
ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ / TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR THE PRODUCTION OF MATERIALS AND ELECTRONIC DEVICES

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.124>

ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЙ МОДУЛЯЦИОННЫЙ ДАТЧИК КАЖУЩЕГОСЯ УСКОРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННЫХ УСКОРЕНИЙ ОСНОВАНИЯ

Научная статья

Нгуен К.Х.^{1,*}

¹ Институт науки и технологий, Ханой, Вьетнам

* Корреспондирующий автор (quannh.amst79[at]gmail.com)

Аннотация

К настоящему времени достигнуты высокие результаты в разработке различных датчиков КУ, нашедших широкое применение не только в аэрокосмической отрасли, но далеко за ее пределами в большинстве технических областей. Однако всевозрастающие потребности науки, техники и экономики указывают на то, что в большинстве случаев существующие реализации основных известных типов датчиков по-прежнему сохраняют целый ряд недостатков, к числу которых относятся их не всегда удовлетворительные массогабаритные характеристики, слабая помехозащищенность при работе на подвижном основании, дороговизна, значительное время измерения, относительная узость амплитудного и частотного диапазонов, не всегда достаточная надежность и стабильность.

Поэтому актуальной является проблема создания относительно недорогого векторного (трехкомпонентного) малогабаритного датчика КУ средней точности, выполненного на базе сборки из трех традиционных МА небольшой точности, обладающего улучшенными по сравнению с ними точностными характеристиками и защищенностью по отношению влияния температурных, шумовых, вибрационных и др. возмущающих воздействий.

В этой работе исследуется возможность создания модуляционного датчика (МД) кажущегося ускорения (КУ) повышенной точности на базе традиционного маятникового акселерометра (МА) невысокой точности. По результатам расчетов и моделирования продемонстрирована структурная схема трехкомпонентного информационно-избыточного модуляционного датчика (ТИМД), построенная на базе трех МД.

Ключевые слова: трехкомпонентный информационно-избыточный модуляционный датчик, маятниковый акселерометр, кажущееся ускорение.

THREE-COMPONENT MODULATED APPARENT ACCELERATION SENSOR UNDER VARIABLE BASE ACCELERATIONS

Research article

Nguyen Q.H.^{1,*}

¹ Institute of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

* Corresponding author (quannh.amst79[at]gmail.com)

Abstract

To date, good results have been achieved in the development of various AA sensors that have found widespread application not only in the aerospace industry, but far beyond it in most technical fields. However, the ever-increasing needs of science, technology and economics indicate that in most cases existing implementations of the main known types of sensors still have a number of disadvantages, which include their not always satisfactory mass-dimensional characteristics, poor noise immunity when operating on a moving base, high cost, significant measurement time, relative narrowness of amplitude and frequency ranges, and insufficient reliability and stability.

That is why the problem of creation of a relatively inexpensive vector (three-component) small-size AA sensor of medium accuracy, made on the basis of an assembly of three traditional MS of small accuracy, possessing improved accuracy characteristics in comparison with those of the latter and protection against the influence of temperature, noise, vibration, etc. disturbing influences is relevant.

This work studies the possibility of creating a modulation sensor (MS) of apparent acceleration (AA) of increased accuracy based on a conventional pendulum accelerometer (PA) of low accuracy. Based on the results of calculations and modelling, the structural scheme of a three-component redundant modulation sensor (TRMS) based on three MSs is demonstrated.

Keywords: three-component redundant modulation sensor, pendulum accelerometer, apparent acceleration.

Введение

К настоящему времени достигнуты высокие результаты в разработке различных датчиков КУ [6], [8], [9], [10], нашедших широкое применение не только в аэрокосмической отрасли, но далеко за ее пределами в большинстве технических областей. Однако всевозрастающие потребности науки, техники и экономики указывают на то, что в большинстве случаев существующие реализации основных известных типов датчиков по-прежнему сохраняют целый ряд недостатков, к числу которых относятся их не всегда удовлетворительные массогабаритные характеристики, слабая помехозащищенность при работе на подвижном основании, дороговизна, значительное время измерения, относительная узость амплитудного и частотного диапазонов, не всегда достаточная надежность и стабильность.

Поэтому актуальной является проблема создания относительно недорогого векторного (трехкомпонентного) малогабаритного датчика КУ средней точности, выполненного на базе сборки из трех традиционных МА небольшой точности, обладающего улучшенными по сравнению с ними точностными характеристиками и защищенностью по отношению влияния температурных, шумовых, вибрационных и др. возмущающих воздействий.

Для достижения поставленной цели в настоящей работе рассмотрена базовая схема реализации МД [1], [4], [5], [11] на основе традиционного МА, выпускаемого промышленностью. Создание ТИМД, построенного на базе трех МД, предназначенного для работы на подвижном основании, сравнительно малогабаритного, недорогого, помехозащищенного, со средним уровнем точности, с достаточно широким амплитудным и частотным диапазонами, с высоким быстродействием позволит использовать его для решения многих задач аэрокосмической и других отраслей [1], [2], [3].

Основные результаты

2.2. Принципиальная схема МД

Принципиальная схема МД представлена на рис. 1, он состоит из электронно-механической части – МА на УП и электронно-вычислительной части – ЦВМ, снабженной ЦАП, АЦП, таймером, а также программно-алгоритмическим обеспечением работы МД [5]. Для обеспечения возможности модуляционного режима работы МА₁ в его блок аналоговой электроники введены входной усилитель (ВУ) для передачи и масштабирования модуляционного воздействия с ЦАП на вход предварительного усилителя (ПУ₁) и выходной прецизионный усилитель (ВПУ₁), согласующий уровень выходного сигнала МА₁ с входным диапазоном АЦП₁. Разгрузка МА₁ от негативного влияния меняющихся проекций продольного и бокового ускорения g и a_k производится путем сложения токов в катушке датчика момента (ДМ₁), формируемых усилителем мощности (УМ₁) и ВПУ₂ на основании работы управляющей программы, исходя из результатов измерений на предыдущих шагах работы МД [2].

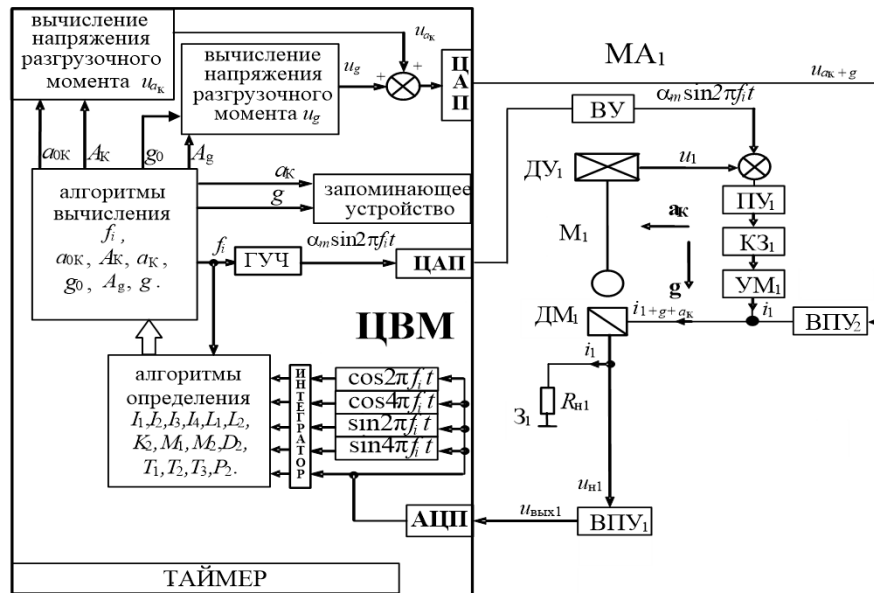


Рисунок 1 - Упрощенная принципиальная схема МД на базе МА₁. Где нижними индексами обозначена принадлежность величин ДУ₁, ДМ₁, ... соответствующим МА_k трехкомпонентного датчика

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.124.1>

Примечание: $k = 1, 2, 3$. Z_k Z_1 – развязанные между собой соединения с “землей” МА_k; M_k – маятники; ДУ_k – датчики угла; ПУ_k – предварительные усилители; КЗ_k – корректирующие звенья; УМ_k – усилители мощности; ДМ_k – датчики момента; R_{nk} – нагрузочные сопротивления; ВПУ_k – выходные прецизионные усилители; ГУЧ – генератор управляемой частоты; ВУ – входной усилитель; i_k – токи ДМ_k

2.3. Трехкомпонентный датчик

Блок-схема ТИМД представлена на рис. 2. Для измерения каждой из трех проекций КУ a_x , a_y и a_z целесообразно иметь три измеряющих МА, расположенных на УП так, что их оси чувствительности соответственно образовывали бы ортогональные трехгранники. Введем систему координат связанную с УП OXYZ, тогда КУ УП состоит из трех составляющих по осям OX, OY и OZ. При этом по каждой из осей трехгранника будет направлено по одной оси чувствительности. Для уменьшения влияния угловых движений основания на точность МА следует располагать МА на УП как можно более компактно, а для создания симметрии измерительных каналов – располагать оси чувствительности МА по осям прямоугольного тетраэдра. При работе на подвижном основании происходит непрерывное изменение проекций КУ [7]. Представим на некотором ограниченном промежутке времени измеряемые МА₁ проекции ускорения $a_1(t)$ и $g_1(t)$ линейными функциями времени:

$$a_1(t) = a_X(t) = x_0 + A_X t = a_{01} + A_{a1} t, \quad g_1(t) = a_Y(t) = y_0 + A_Y t = g_{01} + A_{g1} t \quad (1)$$

Аналогично для МА₂, МА₃:

$$a_2(t) = a_Y(t) = a_{02} + A_{a2} t \quad g_2(t) = a_Z(t) = z_0 + A_Z t = g_{02} + A_{g2} t, \quad (2)$$

$$a_3(t) = a_z(t) = a_{03} + A_{a3} t, \quad g_3(t) = a_X(t) = g_{03} + A_{g3} t \quad (3)$$

где $x_0 = a_{01} = g_{03}$, $y_0 = a_{02} = g_{01}$ и $z_0 = a_{03} = g_{02}$ – их постоянные составляющие, а $A_X = A_{a1} = A_{g3}$, $A_Y = A_{a2} = A_{g1}$ и $A_Z = A_{a3} = A_{g2}$ – скорости их изменения (см. рис. 2).

С учетом (1) имеем систему уравнений для МА₁ [1], [2], [3]:

$$\left. \begin{aligned} J_1 \ddot{\alpha}_1(t) + 2\zeta_1 \omega_{g1} \dot{\alpha}_1(t) + \omega_{01}^2 \alpha_1(t) &= a_1(t)/l_1 - g_1(t)\alpha_1(t)/l_1 - k_{\text{ДМ11}} i_1(t); \\ u_1(t) &= k_{\text{ДУ1}} (\alpha_1(t) + \alpha_{m1} \sin 2\pi f_{i-1} t) \\ T_1 \dot{i}_1(t) + i_1(t) &= (\tau_1 \dot{u}_1(t) + u_1(t)) k_{21}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

С учетом (2) имеем систему уравнений для МА₂:

$$\left. \begin{aligned} J_2 \ddot{\alpha}_2(t) + 2\zeta_2 \omega_{g2} \dot{\alpha}_2(t) + \omega_{02}^2 \alpha_2(t) &= a_2(t)/l_2 - g_2(t)\alpha_2(t)/l_2 - k_{\text{ДМ12}} i_2(t); \\ u_2(t) &= k_{\text{ДУ2}} (\alpha_2(t) + \alpha_{m2} \sin 2\pi f_{2i-1} t) \\ T_2 \dot{i}_2(t) + i_2(t) &= (\tau_2 \dot{u}_2(t) + u_2(t)) k_{22}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

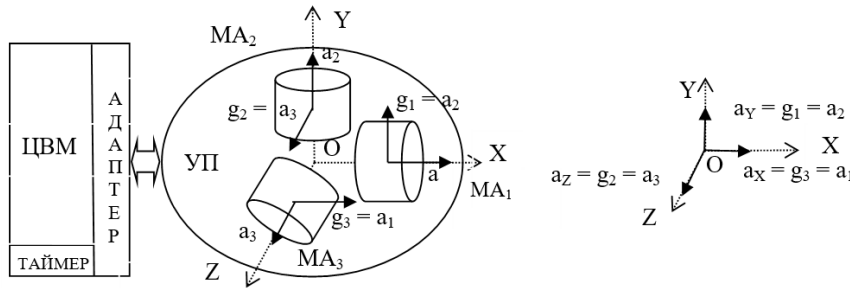


Рисунок 2 - Блок-схема ТИМД
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.124.2>

С учетом (3) имеем систему уравнений для МА₃:

$$\left. \begin{aligned} J_3 \ddot{\alpha}_3(t) + 2\zeta_3 \omega_{g3} \dot{\alpha}_3(t) + \omega_{03}^2 \alpha_3(t) &= a_3(t)/l_3 - g_3(t)\alpha_3(t)/l_3 - k_{\text{ДМ13}} i_3(t); \\ u_3(t) &= k_{\text{ДУ3}} (\alpha_3(t) + \alpha_{m3} \sin 2\pi f_{3i-1} t); \\ T_3 \dot{i}_3(t) + i_3(t) &= (\tau_3 \dot{u}_3(t) + u_3(t)) k_{23}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Здесь $k_{\text{ПК}}$ – жесткость подвеса М, $J_k = (J_{0k} + m_k l_k^2) / (m_k l_k^2)$, $2\zeta_k \omega_{gk} = b_k / (m_k l_k^2)$, $\omega_{gk} = \omega_k$ при $g_k(t) = 9,8 \text{ М/с}^2$, $\omega_{0k}^2 = k_{\text{ПК}} / (m_k l_k^2)$, $k_{\text{ДМ1}k} = k_{\text{ДМ}k} / (m_k l_k^2)$, $t_i = t_{i-1} + n/f_{i-1}$, где $k = 1, 2, 3$ – индекс, обозначающий принадлежность соответствующего коэффициента к МА₁, МА₂, МА₃.

Для уменьшения динамической погрешности МД, работа МА которого описана (4), необходимо вводить разгрузочные моменты для компенсации вредных составляющих вида $(a_{01i} + A_{a1i} t) / l_1 - (g_{01i} + A_{g1i} t) \alpha_1(t) / l_1$, посредством

$$\text{ВПУ}_2: i_{a1-i}(t) = (a_{01i-1} + A_{a1i-1} t) / (l_1 k_{\text{ДМ11}})^{-1} \text{ и}$$

$$i_{g1-i}(t) = -(g_{01i-1} + A_{g1i-1} t) (l_1 k_{\text{ДМ11}})^{-1} \alpha_1(t) = -(g_{01i-1} + A_{a2i-1} t) (l_1 k_{\text{ДМ11}})^{-1} \alpha_1(t)$$

формируемых на основании результатов предыдущих шагов работы МД. При этом сигнал $\alpha_1(t)$ может быть восстановлен как, используя непосредственные измерения с датчика угла ДУ₁, так и вычислен на базе выходного сигнала МА с учетом его параметров. Для первого уравнения системы (5) разгрузочные моменты имеют в

$$\text{виду: } i_{a2-i}(t) = (a_{02i-1} + A_{a2i-1} t) / (l_2 k_{\text{ДМ12}})^{-1},$$

$$i_{g2-i}(t) = -(g_{02i-1} + A_{g2i-1} t) (l_2 k_{\text{ДМ12}})^{-1} \alpha_2(t) = -(g_{02i-1} + A_{a3i-1} t) (l_2 k_{\text{ДМ12}})^{-1} \alpha_2(t)$$

а для первого уравнения системы (6) разгрузочные моменты имеют в виду:

$$i_{a3-i}(t) = (a_{03i-1} + A_{a3i-1} t) / (l_3 k_{\text{ДМ13}})^{-1},$$

$$i_{g3-i}(t) = -(g_{03i-1} + A_{g3i-1} t) (l_3 k_{\text{ДМ13}})^{-1} \alpha_3(t) = -(g_{03i-1} + A_{a1i-1} t) (l_3 k_{\text{ДМ13}})^{-1} \alpha_3(t)$$

Тогда первое уравнение системы (4), (5) и (6) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\alpha}_1(t) + 2\zeta_1 \omega_{g1} \dot{\alpha}_1(t) + \omega_{01}^2 \alpha_1(t) = \\ = a_1(t)/l_1 - g_1(t)\alpha_1(t)/l_1 - k_{дМ11} (i_1(t) + i_{a_1 i-1}(t) + i_{g_1 i-1}(t)) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} J_2 \ddot{\alpha}_2(t) + 2\zeta_2 \omega_{g2} \dot{\alpha}_2(t) + \omega_{02}^2 \alpha_2(t) = \\ = a_2(t)/l_2 - g_2(t)\alpha_2(t)/l_2 - k_{дМ12} (i_2(t) + i_{a_2 i-1}(t) + i_{g_2 i-1}(t)) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} J_3 \ddot{\alpha}_3(t) + 2\zeta_3 \omega_{g3} \dot{\alpha}_3(t) + \omega_{03}^2 \alpha_3(t) = \\ = a_3(t)/l_3 - g_3(t)\alpha_3(t)/l_3 - k_{дМ13} (i_3(t) + i_{a_3 i-1}(t) + i_{g_3 i-1}(t)). \end{aligned} \quad (9)$$

Следует отметить, что наличие дополнительных токов разгрузки $i_{a_k}(t), i_{g_k}(t)$ не изменит решение системы уравнений (4), (5) и (6) так как на каждом новом шаге соотношение (7), (8) и (9) можно воспринимать в виде:

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\alpha}_1(t) + 2\zeta_1 \omega_{g1} \dot{\alpha}_1(t) + \omega_{01}^2 \alpha_1(t) = \\ = (\Delta a_{01i} + \Delta A_{a1i}t) / l_1 - (\Delta g_{01i} + \Delta A_{a2i}t) \alpha_1(t) / l_1 - k_{дМ11} i_1(t) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} J_2 \ddot{\alpha}_2(t) + 2\zeta_2 \omega_{g2} \dot{\alpha}_2(t) + \omega_{02}^2 \alpha_2(t) = \\ = (\Delta a_{02i} + \Delta A_{a2i}t) / l_2 - (\Delta g_{02i} + \Delta A_{a3i}t) \alpha_2(t) / l_2 - k_{дМ12} i_2(t) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} J_3 \ddot{\alpha}_3(t) + 2\zeta_3 \omega_{g3} \dot{\alpha}_3(t) + \omega_{03}^2 \alpha_3(t) = \\ = (\Delta a_{03i} + \Delta A_{a3i}t) / l_3 - (\Delta g_{03i} + \Delta A_{a1i}t) \alpha_3(t) / l_3 - k_{дМ13} i_3(t) \end{aligned} \quad (12)$$

С учетом (10) уравнения для МА₁ можно переписать так:

$$\left. \begin{aligned} J_1 \ddot{\alpha}_1(t) + 2\zeta_1 \omega_{g1} \dot{\alpha}_1(t) + \omega_1^2 \alpha_1(t) = \\ = (\Delta a_{01i} + \Delta A_{a1i}t) / l_1 - (\Delta g_{01i} + \Delta A_{a2i}t) \alpha_1(t) / l_1 - k_{дМ11} i_1(t); \\ u_1(t) = k_{дУ1} (\alpha_1(t) + \alpha_{m1} \sin 2\pi f_{1i-1}t) \\ T_1 \dot{i}_1(t) + i_1(t) = (\tau_1 \dot{u}_1(t) + u_1(t)) k_{21}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

С учетом (11) уравнения для МА₂ можно переписать так:

$$\left. \begin{aligned} J_2 \ddot{\alpha}_2(t) + 2\zeta_2 \omega_{g2} \dot{\alpha}_2(t) + \omega_2^2 \alpha_2(t) = \\ = (\Delta a_{02i} + \Delta A_{a2i}t) / l_2 - (\Delta g_{02i} + \Delta A_{a3i}t) \alpha_2(t) / l_2 - k_{дМ12} i_2(t); \\ u_2(t) = k_{дУ2} (\alpha_2(t) + \alpha_{m2} \sin 2\pi f_{2i-1}t) \\ T_2 \dot{i}_2(t) + i_2(t) = (\tau_2 \dot{u}_2(t) + u_2(t)) k_{22}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

С учетом (12) уравнения для МА₃ можно переписать так:

$$\left. \begin{aligned} J_3 \ddot{\alpha}_3(t) + 2\zeta_3 \omega_{g3} \dot{\alpha}_3(t) + \omega_3^2 \alpha_3(t) = \\ = (\Delta a_{03i} + \Delta A_{a3i}t) / l_3 - (\Delta g_{03i} + \Delta A_{a1i}t) \alpha_3(t) / l_3 - k_{дМ13} i_3(t); \\ u_3(t) = k_{дУ3} (\alpha_3(t) + \alpha_{m3} \sin 2\pi f_{3i-1}t); \\ T_3 \dot{i}_3(t) + i_3(t) = (\tau_3 \dot{u}_3(t) + u_3(t)) k_{23}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Здесь $\Delta a_{01i}, \Delta a_{02i}, \Delta a_{03i}, \Delta A_{a1i}, \Delta A_{a2i}, \Delta A_{a3i}$ – некомпенсированная составляющая $a_{01i}, a_{02i}, a_{03i}, A_{a1i}, A_{a2i}, A_{a3i}$

На каждом шаге программы вычисления значений ускорений поставим в виде (см. рис. 2):

$$\Delta a_{01i} = a_{01i} - a_{01i-1}, \Delta a_{02i} = a_{02i} - a_{02i-1}, \Delta a_{03i} = a_{03i} - a_{03i-1}; \quad (16)$$

$$\Delta A_{a1i} = A_{a1i} - A_{a1i-1}, \Delta A_{a2i} = A_{a2i} - A_{a2i-1}, \Delta A_{a3i} = A_{a3i} - A_{a3i-1}. \quad (17)$$

Общее решение (13) во втором приближении относительно $\alpha_1(t)$ и $i_1(t)$ на втором и последующих шагах будет иметь вид [2]:

$$\begin{aligned}
 \alpha_1(t) = & V_\alpha e^{X_1 t} + P_\alpha e^{G_1 t} \cos Qt + U_\alpha e^{G_1 t} \cos Qt + \Delta a_{01} B_1(\omega_1) + \Delta A_{g1} [B_3(\omega_1) - tR_2(\omega_1)] + \\
 & + \Delta A_{a1} [-B_2(\omega_1) + tB_1(\omega_1)] + \Delta A_{g1} \Delta A_{a1} [B_4(\omega_1) + tR_3(\omega_1) - t^2 S_2(\omega_1)] + \\
 & + \{H_1(f_{i-1}, \omega_1) + \Delta A_{g1} [H_2(f_{i-1}, \omega_1) + tC_2(f_{i-1}, \omega_1)]\} \sin(2\pi f_{i-1} t + \varphi) + \\
 & + \{J_1(f_{i-1}, \omega_1) + \Delta A_{g1} [J_2(f_{i-1}, \omega_1) + tF_2(f_{i-1}, \omega_1)]\} \cos(2\pi f_{i-1} t + \varphi); \\
 i_1(t) = & V_i e^{X_1 t} + P_i e^{G_1 t} \cos Qt + U_i e^{G_1 t} \cos Qt + \Delta a_{01} I_1(\omega_1) + \Delta A_{g1} [I_3(\omega_1) - tT_2(\omega_1)] + \\
 & + \Delta A_{a1} [-I_2(\omega_1) + tI_1(\omega_1)] + \Delta A_{g1} \Delta A_{a1} [I_4(\omega_1) + tT_3(\omega_1) - t^2 P_2(\omega_1)] + \\
 & + \{M_1(f_{i-1}, \omega_1) + \Delta A_{g1} [M_2(f_{i-1}, \omega_1) + tD_2(f_{i-1}, \omega_1)]\} \sin(2\pi f_{i-1} t + \varphi) + \\
 & + \{L_1(f_{i-1}, \omega_1) + \Delta A_{g1} [L_2(f_{i-1}, \omega_1) + tK_2(f_{i-1}, \omega_1)]\} \cos(2\pi f_{i-1} t + \varphi).
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

Имитационное моделирование работы ТИМД [5] в Mathcad с номинальными значениями параметров получим результаты для МА₁:

DELTA_g1k =	DELTA_a1k =
0.4698747585995662	6.519825088702191·10 ⁻⁷
0.47707592329999926	-3.660982628161946·10 ⁻¹¹
6.1378498971897955·10 ⁻⁴	1.22764909349371·10 ⁻¹⁰
1.5193857134150335·10 ⁻³	-1.0336975719837938·10 ⁻¹⁰
-2.3351214970546152·10 ⁻⁶	3.3494984563731123·10 ⁻¹¹
1.4923547748679766·10 ⁻⁶	6.158629162200668·10 ⁻¹¹
-1.3583479230305784·10 ⁻⁸	-1.2686918182680529·10 ⁻¹⁰
-1.099973623297501·10 ⁻⁸	1.0763656632661878·10 ⁻¹⁰
-2.180541969210026·10 ⁻⁹	-1.1297629498585593·10 ⁻¹¹
-2.45494291561954·10 ⁻¹⁰	-8.995115763354988·10 ⁻¹¹

Рисунок 3 - Абсолютная погрешность вычисления g₁ и a₁ при a₁(t) = 7+8t м/с², g₁(t) = 9,8+10t м/с²
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.124.3>

DELTA_g1k =	DELTA_a1k =
0.45378944854074454	7.893807341119441·10 ⁻⁸
0.43551858238508245	-2.3297274776012955·10 ⁻⁸
4.003368168969956·10 ⁻⁴	-4.556930077725951·10 ⁻⁸
1.3084768031745853·10 ⁻³	-6.348870718042576·10 ⁻⁸
-9.328515242046365·10 ⁻⁶	-8.220447389462038·10 ⁻⁸
6.492786646106197·10 ⁻⁶	-9.906717179930524·10 ⁻⁸
3.2093269926036783·10 ⁻⁶	-1.1699011670529558·10 ⁻⁷
-1.0752581824036156·10 ⁻⁵	-1.36500712510923·10 ⁻⁷
1.3214777986547688·10 ⁻⁵	-1.518851657779865·10 ⁻⁷
-4.868024047866015·10 ⁻⁶	-1.71438111262745·10 ⁻⁷

Рисунок 4 - Абсолютная погрешность вычисления g₁ и a₁ при a₁(t) = 1 + 0,01sin0,08t м/с², g₁(t) = 9,8 + 0,013sin0,09t м/с²
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.124.4>

В результате имитационного моделирования установлено, что, например, при частоте измерений порядка 20 Гц, что соответствует режиму измерений на подвижном основании, после 5 шагов алгоритмическая погрешность вычисления проекций ускорения не превосходит 10⁻⁵ м/с². Полученный результат показывает хорошую сходимость и высокую точность модифицированного алгоритма. Приведены результаты имитационного моделирования работы ТИМД на подвижном основании, подтвердившие возможность уменьшения динамических погрешностей ТИМД до уровня не хуже 10⁻⁵ м/с² для обеих проекций КУ при частоте измерений порядка 20 Гц для случая вибрации модели компонент КУ типичного уровня. Также методом имитационного моделирования проводились исследования амплитудно-частотного диапазона алгоритма ТИМД при заданной допустимой погрешности 10⁻⁸ м/с² для случая линейно нарастающей и 10⁻⁵ м/с² – гармонических воздействий вида.

Заключение

На подвижном основании (на борту судов и самолетов) измерения КУ сопровождается значительными помехами, обусловленными собственной линейной и угловой подвижностью основания и его наклонами, волнением моря, течениями, ветровой нагрузкой, вибрациями носителя и т. д., кроме того, как правило, начальные и заключительные опорные наблюдения разделены большим промежутком времени и расстояния, измерения проводятся в большом диапазоне изменения КУ. Все это требует от приборов повышенной помехозащищенности, расширенного диапазона измерений, высокой стабильности нуля-пункта и масштабного коэффициента, а также точности их эталонирования [6].

Точность измерения КУ при этом, как правило, составляет 0,1-1 мГал для судов [18], [19], [20] и 1-10 мГал для самолетов [21], [22], [23].

По сравнению с указанными приборами в результате выполненного имитационного моделирования работы ТИМД на подвижном основании с номинальными значениями параметров [1], [2], [3] установлено, что в идеализированном случае присутствия исключительно методических динамической и температурных погрешностей – удастся идентифицировать и скомпенсировать их с очень высокой степенью точности. Уточнены математические модели, разработан и проанализирован модифицированный алгоритм работы ТИМД для работы на движущемся с переменным ускорением основании. Оценены его погрешности показано, что одним из направлений решения задачи создания малогабаритного ТИМД, предназначенного для работы на подвижном основании, сравнительно недорогого, помехозащищенного, с уровнем точности порядка 1 мгал, с высоким быстродействием (время измерения порядка 0,1 с) является построение ТИМД на базе прецизионных маятниковых акселерометров. ТИМД с такими характеристиками может найти применение для решения задач навигации, геодезии, геологии и др...

В результате проведенных работ были предложены общая конструктивная схема, базовые алгоритмы работы и упрощенная математическая модель датчика, проведен имитационное моделирование в условиях переменного основания с использованием МА с металлическим чувствительным элементом, разработанным в 1980-х годах. Получены предварительные результаты, показавшие потенциальную возможность построения ТИМД средней точности. При этом не рассмотренными остались как теоретические, так и практические вопросы, связанные с возможностью реализации ТИМД на базе современных высокоточных МА, как правило, конструктивно включающих блоки аналоговой интегральной электроники и обладающих чувствительными элементами, выполненными с использованием высокостабильных конструкционных материалов – кварца, кремния и др., включая вопросы исследования специфики и инструментальных факторов построения ТИМД, анализа метрологических возможностей, ограничивающих область применения ТИМД при решении гравиметрических задач.

Итак, целью статья является разработка способа построения и алгоритмов работы ТИМД с погрешностью измерения не более единиц мГал, для работы в условиях движений основания.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Канарейкин А.И., Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.124.5>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Kanareikin A.I., Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze, Moscow, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.124.5>

Список литературы / References

1. Афонин А.А. Об одном подходе к компенсации трехкомпонентного модуляционного динамического гравиметра / А.А. Афонин, А.И. Черноморский // *Авиакосмическое приборостроение*. — № 11. — 2004.
2. Афонин А.А. Анализ модифицированного алгоритма работы модуляционного динамического гравиметра в условиях переменных ускорений основания / А.А. Афонин, А.С. Кузнецов // *Авиакосмическое приборостроение*. — № 6. — 2007
3. Пупков К.А. Интеллектуальные системы / К.А. Пупков, В.Г. Коньков. — Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. — 348 с.
4. Афонин А.А. Разработка и исследование малогабаритной, трехкомпонентной, информационно-избыточной гравиметрической системы / А.А. Афонин, А.Б. Капуцов // *Будущее авиации и космонавтики. Сборник статей*. — М.: Изд-во МАИ, 2001.
5. Афонин А.А. Исследование возможности построения модуляционного динамического гравиметра / А.А. Афонин, А.И. Черноморский // *Авиакосмическое приборостроение*. — №1. — М., 2002.
6. Веселов К.Е. Гравиметрическая съемка / К.Е. Веселов. — М.: Недра, 1986.
7. Голован А.А. А. С. N1396794 (СССР). Устройство для измерения ускорения силы тяжести / А.А. Голован. — Оpubл. 15.01.89.
8. Грушинский Н.П. Основы гравиметрии / Н.П. Грушинский. — М.: Наука, 1983.
9. Дементьев В.Е. Современная геодезическая техника и ее применение / В.Е. Дементьев. — Изд. 2-е. — М.: Академический проект, 2008.
10. Закатов П.С. Курс высшей геодезии / П.С. Закатов // *Недра*. — М.: 1976.
11. Захаров С.И. Оптимизация параметров динамического гравиметра / С.И. Захаров, Г.П. Сачков, А.А. Афонин // *Вестник Московского авиационного института*. — т. 4. — N2. — 1997.
12. Alexander M. Sulfur Exploration with Core-hole and Surface Gravity / M. Alexander, K. O. Heintz; in R. I. Gibson and P. S. Millegan, eds. // *Geologic Applications Gravity and Magnetism: Case histories: SEG Geophysical Reference Series 8 and American Association of Petroleum Geologists*. — AAPG Studies in Geology. — 43. — 1998. — 113–119.
13. Brown J. M. Preliminary Absolute Gravity Survey Results from Water Injection Monitoring Program at Prudhoe Bay / Brown J. M., F. J. Kloppe, D. van Westrum [et al.] // *72nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*. — 2002. — 791–793.

14. Brown J.M. Miniaturized Gravimeter May Greatly Improve Measurements / J.M. Brown, T.M. Niebauer, B. Richter [et al.] // EOS, Transactions of the American Geophysical Union. — 1999. — URL: <http://www.agu.org/eos/elec/99144e.html> (accessed: 27.02.2024).
15. Chapin D.A. Gravity Measurements on the Moon / D.A. Chapin // The Leading Edge. — 19. — 2000. — 88–90.
16. Talwani M. The Apollo 17 Gravity Measurements on the Moon / M. Talwani // The Leading Edge. — 22. — 2003. — 786–789.
17. Torge W. Gravimetry: Walter de Gruyter / W. Torge. — 1989
18. Баграмянц В.О. Особенности новой технологии высокоточной гравиметрической съемки комплексом "Флагман" / В.О. Баграмянц, Н.В. Дробышев, Ю.К. Рябиков [и др.] // Междунар. конф. "Мор. и аэрогравиметрия – 94", [Санкт-Петербург, 1994]: Тез. докл. — СПб, 1994.
19. Волнянский В.Н. Гравиметр для измерения силы тяжести с движущихся носителей / В.Н. Волнянский, В.Н. Ильин, В.П. Никитин [и др.]; ЦНИИ "Дельфин" // Пат. 2056643 Россия. N93034117/25; Заявл. 09.07.93; Опубл. 20.03.96 Бюл. N8; НКИ 6 G 01 V 7/02.
20. Ильин В.Н. Малогабаритный автоматизированный гравиметрический комплекс МАГК-02 (результаты разработки и стендовых испытаний) / В.Н. Ильин, В.П. Никитин, В.Н. Волнянский // Междунар. конф. "Мор. и аэрогравиметрия – 94", [Санкт-Петербург, 1994]: Тез. докл. — СПб, 1994.
21. Brozena Joha M. CASERTZ 91-92: Kinematic GPS, Airborne Gravity and Surface Topography / Brozena Joha M. // Abstr. Spring Meet., Baltimore, Md., May 23-28, 1994. — Eos. 1994. 75, N16.
22. Harnison J.C. The LCT airborne gravity system. Int. Union Geod. and Geophys / J.C. Harnison, J.D. MacQueen // 21st Gen. Assembly, Boulder, Colo, July 2-14, 1995: Abstr. Week Eh Geophys. and Environ. — [Boulder, Colo], 1995.
23. Airborne Gravity Field Surveying for Oceanography, Geology and Geodesy – the experiences from AGMASCO // Conference: IAG Symposium // At: In: K.-P. Schwarz (Ed). Geodesy Beyond 2000. — URL: https://www.researchgate.net/publication/273137455_Airborne_gravity_field_surveying_for_oceanography_geology_and_geodesy_the_experiences_from_AGMASCO (accessed: 27.02.2024)

Список литературы на английском языке / References in English

1. Afonin A.A. Ob odnom podhode k kompensacii trekhkomponentnogo modulyacionnogo dinamicheskogo gravimetra [On One Approach to Compensation of a Three-component Modulating Dynamic Gravimeter] / A.A. Afonin, A.I. Chernomorskij // Aviakosmicheskoe priborostroenie [Aerospace Instrumentation]. — № 11. — 2004 [in Russian].
2. Afonin A.A. Analiz modifitsirovannogo algoritma raboty modulyacionnogo dinamicheskogo gravimetra v usloviyah peremennykh uskorenij osnovaniya [Analysis of a Modified Algorithm for the Operation of a Modulating Dynamic Gravimeter in the Conditions of Variables Accelerations of the Base] / A.A. Afonin, A.S. Kuznecov // Aviakosmicheskoe priborostroenie [Aerospace Instrumentation]. — № 6. — 2007 [in Russian]
3. Pupkov K.A. Intellektual'nye sistemy [Intelligent Systems] / K.A. Pupkov, V.G. Kon'kov. — MSTU named after N.E. Bauman Publishing House, 2003. — 348 p. [in Russian]
4. Afonin A.A. Razrabotka i issledovanie malogabaritnoj, trekhkomponentnoj, informacionno-izbytochnoj gravimetricheskoy sistemy [Development and Research of a Small-sized, Three-component, Information-redundant Gravimetric System] / A.A. Afonin, A.B. Kapushchov // Budushchee aviatsii i kosmonavtiki. Sbornik statej [The Future of Aviation and Astronautics. Collection of articles]. — M.: MAI Publishing, 2001 [in Russian].
5. Afonin A.A. Issledovanie vozmozhnosti postroeniya modulyacionnogo dinamicheskogo gravimetra [Investigation of the Possibility of Constructing a Modulating Dynamic Gravimeter] / A.A. Afonin, A.I. Chernomorskij // Aviakosmicheskoe priborostroenie [Aerospace Instrumentation]. — №1. — M., 2002 [in Russian].
6. Veselov K.E. Gravimetricheskaya s'emka [Gravimetric with Capacity] / K.E. Veselov. — M.: Nedra, 1986 [in Russian].
7. Golovan A.A. A. S. N1396794 (SSSR). Ustrojstvo dlya izmereniya uskoreniya sily tyazhesti [A device for measuring the acceleration of gravity] / A.A. Golovan. — Publ. 15.01.89 [in Russian].
8. Grushinskij N.P. Osnovy gravimetrii [Fundamentals of Gravimetry] / N.P. Grushinskij. — M.: Nauka, 1983 [in Russian].
9. Dement'ev V.E. Sovremennaya geodezicheskaya tekhnika i ee primenenie [Modern Geodetic Engineering and Its Application] / V.E. Dement'ev. — 2nd ed. — M.: Academic Project, 2008 [in Russian].
10. Zakatov P.S. Kurs vysshej geodezii [The Course of Higher Geodesy] / P.S. Zakatov // Nedra. — M.: 1976 [in Russian].
11. Zaharov S.I. Optimizatsiya parametrov dinamicheskogo gravimetra [Optimization of Dynamic Gravimeter Parameters] / S.I. Zaharov, G.P. Sachkov, A.A. Afonin // Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta [Bulletin of the Moscow Aviation Institute]. — V. 4. — N2. — 1997 [in Russian].
12. Alexander M. Sulfur Exploration with Core-hole and Surface Gravity / M. Alexander, K. O. Heintz; in R. I. Gibson and P. S. Millegan, eds. // Geologic Applications Gravity and Magnetics: Case histories: SEG Geophysical Reference Series 8 and American Association of Petroleum Geologists. — AAPG Studies in Geology. — 43. — 1998. — 113–119.
13. Brown J. M. Preliminary Absolute Gravity Survey Results from Water Injection Monitoring Program at Prudhoe Bay / Brown J. M., F. J. Klopping, D. van Westrum [et al.] // 72nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts. — 2002. — 791–793.
14. Brown J.M. Miniaturized Gravimeter May Greatly Improve Measurements / J.M. Brown, T.M. Niebauer, B. Richter [et al.] // EOS, Transactions of the American Geophysical Union. — 1999. — URL: <http://www.agu.org/eos/elec/99144e.html> (accessed: 27.02.2024).
15. Chapin D.A. Gravity Measurements on the Moon / D.A. Chapin // The Leading Edge. — 19. — 2000. — 88–90.

16. Talwani M. The Apollo 17 Gravity Measurements on the Moon / M. Talwani // *The Leading Edge*. — 22. — 2003. — 786–789.
17. Torge W. Gravimetry: Walter de Gruyter / W. Torge. — 1989
18. Bagramyanc V.O. Osobennosti novoj tekhnologii vysokotochnoj gravimetricheskoj s"emki kompleksom "Flagman" [Features of the New Technology of High-precision Gravimetric Survey with the Flagship complex] / V.O. Bagramyanc, N.V. Drobyshev, YU.K. Ryabikov [et al.] // *Mezhdunar. konf. "Mor. i aerogravimetriya – 94"* [International Conference "The Sea and Aerogravimetry – 94"], [St. Petersburg, 1994]: Sum. of reports. — SPb, 1994 [in Russian].
19. Volnyanskij V.N. Gravimetr dlya izmereniya sily tyazhesti s dvizhushchihsya nositelej [Gravimeter for measuring gravity from moving media] / V.N. Volnyanskij, V.N. Il'in, V.P. Nikitin [et al.]; CNII "Del'fin" // Pat. 2056643 Russia. N93034117/25; App. 09.07.93; Publ. 20.03.96 Byul. N8; NKI 6 G 01 V 7/02 [in Russian].
20. Il'in V.N. Malogabaritnyj avtomatizirovannyj gravimetricheskij kompleks MAGK-02 (rezul'taty razrabotki i stendovyh ispytaniij) [Small-sized automated gravimetric complex MAG-02 (results of the development and bench tests)] / V.N. Il'in, V.P. Nikitin, V.N. Volnyanskij // *Mezhdunar. konf. "Mor. i aerogravimetriya – 94"* [International Conference "The Sea and Aerogravimetry – 94"], [St. Petersburg, 1994]: Sum. of reports. — SPb, 1994 [in Russian].
21. Brozena Joha M. CASERTZ 91-92: Kinematic GPS, Airborne Gravity and Surface Topography / Brozena Joha M. // *Abstr. Spring Meet., Baltimore, Md., May 23-28, 1994*. — *Eos*. 1994. 75, N16.
22. Harnison J.C. The LCT airborne gravity system. *Int. Union Geod. and Geophys / J.C. Harnison, J.D. MacQueen // 21st Gen. Assembly, Boulder, Colo, July 2-14, 1995: Abstr. Week Eh Geophys. and Environ.* — [Boulder, Colo], 1995.
23. Airborne Gravity Field Surveying for Oceanography, Geology and Geodesy – the experiences from AGMASCO // *Conference: IAG Symposium // At: In: K.-P. Schwarz (Ed). Geodesy Beyond 2000.* — URL: https://www.researchgate.net/publication/273137455_Airborne_gravity_field_surveying_for_oceanography_geology_and_geodesy_the_experiences_from_AGMASCO (accessed: 27.02.2024)