01

Нейроморфное расширение бортовых функций ГЛОНАСС для подвижной технологической платформы

© А.С. Девятисильный [1,2]

[1] Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
690041 Владивосток, Россия
[2] Дальневосточный федеральный университет,
690950 Владивосток, Россия
e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

(Поступило в Редакцию 22 декабря 2014 г.)

Предложены метод, модель и алгоритм определения параметров движения технологической платформы по измерениям, доставляемым трехкомпонентным блоком ньютонометров (акселерометров) и бортовой системой многопозиционного приема ГЛОНАСС.

Введение

Для определения параметров вращения подвижной технологической платформы (ТП) в работе [1] предложена интегрированная система (ИС), включающая систему бортового многопозиционного приема (БМП) сигналов навигационной спутниковой системы (НСС) типа ГЛОНАСС и блок инерциальных измерителей — трех гироскопических датчиков угловых скоростей (ДУС) с взаимноортогональными осями чувствительности.

Настоящая работа созвучна [1], но содержит контрапункт, так что новая модель ИС существенно отлична от модели, обсуждавшейся в [1], а именно: в блоке инерциальных измерителей ДУС заменены тремя линейными ньютонометрами (акселерометрами).

Заметим, что идея отказа в ИНС от гироскопических измерителей не нова, но в наиболее законченном виде она была оформлена в фундаментальном труде [2], где обсуждена возможность функционирования ИНС только по измерениям, доставляемым линейными ньютонометрами, — всего двенадцать ньютонометров, распределенных по четырем (три ньютонометра в каждом) пространственно разнесенным и не лежащим в одной плоскости инерциальным блокам. Математическая модель такой безгироскопной ИНС, как и классической — с тремя ньютонометрами и тремя датчиками угловых скоростей — некорректна; такой же, как и у последней, путь избавления от некорректности — привлечение дополнительной, не инерциальной природы, информации о параметрах движения и ее комплексирование с инерциальной информацией в рамках концепции ИС, реализуемой как решение задачи коррекции ИНС. Подобная ИС, расширяющая по сути потребительскую функцию ГЛОНАСС, и есть предмет обсуждения в настоящей работе.

Инструментом комплексирования информации в ИС является алгоритм. В качестве такового в настоящей работе, как и в [1], предложен алгоритм калмановского типа с оригинальным механизмом настройки синаптических коэффициентов, названным здесь безъядерным (в отличие по сути от ядерного в [1]), что безусловно явилось откликом на открытие удивительного рода насекомых (Megaphragma), обитателей микромира, у которых более 95% клеток нервной системы безъядерные [3].

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 $\boldsymbol{\xi} = \mathbf{A}^{\xi\eta}\boldsymbol{\eta}$ с известной матрицей $\mathbf{A}^{\xi\eta}$ размерности 3×3; $\tilde{o}q = \tilde{o}q_1q_2q_3$ — бортовая приборная система отсчета с осями, совпадающими с осями чувствительности линейных ньютонометров, размещенных в точке $\tilde{o}$, с движением которой отождествляется траекторное (поступательное) движение ТП; соответственно $\mathbf{q} = \mathbf{A}^{q\eta}\boldsymbol{\eta}$ и $\mathbf{q} = \mathbf{A}^{q\xi}\boldsymbol{\xi}$, так что $\mathbf{A}^{q\eta} = \mathbf{A}^{q\xi}\mathbf{A}^{\xi\eta}$.

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 $\boldsymbol{\xi}_i$, $i = a, b, c, d$ (следовательно, и $\mathbf{q} = \mathbf{A}^{q\xi}\boldsymbol{\xi}$), которая далее может быть использована для построения матрицы $\mathbf{A}^{q\xi}$, а следовательно, и $\mathbf{A}^{q\eta}$.

Для оценки вектора абсолютной угловой скорости $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \omega_2)^T$ вращения приборного трехгранника $\tilde{o}q$, 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 $\tilde{o}q$ 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 $\tilde{o}$. Дополнив эти уравнения связями — уравнениями идеальных измерений места точки $\tilde{o}$ — образуем объединенную систему уравнений в качестве идеализированной математической модели ИС и представим задачу наблюдения движения в следующем виде:

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

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 $\mathbf{G} = \big(G_i(\mathbf{q})\big)$ — соответственно вектор удельных сил негравитационной природы (измеряемых ньютонометрами) и напряженность гравитационного поля (с известной, так полагаем, моделью). Целью решения поставленной задачи является оценка вектора $(\mathbf{q}^T, \mathbf{p}^T, \boldsymbol{\omega}^T)^T$ в реальных условиях присутствия погрешностей измерений, „T“ — символ транспонирования векторов и матриц.

Далее, следуя вполне оправдавшей себя на практике традиции метода инерциальной навигации, перейдем к модели задачи коррекции [4], полагая, что можно указать некоторые приближения искомых параметров и перейти к линейной задаче оценки их вариаций. Тогда, учитывая (1), получаем модель следующего вида:

$$\delta\dot{q}_i = -e_{ikj}\omega_k \delta q_j + \delta p_i + e_{ikj} q_k \delta\omega, \quad \delta q_i(0) = \delta q_{i,0},$$
$$\delta\dot{p}_1 = -e_{ikj}\omega_k \delta p_j + e_{ikj} p_k \delta\omega_j + \Gamma_{ij}\varepsilon_j + f_i,$$
$$\delta p_i(0) = \delta p_{i,0}, \quad \delta\dot{\omega}_i = \chi_i(t), \quad \delta\omega_i(0) = \delta\omega_{i,0},$$
$$\delta z_i = \delta q_i + \varepsilon_i, \quad i, j, k = \overline{1, 3}, \tag{2}$$

где $\boldsymbol{\Gamma} = \Gamma_{ij} = (\partial G_i/\partial q_j)$ — 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 $\mathbf{G}(\mathbf{z})$, $\boldsymbol{\chi}(t) = \big(\chi_i(t)\big)$ — скорость изменения вектора $\delta\boldsymbol{\omega} = (\delta\omega_i)$.

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

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

где $\delta\mathbf{x} = (\delta\mathbf{q}^T, \delta\mathbf{p}^T, \delta\boldsymbol{\omega}^T)^T$ — вектор, подлежащий определению с целью приплюсовывания его к вектору приближенных значений соответствующих навигационных параметров (т. е. $\mathbf{q}$, $\mathbf{p}$, $\boldsymbol{\omega}$) 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.

Заключая настоящий раздел статьи, заметим, что для разрешимости задач типа (3) (обратных задач по сути) необходимо, чтобы пара матриц $(\mathbf{C}, \mathbf{H})$ или $(\boldsymbol{\Phi}, \mathbf{H})$ была наблюдаема [5], здесь $\boldsymbol{\Phi}$ — 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 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 $\mathbf{H}(t_i)\boldsymbol{\Phi}(t_i, t^*)$, $i = \overline{1, M}$. В этом случае матрица N вполне заменяет калмановскую матрицу наблюдаемости [5], а ее вычисленное спектральное число обусловленности (μ) может служить конструктивной оценкой разрешимости обратной задачи (3). Именно в таком ограниченном аспекте этот алгоритм только и рассматривается здесь (со ссылкой на прецедент [6]) в следующем за этим разделе настоящей статьи.

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

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

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 (4), одновременно с настройкой синаптических коэффициентов при обработке информации, доставляемой вектором $\delta\mathbf{z}$, происходит и изменение матрицы $\tilde{\mathbf{C}}$ или ядра $\tilde{\boldsymbol{\Phi}}$ соответствующего интегрального преобразования, если представить решение системы уравнений (4) в форме Коши. Подобный же, заметим, процесс изменения функциональных (не путать с клеточными) 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 — $\mathbf{K} = \arg\min_{\Omega_k} J$; Ω_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 — $\mathbf{K} = \mathbf{DH}^T(\mathbf{R}^*)^{-1}$, $\dot{\mathbf{D}} = \mathbf{CD} + \mathbf{DC}^T - \mathbf{DH}^T(\mathbf{R}^*)^{-1}\mathbf{HD} + \mathbf{Q}^*$, $\mathbf{D}(0) = \mathbf{D}_0$, $(\mathbf{Q}^*, \mathbf{R}^*) = \arg\min_{\mathbf{Q},\mathbf{R}} J$, где $\mathbf{D}_0, \mathbf{Q}, \mathbf{R}$ — положительно определенные матрицы; обращение к ней, как уже указывалось нами в [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 $\delta\mathbf{x}$, или, что то же самое по сути о ядре $\mathbf{\Phi}$, 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 высокоразвитых 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 $\mathbf{K} = \mathbf{DH}^T(\mathbf{R}^*)^{-1}$, $\dot{\mathbf{D}} = -\mathbf{DH}^T(\mathbf{R}^*)^{-1}\mathbf{HD} + \mathbf{Q}^*$, $\mathbf{D}(0) = \mathbf{D}_0$, $(\mathbf{Q}^*, \mathbf{R}^*) = \arg\min_{\mathbf{Q},\mathbf{R}} J$ включает, очевидно, безъядерный (строго говоря, с „чужим“ ядром $\mathbf{\Phi} = \mathbf{E}$, $\mathbf{E}$ — 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 $\mathbf{Q} = \mathrm{diag}(\sigma_1^2, \sigma_1^2, \sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_2^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \sigma_3^2, \sigma_3^2)$ и $\mathbf{R} = \mathrm{diag}(\sigma_4^2, \sigma_4^2, \sigma_4^2)$, то рассматриваемая далее экстремальная задача (из трех последняя) будет решаться в пространстве только четырех параметров $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4)$ при числе синаптических коэффициентов, равном 27.

Как и в работе [1], для решения задачи реализуется мультисистема из $3^4 = 81$ параллельных вычислительных систем. И здесь опять обращаясь к прообразам, можно допустить, что подобная мультисистемная (по сути с резервированием функций) организация может встречаться и у популяций биологических нейронов, что помимо всего прочего еще и повышает их функциональную надежность.

Работа каждой из 81 систем — 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 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; 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 σ_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 $V = 100\,\mathrm{m/s}$ 1) вдоль меридиана и 2) по параллели на широте 45°. При этом в обоих случаях в качестве приближенного значения вектора $\boldsymbol{\omega}$ рассматривался вектор абсолютной угловой скорости вращения географически ориентированного (с осями, направленным на восток, север и по радиус-вектору места объекта) подвижного ортогонального координатного трехгранника, а в качестве оцениваемых компонент вектора $\delta\boldsymbol{\omega}$ — 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 $\varepsilon_1 = 2.2 \cdot 10^{-16}$.

На рис. 1 представлены графики эволюции (по мере накопления измерений) чисел обусловленности

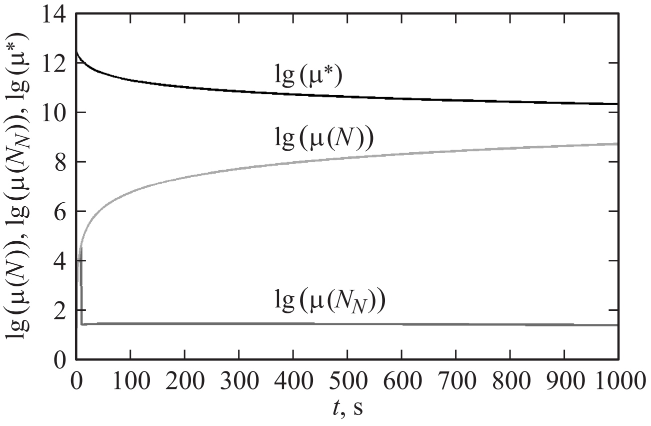

Рис. 1.

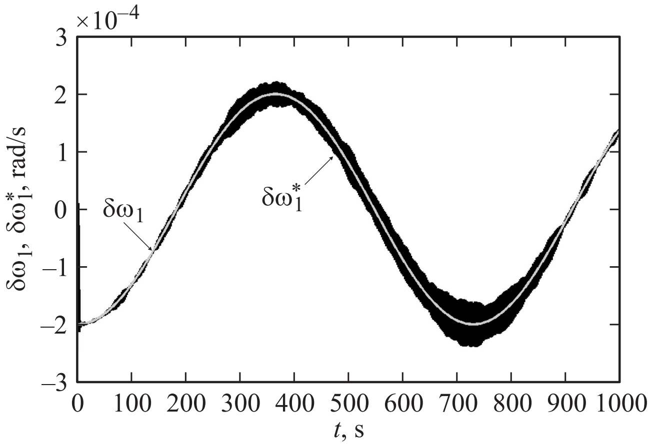

Рис. 2.

$\mu(N)$ и $\mu(N_N)$ соответственно для матрицы $\mathbf{N} = (\mathbf{N}_1 \vdots \mathbf{N}_2 \vdots \ldots \vdots \mathbf{N}_n)$, $\dim\mathbf{N} = m \times n$ и нормированной матрицы $\mathbf{N}_N = \mathbf{N} \cdot \mathrm{diag}(\| \mathbf{N}_1 \|^{-1}, \| \mathbf{N}_2 \|^{-1}, \ldots, \| \mathbf{N}_n \|^{-1})$, $\| \mathbf{N}_i \|$ — евклидова норма i-го вектора столбца матрицы $\mathbf{N}$. Здесь же на рис. 1 представлен график значений числа μ^*, рассчитываемый по формуле $\mu^* = [\varepsilon_1(\sqrt{n}(2n-3)(4m+27)+4m+30)]^{-1}$ [6]. 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 $\delta\boldsymbol{\omega}$. Эксперимент проводился при среднеквадратических значениях погрешностей ньютонометров $\sigma_f = 10^{-3}\,\mathrm{m/s^2}$ и погрешностей оценок места объекта системой ГЛОНАСС $\sigma_\varepsilon = 1\,\mathrm{m}$. Как видно из рисунка, 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, можно сказать и об эффективности по быстродействию нейросетевого алгоритма с безъядерным механизмом настройки синаптических коэффициентов, так как значение показателя быстродействия $\tau = T_R/T_M$, где T_M — время численного моделирования реального процесса оценивания, длительностью T_R, весьма высоко, а именно $\tau > 12$.

Заключение

В дополнение ко всему изложенному отметим, что если в инерциальной навигационной системе, входящей в безгироскопном исполнении в рассмотренную в настоящей работе ИС, сохранить блок гироскопических измерителей угловой скорости, то расширение потребительских функций ГЛОНАСС может быть выполнено за счет включения в вектор оцениваемых параметров напряженности гравитационного поля Земли, что следует из ранее опубликованной работы [7].

Работа частично выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований „Дальний Восток“ (проект 15-I-4-006 о).

Список литературы

[1] *Девятисильный А.С.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 10. С. 6–9.
[2] *Андреев В.Д.* Теория инерциальной навигации. Автономные системы. М.: Наука, 1966. 580 с.
[3] *Лескова Н.Л.* В стране лилипутов. // В мире науки / Scientific American. 2014. № 6. С. 48–53 (Русская версия SA).
[4] *Андреев В.Д.* Теория инерциальной навигации. Корректируемые системы. М.: Наука, 1967. 648 с.
[5] *Калман Р., Фалб П., Арбиб М.* Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971. 400 с.
[6] *Девятисильный А.С.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 12. С. 123–125.
[7] *Девятисильный А.С.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 12. С. 42–45.

[1] Интервью Н.Л. Лесковой с доцентом кафедры энтомологии биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, кандидатом биологических наук А.А. Полиловым.