01

Интерпретация 2D инерциального метода навигации для решения задачи подвижной глубоководной гравиметрии

© А.С. Девятисильный

Институт автоматики и процессов управления ДвО РАН,
690041 Владивосток, Россия
e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

(Поступило в Редакцию 30 апреля 2008 г.)

Предложена модель гравиинерциальной системы и выполнено численное исследование эффективности ее использования на глубоководных подвижных аппаратах.

PACS: 04.80.Cc

Известно, что в задаче гравиметрии особое место занимает обследование гравитационных полей (GE-полей) морей и океанов, что в значительной степени обусловлено сугубо практическими целями, связанными с обнаружением и районированием подводных нефтегазовых и иных месторождений. Актуальность задачи становится особено очевидной при обращении к проблемам разграничения и освоения дна Ледовитого океана. Уже на первых шагах к их разрешению значительная роль была отведена, и как оказалось вполне успешно, глубоководным подводным аппаратам (ГПА).

В настоящей статье представлены результаты исследований по применению метода инерциальной навигации [1] для подводной гравиметрической съемки на малых (до 4 m/s) скоростях, характерных для ГПА. Эти результаты непосредственно связаны с новой, существенно отличающейся от традиционной, интерпретацией двухкомпонентных инерциальных навигационных систем (2D-ИНС).

Итак, рассматривается 2D-ИНС, т.е. ИНС с двумя планарными функциональными ньютонометрами (акселерометрами) на горизонтируемой платформе, традиционный переход к которой от 3D-ИНС реализуется при движении объекта по сфере известного радиуса ($r = \text{const}$) [2]. Принятие такой гипотезы о движении ГПА вполне приемлемо в силу ограниченности географических районов обследования и достаточно высокой точности (до 1 m) измерения глубины. Как известно [2], традиционная организация 2D-ИНС обусловливает неасимптотическую устойчивость (достигаемую благодаря учету информации об r при формировании значения напряженности GE-поля в модели ИНС) динамической группы уравнений алгоритма ее работы, а если учесть еще и такой же характер устойчивости кинематической группы уравнений (уравнений Пуассона [2]), — устойчивость функционирования всей системы.

В дальнейшем достаточно обращения только к динамической группе уравнений 2D-ИНС, которые могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} &\dot{q}_i = -e_{ikj}\omega_k q_j + p_i, \quad q_i(0) = q_{i,0}, \\ &\dot{p}_i = -e_{ikj}\omega_k p_j + G_i(q) + F_i, \quad p_i(0) = p_{i,0}, \\ &i = 1, 2, \quad j, k = 1, 3, \end{aligned} \tag{1}$$

где e_{ikj} — псевдотензор Леви-Чивита; $q = (q_i)$, $p = (p_i)$, $F = (F_i)$, $\omega = (\omega_t$, $G = (G_t)$ — в общем случае, т.е. при $i = \overline{1, 3}$, векторы соответственно координат, удельных импульсов и сил негравитационной природы, абсолютной угловой скорости вращения приборной платформы и напряженности GE-поля в проекциях на оси жестко связанного с приборной платформой координатного трехгранника. Обозначим его через $oy = oy_1y_2y_3$ и примем, что он является физической моделью географически ориентированного трехгранника, т.е. в идеальном случае его ось oy_1 направлена на Восток, oy_2 — на Север, oy_3 — по вектору q. Отметим также, что в (1) и далее в статье действует правило суммирования по повторяющимся индексам.

В работе [3] впервые показано, что если при формировании алгоритма 2D-ИНС использовать не только геометрическое условие, т.е. $|q| = r = \text{const}$, но и условие равновесного состояния объекта на сфере — $\dot{p} = 0$, или

$$\omega_2 p_1 - \omega_1 p_2 + G_3 + F_3 = 0, \tag{2}$$

то это открывает возможность постановки корректной обратной задачи, решение которой при соответствующей конструкции алгоритма динамического обращения асимптотически устойчиво.

Примем, что $G_3 = G_c + g$, где $G_c = \mu/r^2$, μ — гравитационный параметр Земли, а $g = g(s)$ отождествляется с аномалией значения напряженности GE-поля как функции пройденного пути s от начала ($t_0 = 0$) движения объекта вдоль некоторой кривой на сфере. Тогда, ограничиваясь случаем, когда это движение совершается с постоянной относительной скоростью v, всегда можно иметь в виду, что $g(s) = g(vt) = g(t)$. В частности, если $g(s)$ описывается марковским процессом первого порядка, т. е.

$$\frac{dg}{ds} = -\lambda_s g + \sqrt{2\lambda_s}\sigma_s u,$$

где λ_s и σ_s — параметры сноса и диффузии, а u — несмещенный белый шум единичной интенсивности, то, принимая во внимание $ds = v dt$, имеем

$$\dot{g} = -\lambda g + \sqrt{2\lambda}\sigma u, \qquad g(0) = g_0, \tag{3}$$

где $\lambda = \lambda_s v$, $\sigma = \sigma_s \sqrt{v}$. В заверешние этого заметим, что модель (3) в качестве идентификационной актуальна и в тех случаях, когда эволюция g достаточно произвольна.

Далее полагаем, что уравнения (1)–(3) с учетом того, что векторы ω и F измеряются гироскопами и ньютонометрами (одни из которых — вериткальный — выполняет функцию гравитометра) образуют модель обратной задачи, целью решения которой являются оценки текущих значений q, p и g. После линеаризации эта задача представляется моделью „состояние-измерение" следующего вида:

$$\sigma\dot{q}_i = -e_{ikj}\omega_k\delta q_j + \delta p_i - e_{ikj}\nu_k q_j,\ \delta q_i(0) = \delta q_{i,0},$$

$$\delta\dot{p}_i = -e_{ikj}\omega_k\delta p_j - \omega_0^2\delta q_i + f_i - e_{ikj}\nu_k p_j,\ \delta p_i(0) = \delta p_{i,0},$$

$$\dot{g} = -\lambda g + \sqrt{2\lambda}\sigma u,\ g(0) = g_0,$$

$$J = \omega_2\delta p_1 - \omega_1\delta p_2 + g + 2\omega_0^2\varepsilon + f_3,$$

$$i = 1, 2; \quad k, j = \overline{1, 3}, \tag{4}$$

где $\omega_0 = (\mu/r^3)^{1/2}$ — частота Шулера; ν_k, $k = 1, 3$ — инструментальные погрешности гироскопических измерителей; f_i, $i = 1, 3$ — инструментальные погрешности ньютонометров $(i = 1, 2)$ и гравиметра $(i = 3)$; ε — инструментальная погрешность измерения глубины ГПА; $q_1 = q_2 = 0$, $q_3 = r$, $\delta q_3 = \varepsilon$, $p_1 = \omega_2 r$, $p_2 = -\omega_1 r$, $p_3 = 0$, $r = 6\,371\,000$. Следует отметить также, что компоненты вектора $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2)^T$ малого угла, на который плоскость oy_1y_2 отклоняется от горизонтального положения, определяются соотношениями: $\alpha_1 = \delta q_2/r$, $\alpha_2 = -\delta q_1/r$.

Представление модели задачи в виде (4) ориентировано на реализацию калмановского алгоритма (фильтра) [4] оценивая ее вектора состояния.

С целью исследования гравиметрических возможностей рассматриваемой 2D-ИНС были проведены вычислительные эксперименты по реализации калмановского алгоритма. На рис. 1–4 проиллюстрированы результаты одного из них, выполненного для движения ГПА со скоростью $v = 1$ m/s по параллели с широтой $\varphi = 45°$ в восточном направлении при следующих гипотезах о параметрах. Инструментальные погрешности инерциальных измерителей, т. е. f_i и $\nu_i = \overline{1, 3}$, и измерителя глубины (батиметра), т. е. ε, являются несмещенными белыми шумами, причем их среднеквадратические значения равны $\sigma_{f_1} = \sigma_{f_2} = 10^{-3}$ m/s^2 — для

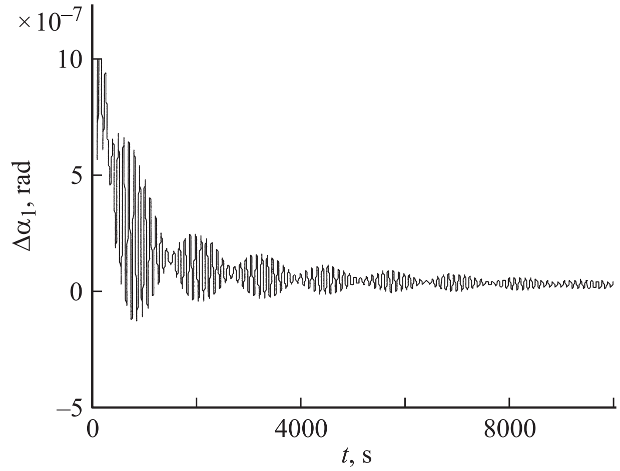

Рис. 1. График эволюции значения $\Delta\alpha_1$.

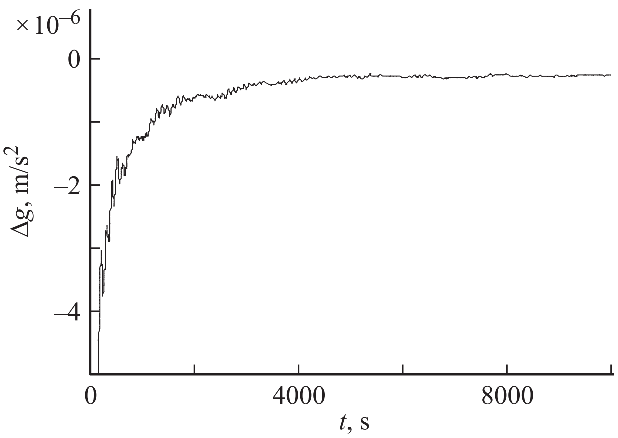

Рис. 2. То же, что на рис. 1, для Δg.

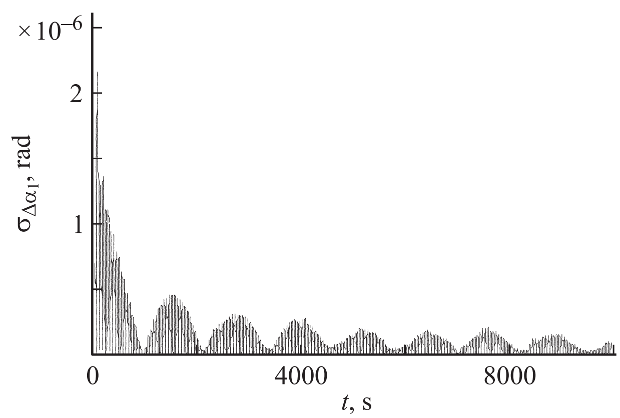

Рис. 3. То же, что на рис. 1, для $\sigma_{\Delta\alpha_1}$.

горизонтальных ньютонометров, $\sigma_{f_3} = 10^{-6}$ m/s^2 — для всех трех гироскопов, $\sigma_\varepsilon = 1$ m — для батиметра; кроме того, $\delta q_1(0) = -\delta q_2(0) = 10$ m; $\delta p_1(0) = -\delta p_2(0) = 0.1$ m/s; $g(0) = 10^{-3}$ /s^2.

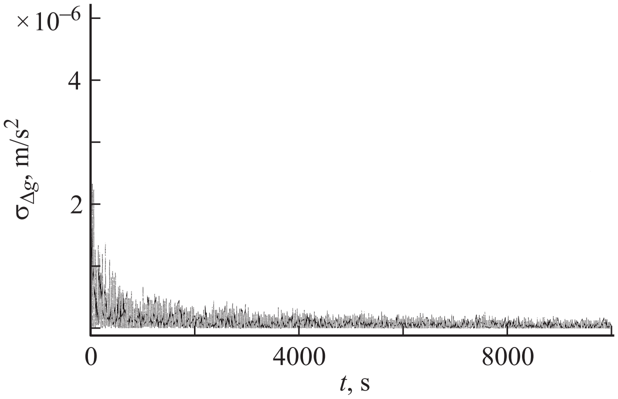

Рис. 4. То же, что на рис. 1, для $\sigma_{\Delta g}$.

На рис. 1–4 через параметры $\Delta\alpha_1$, Δg и $\sigma_{\Delta\alpha}$, $\sigma_{\Delta g}$ обозначены соответственно величины и среднеквадратические значения погрешностей оценки α_1 и g.

Графики на рисунках хорошо подтверждают теоретические ожидания, связанные с корректностью постановки задачи, и иллюстрируют возможность весьма высокой точности горизонтирования платформы и оценки аномалии GF-поля, а также убедительно свидетельствуют о прикладных перспективах и целесообразности развития предложенной интерпретации 2D-ИНС для глубоководных исследований с помощью ГПА.

Список литературы

[1] *Ишлинский А.Ю.* Классическая механика и силы инерции. М.: Наука, 1987. 320 с.
[2] *Андреев В.Д.* Теория инерциальной навигации. Корректируемые системы. М.: Наука, 1967. 648 с.
[3] *Девятисильный А.С., Числов К.А.* // Авиакосмическое приборостроение. 2007. № 11. С. 19–23.
[4] *Kalman R.E., Falb P.L., Arbib M.A.* Topics in Mathematical System Theory. N.Y.: McGraw Hill, 1969.