоих типов измерений (спутниковых и инерциальных) среднеквадратические 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 (σ_v , σ_μ , σ_χ , σ_Δ) равны соответственно $(10^{-5}\text{с}^{-1}, 10^{-5}\text{с}^{-2}, 10^{-7}\text{с}^{-2}, 10^{-6}\text{м})$.

Некоторые результаты, характеризующие высокую степень эффективности решения задачи, представлены на рисунке, где $\Delta\beta_1 = \beta_1 - \beta_1^*$, $\Delta\Omega_2 = \Omega_2 - \Omega_2^*$ – погрешности оценок соответствующих величин. В экспериментах отмечалось весьма большое значение показателя $\tau = T_R/T_M$, 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Девятисильный А.С., Числов К.А.* Нейроморфная модель коррекции астроинерциальной системы // Измерительная техника. – 2013. – №7. – С.18-20.
2. *Kalman R.E., Falb P.L., Arbib M.A.* Topics in mathematical system theory. (McGraw-Hill. – New York, 1969).
3. *Числов К.А.* Нейроподобный алгоритм коррекции безгироскопной инерциально-спутниковой гравиметрической системы // Информатика и системы управления. – 2013. – №4. – С.93-99.
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 // Успехи физических наук (УФН). – 1994. – Т.164, №10. – С.1041-1072.
7. *А.Н. Павлов, А.Е. Храмов, А.А. Короновский и др.* Вейвлет-анализ в нейродинамике // Успехи физических наук (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.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.А. Нурминским.

E-mail:

Числов Кирилл Александрович – kirillche@rambler.ru.