

01

Инерциально-спутниковая нейроморфная система оценки параметров вращения подвижной технологической платформы

© А.С. Девятисильный

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
690041 Владивосток, Россия
Дальневосточный федеральный университет,
690950 Владивосток, Россия
e-mail: devyatishilny@iacp.dvo.ru

(Поступило в Редакцию 27 декабря 2013 г.)

Обсуждена система, включающая бортовую сеть приемников ГЛОНАСС и гироскопических датчиков угловых скоростей, интегрированных вычислительной нейросетью, реализующей мультимодельный алгоритм динамического псевдообращения калмановского типа. Приведены результаты вычислительного эксперимента.

Введение

В настоящей работе продолжается тема определения параметров вращения технологической платформы (ТП) широкого спектра базирования (космического, воздушного, морского или сухопутного), начатая в [1]. Для определения этих параметров (матрицы ориентации и вектора угловой скорости) предлагается интегрированная система (ИС), включающая блок инерциальных измерителей — трех гироскопических датчиков угловых скоростей со взаимортогональными осями чувствительности и систему бортового многопозиционного приема (БМП) навигационной спутниковой системы (НСС) типа ГЛОНАСС. От системы, рассмотренной в [1], предлагаемая ИС отличается тем, что функцию определения матрицы ориентации ТП выполняет система БМП, а не астросистема, как в [1]. 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 используется 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 работы, 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“ 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; системе $o\eta = o\eta_1\eta_2\eta_3$ 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 радиуса-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 $\tilde{\boldsymbol{\eta}}^{(i)} = \boldsymbol{\eta}^{(i)} - \boldsymbol{\varepsilon}^{(i)}$, $i = \overline{1, 2}$, где $\boldsymbol{\eta}^{(i)}$ и $\tilde{\boldsymbol{\eta}}^{(i)}$ — это соответственно фактические и измеренные векторы координат ПС $_i$, а $\boldsymbol{\varepsilon}^{(i)}$ — погрешность навигационной привязки. Образует разности $\delta\tilde{\boldsymbol{\eta}}^{(j)} = \tilde{\boldsymbol{\eta}}^{(j)} - \tilde{\boldsymbol{\eta}}^{(0)} = \delta\boldsymbol{\eta}^{(j)} - \boldsymbol{\varepsilon}^{(j)}$, где $\delta\boldsymbol{\eta}^{(j)} = \boldsymbol{\eta}^{(j)} - \boldsymbol{\eta}^{(0)}$, $\boldsymbol{\varepsilon}^{(j)} = \boldsymbol{\varepsilon}^{(j)} - \boldsymbol{\varepsilon}^{(0)}$, $j = \overline{1, 2}$, и, кроме того, исходные представления о системе ПС в o_1y 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

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

Перейдем теперь к „геометрии движения“ [8], или кинематике, отождествляя ее с представлениями об эволюции матрицы $\mathbf{A}^{(y)}$ 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 $\boldsymbol{\omega}$ измеряется гироскопическими датчиками, \mathbf{u} — угловая скорость собственного вращения Земли известна в проекциях на оси трехгранника $o\eta$, а $\boldsymbol{\Omega}$ очевидным образом вычислима из (2). Изложенное дает основание воспользоваться для описания эволюции \mathbf{A} кинематическим уравнением Пуассона [8]

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

где $\hat{\boldsymbol{\Omega}} = (\Omega_{ij})$ — кососимметрическая матрица, заполняемая компонентами вектора $\boldsymbol{\Omega} = (\Omega_k)$ так, что $\Omega_{ij} = e_{ikj}\Omega_k$; $i, j, k = \overline{1, 3}$.

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 $\delta\mathbf{A} = -\hat{\boldsymbol{\beta}}\mathbf{A}$. Это означает, что пространственное положение трехгранника ou отличается от того, которое характеризуется матрицей $\tilde{\mathbf{A}}(t)$, на вектор малого угла вращения $\boldsymbol{\beta}$. Соответственно и преобразование (1) с матрицей $\tilde{\mathbf{A}}$ выполняется с погрешностью $\delta\mathbf{y} = \hat{\mathbf{y}}\boldsymbol{\beta}$. Изложенное позволяет, во-первых, определить задачу коррекции как задачу оценки вектора $\boldsymbol{\beta}$ с последующим уточнением матрицы $\tilde{\mathbf{A}}$ в соответствии с формулой $\mathbf{A}^* = (\mathbf{E} + \hat{\boldsymbol{\beta}}^*)\tilde{\mathbf{A}}$, где \mathbf{A}^* — новая оценка \mathbf{A} , $\boldsymbol{\beta}^*$ — оценка $\boldsymbol{\beta}$, \mathbf{E} — единичная матрица; во-вторых, интерпретировать задачу коррекции как обратную задачу с математической моделью следующего вида:

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

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

Введем обозначения: $\mathbf{x}^T = (\boldsymbol{\beta}^T, \mathbf{m}^T, \boldsymbol{\Omega}^T)$ — вектор оцениваемых состояний, $\mathbf{z}^T = ((\delta\tilde{\mathbf{y}}^{(1)})^T, (\delta\tilde{\mathbf{y}}^{(2)})^T, \tilde{\boldsymbol{\Omega}}^T)$ — 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, T — символ транспонирования векторов и матриц.

Перепишем систему (4) в общем виде

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

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 $\boldsymbol{\Omega}^*$ активируется при интегрировании (3), что в конечном итоге влияет и на оценку \mathbf{A}^* .

Алгоритм нейросетевого динамического псевдообращения

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:

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

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 есть $\{\tilde{\sigma}_\Delta(1 - \alpha), \tilde{\sigma}_\Delta, \tilde{\sigma}_\Delta(1 + \alpha)\}$; $0 < \alpha < 1$. Аналогичным образом назначаются новые значения параметров σ_ν , 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 $V = 100$ m/s, когда приборный трехгранник ou моделирует идеальный трехгранник ox .

При имитационном моделировании предполагалось, что приемники НСС размещены на объекте так, что $\mathbf{y}^{(1)} = (3 \text{ m}, 0, 0)^T$, $\mathbf{y}^{(2)} = (0, 3 \text{ m}, 0)^T$, а погрешности относительных измерений — случайные процессы с равномерным распределением на интервале $[-\sqrt{3} \cdot 10^{-2} \text{ m}, \sqrt{3} \cdot 10^{-2} \text{ m}]$; инструментальные погрешности гироскопических измерителей — случайные процессы с равномерным распределением на интервале $[m_i(t) - 8.5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}, m_i(t) + 8.5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}]$, $i = 1, 3$,

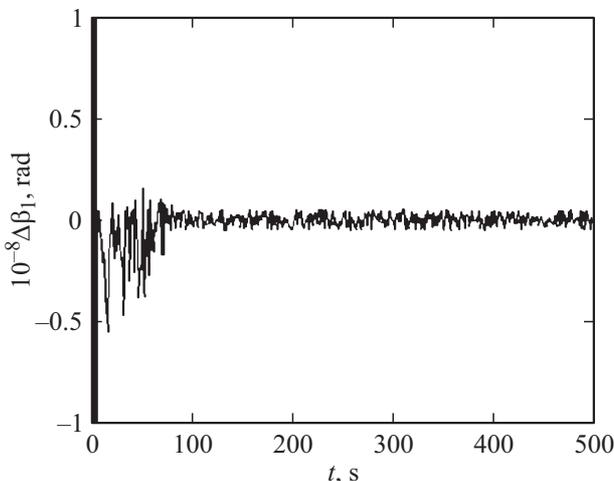


Рис. 1.

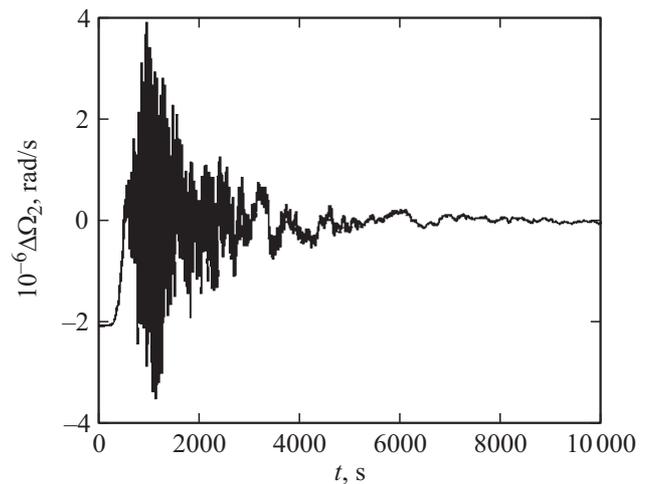


Рис. 2.

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 m и 1.0 deg/hour.

При решении задачи с помощью предложенной нейроморфной сети начальные значения параметров настройки σ_ν , σ_μ , σ_χ , σ_Δ равны соответственно 10^{-5} s^{-1} , 10^{-5} s^{-2} , 10^{-7} s^{-2} , 10^{-6} m .

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 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

Отметим следующее. Рассмотренная ИС в силу глобальной доступности позиционной информации от НСС весьма перспективна для широкого применения на маневренных ТП для физических экспериментов. Предложенная нейросетевая организация этой 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 живых нейронов.

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

Список литературы

- [1] *Девятисильный А.С.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 7. С. 16–19.
- [2] *Kalman R.E., Falb P.L., Arbib M.A.* Topics in mathematical system theory. (N.Y.: McGraw-Hill, 1969).
- [3] *Девятисильный А.С.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 12. С. 42–45.
- [4] *Олескин А.В.* // Вестник РАН. 2009. Т. 79. Вып. 5. С. 431–438.
- [5] *Аршавский Ю.И.* // Вестник РАН. 2010. Т. 80. Вып. 10. С. 937–940.
- [6] *Иваницкий Г.Р., Медвинский А.Б., Цыганов М.А.* // УФН. 1994. Т. 164. Вып. 10. С. 1041–1072.
- [7] *Павлов А.Н., Храмов А.Е., Короновский А.А., Ситникова Е.Ю., Макаров В.А., Овчинников А.А.* // УФН. 2012. Т. 182. № 9. С. 905–938.
- [8] *Ишлинский А.Ю.* Классическая механика и силы инерции. М.: Наука, 1987. 320 с.
- [9] *Андреев В.Д.* Теория инерциальной навигации. Корректируемые системы. М.: Наука, 1967. 648 с.