01

Модель нейросетевой инерциально-спутниковой навигационной системы с функцией оценки градиента напряженности гравитационного поля Земли

© А.С. Девятисильный[1,2]

[1] Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
690041 Владивосток, Россия
[2] Дальневосточный федеральный университет,
690050 Владивосток, Россия
e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

(Поступило в Редакцию 11 января 2016 г.)

Рассмотрена модель усвоения инерциальной и спутниковой информации о движении объекта, доставляемой системой распределенных бортовых датчиков (ньютонометров, гироскопов, спутниковых приемников), способной решать задачи оценки параметров гравитационного поля.

Введение

Если обратиться к широко используемому понятию стационарного гравитационного поля, коим в известных пределах можно считать гравитационное поле Земли (Ge-поле), то его наиболее востребованными характеристиками являются напряженность и ее градиент, т. е. соответственно тензоры первого (вектор) и второго (матрица-гессиан) рангов. Знание этих характеристик весьма актуально при оценке геодинамических процессов и их прямого или опосредованного влияния на жизнедеятельность биологических и социальных систем, при разведке и промышленном освоении ископаемых ресурсов, для обеспечения навигации и т. п.

В настоящей работе предложена и исследована теоретико-механическая модель физической системы, на базе которой при некоторых дополнительных условиях может быть решена задача оценки значений названных выше характеристик Ge-поля. В основу модели положены представления метода инерциальной навигации [1], распространенные на случай бортового пространственного размещения датчиков инерциальной информации о движении объекта-носителя, т. е. ньютонометров и гироскопов. Что же касается дополнительных условий, то это — доступность дополнительной (по отношению к инерциальной) информации, доставляемой навигационной спутниковой системой (НСС), например, типа ГЛОНАСС, при ее также бортовом пространственном распределенном приеме.

Таким образом, в настоящей работе обсуждается интегрированная инерциально-спутниковая система с пространственно распределенными бортовыми датчиками навигационной (инерциальной и спутниковой) информации, в замкнутом виде решающая задачу оценки параметров движения объекта-носителя и названных выше параметров Ge-поля. При этом акцент делается на решение проблемы оценки градиента напряженности Ge-поля.

Основные модели

Определим бортовой приборный ортогональный координатный трехгранник $oq = oq_1q_2q_3$ с началом в точке o и осями oq_i, $i = 1, 2, 3$, который отождествим с трехгранником, образуемым осями чувствительности трехкомпонентного блока гироскопических датчиков угловых скоростей.

Учитывая возможности многопозиционного бортового приема спутниковой позиционной информации, примем, что ориентация приборного трехгранника oq относительно некоторой выбранной инерциальной ортогональной системы отсчета $o\eta = o\eta_1\eta_2\eta_3$, характеризуемая матрицей преобразования $\mathbf{A} = (A_{ij})$, $(ij) = 1, 2, 3$, известна.

В трех точках — o_1, o_2, o_3 радиус-векторы места которых в oq есть $\mathbf{l}^{(1)}, \mathbf{l}^{(2)}, \mathbf{l}^{(3)}$, определим три локальные системы отсчета $o_1q^{(1)}$, $o_2q^{(2)}$, $o_3q^{(3)}$ с осями, параллельными соответствующим осями системы oq, а физически образуемыми осями чувствительности дополнительных трехкомпонентных блоков ньютонометров. Примем также, что точки o, o_1, o_2, o_3 не лежат в одной плоскости. Все пять инерциальных блоков (четыре блока ньютонометров и один блок гироскопов) образуют, таким образом, пространственную физическую систему источников инерциальной информации.

Следуя изложенному выше, т. е. полагая, что матрица $\mathbf{A}$ известна, математическая модель задачи, решаемой интегрированной системой, будет представлена только динамическими группами уравнений [1] метода инерциальной навигации для точек o_0, o_1, o_2, o_3 и уравнениями спутниковых измерений местоположений этих точек, т. е.

$$\dot{q}_i^{(s)} = -e_{ikj}\omega_k q_j^{(s)}, \quad q_i^{(s)}(0) = q_i(0) + l_i^{(s)},$$

$$\dot{p}_i^{(s)} = -e_{ikj}\omega_k p_j^{(s)} + G_i\left(\mathbf{q}^{(s)}\right) + F_i^{(s)},$$

$$p_i^{(s)} = p_i(0) + e_{ikj}\omega_k l_j^{(s)},$$

$$z_i^{(s)} = q_i + l_i^{(s)} = q_i^{(s)}, \quad (i,j,k) = \overline{1,3}, \quad s = \overline{0,3}, \quad (1)$$

где $\mathbf{q}^{(s)} = (q_i^{(s)})$ — координаты, а $\mathbf{p}^{(s)} = (p_i^{(s)})$ — удельные импульсы (абсолютные линейные скорости) в проекциях на оси приборного трехгранника, причем $\mathbf{q}^{(0)} = \mathbf{q}$, $\mathbf{p}^{(0)} = \mathbf{p}$, $\mathbf{l}^{(0)} = 0$; $\mathbf{G}(\mathbf{q}^{(s)}) = (G_i(\mathbf{q}^{(s)}))$ — напряженность Ge-поля в точке o_s; $\mathbf{F}^{(s)} = (F_i^{(s)})$ — вектор удельной силы (кажущегося ускорения) негравитационной природы, измеряемый ньютонометрами (причем $\mathbf{F}^{(0)} = \mathbf{F}$); $\boldsymbol{\omega} = (\omega_i)$ — вектор абсолютной угловой скорости вращения терхгранника oq, e_{ikj} — вектор Леви–Чивита; $\mathbf{z}^{(s)} = (z_i^{(s)})$ — вектор измерений. Традиционная для инерциальной навигации методология решения задач предусматривает сначала сведение их к так называемой задаче коррекции [1,2], т. е. к задаче в первых вариациях (или задачи „в малом“), исходно предполагающей решение эволюционных уравнений (в нашем случае — это уравнения динамической группы) в реальных условиях присутствия инструментальных погрешностей и ограниченности представлений о Ge-поле.

Оставаясь в рамках указанной методологии и принимая в качестве исходной гипотезу о центральности Ge-поля, задачу в малом в нашем случае запишем в форме обратной задачи вида „состояние–измерение“

$$\delta\dot{q}_i^{(s)} = -e_{ikj}\omega_k\delta q_j^{(s)} + \delta p_i^{(s)} - e_{ikj}\upsilon_k q_i^{(s)},$$

$$\delta q_i^{(s)}(0) = \delta q_i(0),$$

$$\delta\dot{p}_i^{(s)} = -e_{ikj}\omega_k\delta p_j^{(s)} - \left(\omega_0^{(s)}\right)^2\delta q_i^{(s)}$$

$$+ g_i^{(s)} - \frac{3\left(\omega_0^{(s)}\right)^2 q_i^{(s)}}{|\mathbf{q}^{(s)}|}\varepsilon_i - e_{ikj}\upsilon_k p_i^{(s)} + f_i^{(s)},$$

$$\delta p_i^{(s)}(0) = \delta p_i(0),$$

$$\dot{g}_i^{(s)} = æ_i^{(s)}, \quad g_i^{(s)} = 0,$$

$$\delta z_i^{(s)} = \delta q_i^{(s)} + \varepsilon_i^0, \quad (i,j,k) = \overline{1,3}, \ s = \overline{0,3}, \quad (2)$$

где $\delta q_i^{(s)}$ и $\delta p_i^{(s)}$ — вариации координат и удельных импульсов, а $\mathbf{g}^{(s)} = (g_i^{(s)})$ — аномалия напряженности Ge-поля, если, как в нашем случае, принять в качестве нормы гипотезу о его центральности, $æ^{(s)} = (æ_i^{(s)})$ — скорость изменения аномалии напряженности, $f_i^{(s)}$ и υ_i — инструментальные погрешности соответственно ньютонометров и гироскопов, $\varepsilon_i^{(0)}$ — погрешность оценки координат точки o навигационной спутниковой системой, $\delta\mathbf{z}^{(s)} = \delta z_i^{(s)}$ — вектор невязки измерений.

При переходе к системе (2) учтено, что уравнения динамической группы из (1) интегрируются с замещением в модели напряженности Ge-поля (т. е. $\tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{q}^{(s)}) = \mu\mathbf{q}^{(s)}/|\mathbf{q}^{(s)}|^2$, где μ — гравитационный параметр Земли) значения $|\mathbf{q}^{(s)}|$ на значение $|\mathbf{z}^{(s)}|$, вычисляемое по данным навигационной спутниковой системы. Для удобства последующего изложения смешанную систему линейных уравнений (2) для каждого из $s = 0, 1, 2, 3$ представим в стандартном общем виде состояние–измерение

$$\delta\dot{\mathbf{x}}\mathbf{C}\delta\mathbf{x} + \boldsymbol{\upsilon},$$

$$\delta\mathbf{z} = \mathbf{H}\delta\mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (3)$$

где $\delta\mathbf{x} = (\delta\mathbf{q}^{(s)T}, \delta\mathbf{p}^{(s)T}, \mathbf{g}^{(s)T})^T$ и $\delta\mathbf{z}$ — соответственно векторы состояния и измерений, $\mathbf{C}, \mathbf{H}$ — соответствующие им матрицы коэффициентов, $\boldsymbol{\upsilon}$ и $\boldsymbol{\varepsilon}$ — векторы линейных комбинаций инструментальных погрешностей.

Целью решения сформулированной выше задачи в малом являются оценки векторов $\delta\mathbf{q}^{(s)}$, $\delta\mathbf{p}^{(s)}$ и $\mathbf{g}^{(s)}$, которые далее используются для коррекции приближенных значений параметров движения (получаемых при интегрировании уравнений динамической группы) и модельных (центральных) значений напряженностей GE-поля с последующим вычислением тензора градиента напряженности.

Основные алгоритмы обращения

Здесь представлены алгоритмы динамического псевдообращения для решения обратной задачи в малом и алгоритм оценки тензора напряженности Ge-поля. Первый из них — нейросетевой алгоритм калмановского типа в мультимодельном исполнении, достаточно подробно описан нами ранее в [2] и имеет следующий вид: $\delta\mathbf{x}^*\tilde{\mathbf{C}}\delta\mathbf{x}^* + \mathbf{K}\delta\mathbf{z}$, $\delta\mathbf{x}^*(0) = \delta\mathbf{x}_0^*$, где $\delta\mathbf{x}^*$ — текущая оценка вектора $\delta\mathbf{x}$, $\mathbf{K}$ — матрица синаптических коэффициентов, настраиваемых так, чтобы обеспечивался минимум квадратичного критерия $J = \| \mathbf{z} - \mathbf{H}\delta\mathbf{x}^* \|^2$; $\tilde{\mathbf{C}} = \mathbf{C} - \mathbf{KH}$.

С введением механизма опосредованной настройки матрицы $\mathbf{K}$, имеем $\mathbf{K} = \mathbf{DH}^T(\mathbf{R}^*)^{-1}$, $\dot{\mathbf{D}} = \mathbf{CD} + \mathbf{DC}^T - \mathbf{DH}^T(\mathbf{R}^*)^{-1}\mathbf{HD} + \mathbf{Q}^*$, $\mathbf{D}(0) = \mathbf{D}_0$, $(\mathbf{Q}^*, \mathbf{R}^*) = \underset{\mathbf{Q},\mathbf{R}}{\operatorname{argmin}}\, J$, где $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$ — положительно определенные матрицы.

В работе [2] показано, что при надлежащем выборе матриц $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{R}$ возможно существенное сокращение числа настраиваемых параметров. Например, если выбрать матрицы $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{R}$ диагональными, то число настраиваемых параметров будет не более, чем $\dim\delta\mathbf{x} + \dim\delta\mathbf{z}$, при том что общее число синаптических коэффициентов $\dim\mathbf{K} = \dim\delta\mathbf{x}^*\dim\delta\mathbf{z}$.

Перейдем теперь к оценке тензора градиента напряженности. Прежде всего отметим, что имеет место следующее разложение:

$$G_i\left(\mathbf{q}^{(s)}\right) = G_i\left(\mathbf{q}^{(0)}\right) + G'_{ij}\left(\mathbf{q}^{(0)}\right)\Delta q_j^{(s)}$$

$$+ \frac{1}{2!}G''_{ijk}\Delta q_j^{(s)}\Delta q_k^{(s)}$$

$$+ \frac{1}{3!}G''_{ijkl}\Delta q_j^{(s)}\Delta q_k^{(s)}\Delta q_l^{(s)} + \ldots,$$

$$(i,j,k,l) = \overline{0,3}, \quad (4)$$

где штрихи над символом служат для обозначения производных по координатам, $\Delta q_i^{(s)} = q_i^{(s)} - q_i^{(0)}$ и соответственно $\Delta\mathbf{q}^{(s)} = (\Delta q_i^{(s)})$, $i = 1, 2, 3$.

Учитывая, что GE-поле обладает сильно выраженной центральностью, в разложении (4) пренебрежем слагаемыми, начиная с третьего, полагая, что

$$\mathbf{G}\big(\mathbf{q}^{(s)}\big) = \mathbf{G}\big(\mathbf{q}^{(0)}\big) + \mathbf{G}'\big(\mathbf{q}^{(0)}\big)\Delta\mathbf{q}^{(s)}, \quad s = \overline{0,3}. \tag{5}$$

Напомним также, что вводя понятие центральности, имели в виду, что

$$\mathbf{G}\big(\mathbf{q}^{(s)}\big) = \tilde{\mathbf{G}}\big(\mathbf{q}^{(s)}\big) + \mathbf{g}\big(\mathbf{q}^{(s)}\big), \quad s = \overline{0,3}, \tag{6}$$

где $\tilde{\mathbf{G}}(\mathbf{q}^{(s)})$ — центральная составляющая напряженности Ge-поля, которая использована при интегрировании уравнений динамической группы и которая, заметим, легко вычислима. Учитывая, что оценки аномалий $\mathbf{g}(\mathbf{q}^{(s)})$, $s = \overline{0,3}$, находятся в результате решения обратной задачи в малом, систему уравнений (6) используем для оценки тензора градиента $\mathbf{G}'(\mathbf{q}^{(0)})$, а именно

$$\mathbf{G}'\big(\mathbf{q}^{0}\big) = \big(\| \Delta\tilde{\mathbf{G}}^{(1)} \vdots \Delta\tilde{\mathbf{G}}^{(2)} \vdots \Delta\tilde{\mathbf{G}}^{(3)} \| \\ + \| \Delta\mathbf{g}^{(1)} \vdots \Delta\mathbf{g}^{(2)} \vdots \Delta\mathbf{g}^{(3)} \|\big) \\ \times \| \Delta\mathbf{q}^{(1)} \vdots \Delta\mathbf{q}^{(2)} \vdots \Delta\mathbf{q}^{(3)} \|^{-1},$$

где

$$\Delta\tilde{\mathbf{G}}^{(s)} = \tilde{\mathbf{G}}\big(\mathbf{q}^{(s)}\big) - \tilde{\mathbf{G}}\big(\mathbf{q}^{(0)}\big), \quad \Delta\mathbf{g}^{(s)} = \mathbf{g}^{(s)} - \mathbf{g}^{(0)}, \\ s = \overline{1,3}.$$

Если точки o_s, $s = \overline{1,3}$ расположены соответственно на осях приборного трехгранника oq_1, oq_2oq_3 на равных удалениях d от начала координат, то

$$\mathbf{G}'\big(\mathbf{q}^{(0)}\big) = \frac{1}{d}\big(\| \Delta\tilde{\mathbf{G}}^{(1)} \vdots \Delta\tilde{\mathbf{G}}^{(2)} \vdots \Delta\tilde{\mathbf{G}}^{(3)} \| \\ + \| \Delta\mathbf{g}^{(1)} \vdots \Delta\mathbf{g}^{(2)} \vdots \Delta\mathbf{g}^{(3)} \|\big) \tag{7}$$

или, вводя соответствующие обозначения, $\boldsymbol{\Gamma} = \tilde{\boldsymbol{\Gamma}} + \boldsymbol{\gamma}$. Для центрального поля $\tilde{\boldsymbol{\Gamma}} = (\mu/|\mathbf{q}|^3)\,\mathrm{diag}\,(-1,-1,2)$ и вычисляется по спутниковым данным с матрицей относительных погрешностей $\varepsilon_r\,\mathrm{diag}\,(3,3,6)$, где $\varepsilon_r = |\Delta\mathbf{q}|/|\mathbf{q}|$, $\Delta\mathbf{q}$ — погрешность оценки вектора $\mathbf{q}$, т.е. без нарушения диагональности тензора $\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}$.

Наиболее востребованной в различных приложениях может быть оценка тензора $\boldsymbol{\gamma}$. Вместе с тем, если взять в качестве таковой непосредственно представленную вторым слагаемым в (7), то в силу инструментальных погрешностей измерений она, вообще говоря, не будет обладать свойством симметрии, как это должно быть у гессиана силовой функции GE-поля. Поэтому в качестве оценки этого тензора следует использовать $\boldsymbol{\gamma}^* = (\boldsymbol{\gamma} + \boldsymbol{\gamma})^T/2$, а в качестве погрешности оценивания $\Delta\boldsymbol{\gamma} = (\boldsymbol{\gamma} - \boldsymbol{\gamma}^T)/2$. Следует отметить, что погрешность оценки векторов $\Delta\boldsymbol{\gamma}^{(s)}$, $s = \overline{1,3}$, главным образом определяется не погрешностью координатной привязки, а погрешностями инерциальных измерителей, что следует из способа формирования векторов $\mathbf{z}^{(s)}$ и $\delta\mathbf{z}^{(s)}$, при котором $\boldsymbol{\varepsilon}^{(s)} = \boldsymbol{\varepsilon}^{(0)}$ для всех $s = \overline{1,3}$. Если к отмеченному учесть, что погрешности современной координатной привязки весьма малы по сравнению с пространственной изменчивостью GE-поля, то можно ограничиться чисто инструментальными оценками тензоров $\boldsymbol{\Gamma}$ и $\boldsymbol{\gamma}$ в приборном трехграннике.

По сути это другой способ оценки тензоров, состоящий в следующем. Выполняются подстановки $p_i^{(s)} = \dot{q}_i^{(s)} + e_{ikj}\omega_k q_j^{(s)}$, $s = \overline{0,3}$ в соответствующие вторые уравнения из уравнений состояния модели (1), после чего полученное уравнение с индексом $s = 0$ вычитается из аналогичных уравнений с индексами $s = \overline{1,3}$. Результат записывается в форме матричного уравнения $\hat{\dot{\boldsymbol{\omega}}} + \hat{\boldsymbol{\omega}}\hat{\boldsymbol{\omega}} = \boldsymbol{\Gamma} + \mathbf{T}$, где $\hat{\dot{\boldsymbol{\omega}}} = (e_{ikj}\dot{\omega}_k)$, $\hat{\boldsymbol{\omega}} = (e_{ikj}\omega_k)$, $i, k, j = \overline{1,3}$, а $\mathbf{T} = (T_{ij})$ — тензор градиентов удельных сил негравитационной природы (они же — кажущиеся ускорения). Далее выполняя над (8) операции альтернирования и симметрирования, получаем

$$\hat{\dot{\boldsymbol{\omega}}} = (\mathbf{T} - \mathbf{T}^T)/2, \\ \boldsymbol{\Gamma} = \hat{\boldsymbol{\omega}}\hat{\boldsymbol{\omega}} - (T + T^T)/2. \tag{8}$$

То есть по сути оценка значения $\boldsymbol{\Gamma}$ — это оценка гессиана гравитационного потенциала прямыми измерениями кажущихся ускорений, выполняемыми распределенной системой ньютонометров, с учетом поправки (типа Этвеша) на вращение приборного трехгранника.

Как видно из (8), погрешности оценки компонентов вектора $\dot{\omega}$ имеют порядок значения величины $|\mathbf{f}|/|\mathbf{d}|$, а погрешности оценок элементов тензора $\boldsymbol{\Gamma}$, обусловленных инструментальными погрешностями гироскопов и ньютонометров, соответственно $|\boldsymbol{\upsilon}||\boldsymbol{\omega}|/|\mathbf{d}|$ и $|\mathbf{f}|/|\mathbf{d}|$.

Непосредственная зависимость оценок тензоров градиентов напряженности GE-поля от инструментальных погрешностей в (8) отличает их от аналогичных оценок, предствленных ранее в (7) в качестве продуктов решения задачи динамического псевдообращения на нейросети.

Вычислительные эксперименты

Основная цель, преследуемая при постановки и проведении вычислительных экспериментов — это ответ на вопрос о том, в какой степени интегрированная система, если ее рассматривать в качестве измерителя напряженности (и ее градиента) GE-поля, эффективнее системы интерпретации в качестве оценок непосредственно измерений блока ньютонометров.

Ограничиваясь учетом только тепловой природы инструментальных погрешностей инерционных измерителей, примем, что $\mathbf{f}$ и $\boldsymbol{\upsilon}$ — чисто случайные векторные процессы („белые шумы“) с покомпонентными (покоординатными) среднеквадратическими значениями (СКЗ) соответственно σ_f и σ_υ, величины которых зависят от применяемых приборных (в частности, криогенных [3])

a	σ_f,m/s^2		σ_{g3}, m/s^2
	10^{-3} 10^{-5} 10^{-7}		$2 \cdot 10^{-5}$ $2 \cdot 10^{-7}$ $2 \cdot 10^{-9}$
b	σ_υ, s^{-1}	$\sigma_{f\upsilon}$, m/s^2	σ_{g3}, m/s^2
	$2 \cdot 10^{-7}$ $2 \cdot 10^{-9}$ $2 \cdot 10^{-11}$	$1.65 \cdot 10^{-4}$ $1.65 \cdot 10^{-6}$ $1.65 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-5}$ $2 \cdot 10^{-7}$ $2 \cdot 10^{-9}$
c	σ_ε, m	$\sigma_{f\varepsilon}$, m/s^2	σ_{g3}, m/s^2
	1.0 0.1 0.01	$4.5 \cdot 10^{-6}$ $4.5 \cdot 10^{-7}$ $4.5 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-7}$ $3 \cdot 10^{-8}$ $3 \cdot 10^{-9}$

технологий, обеспечивающих условия функционирования инерциальных измерителей.

Таким образом, понятие эффективности, упомянутое выше, связывается с понятием сложности (и затратности) приборных технологий и дополнительным выигрышем от применения интегрированных систем обработки навигационной информации, благодаря чему возможно некоторое смягчение требований к приборным технологиям измерений.

Рассмотрим результаты работы интегрированной системы в случае неподвижного наземного объекта, находящегося в северном полушарии на широте 45°. В таблице приведены эти результаты для гипотетического случая раздельного влияния погрешностей соответственно ньютонометров (a), гироскопов (b) и спутникового позиционирования (c) на точность оценки (для примера) компоненты g_3, где σ_{g3} — СКЗ погрешности оценки g_3, а σ_ε, $\sigma_f = \sigma_\upsilon|\omega_2||q|$ и $\sigma_{f\varepsilon} = 3(\omega_0^2)\sigma_\varepsilon$ — соответственно СКЗ погрешности (ε) спутникового позиционирования и слагаемых $e_{ikj}\upsilon_k p_j^{(s)}$ и $3(\omega_0^{(s)})^2 q_i^{(s)}\varepsilon_i/|\mathbf{q}^{(s)}|$ в уравнениях состояния модели (2).

Как видно из приведенной таблицы, наиболее эффективно (на два порядка) интегрированной системой подавляются шумы ньютонометров, хотя подавление остальных шумов (на порядок) также весьма заметно.

При совместном влиянии всех инструментальных погрешностей, когда $\sigma_f = 10^{-7}\,\text{m/s}^2$, $\sigma_\upsilon = 5 \cdot 10^{-11}$ (10^{-5} degrees per hour) и $\sigma_\varepsilon = 0.01\,\text{m}$, как показал полный эксперимент, имеет место значение $\sigma_{g3} = 2 \cdot 10^{-9}\,\text{m/s}^2$.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе показано, что при пространственном бортовом распределении трехкомпонентных блоков ньютонометров не только возможно определение напряженности GE-поля и ее градиента, но, что более существенно, то, что их оценка, получаемая в процессе решения задачи динамического обращения на нейросети, отождествляемой с традиционной задачей коррекции ИНС, по точности эффективнее оценок, получаемых на основе прямой (согласно (8)) интерпретации измерений инерциальных приборов — ньютонометров и гироскопов.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта ДВО РАН № 15-1-4-006 О (программа „Дальний Восток“).

Список литературы

[1] *Андреев В.Д.* Теория инерциальной навигации. Корректируемые системы. М.: Наука, 1967. 648 с.
[2] *Девятисильный А.С.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 10. С. 5–8.
[3] *Buchman S., Everit C.W.F., Parkinson B., Turneare J.P., Keisen G.M.* // Phys. B: Condens. Matter. 2000. Vol. 280. N 1. P. 497–498.