

ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 629.058

В.Б. Никишин, В.С. Шорин, П.Г. Чигирев, С.Ю. Панченко, С.А. Гривенев

ОЦЕНИВАНИЕ И КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ НА ВЫХОДНОЙ СИГНАЛ ГИРОСКОПОВ ИНЕРЦИАЛЬНОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДУЛЯ

Исследуется эффективность оценивания и компенсации акселерометрических составляющих скоростей дрейфа современных микромеханических гироскопов. Предложено 2 способа калибровки коэффициентов влияния линейных ускорений на скорость дрейфа ММГ. По данным калибровки инерциального измерительного модуля ADIS 16364 приведены результаты оценивания этих коэффициентов и компенсации, составляющих дрейфа ММГ.

Акселерометр, микромеханические гироскопы, информационно-измерительные комплексы, калибровка.

V.B. Nikishin, V.S. Shorin, P.G. Chigirev, S.J. Panchenko, S.A. Grivenev

EVALUATION AND COMPENSATION EFFECT LINEAR OUTPUT ACCELERATION GYRO INERTIAL MODULE MICROMECHANICAL

We study the efficiency of estimation and compensation of accelerometer drift velocity components of modern micro-mechanical gyroscopes. Proposed two ways to calibrate the influence coefficients of linear accelerations on the drift velocity of the MMG. According to the calibration of an inertial measurement unit ADIS 16 364 results of estimation of these coefficients and compensation components of the drift of MMG.

Accelerometer, micromechanical gyroscopes, information-measuring systems, calibration.

Применение микромеханических чувствительных элементов (ММЧЭ) позволяет создать информационно-измерительные комплексы, характеризующиеся малыми массой и габаритами, низким потреблением электроэнергии, существенно меньшей стоимостью, чем их традиционные аналоги для определения и регистрации параметров движения подвижных объектов. ММЧЭ нашли широкое применение в таких областях, как авиационная и автомобильная промышленность, робототехника, инклинометрия буровых скважин и профилометрия магистральных трубопроводов. Главной проблемой, препятствующей более эффективному использованию ММЧЭ в качестве основы систем ориентации и навигации, является достаточно высокий уровень инструментальных погрешностей. Вопросам калибровки инер-

циальных датчиков в научных публикациях последнее время уделяется большое внимание [1, 6], т.к. технические параметры чувствительных элементов среднего и низкого классов точности могут заметно изменяться во времени и требуют периодической проверки. Среди погрешностей ММГ следует особо выделить акселерометрические составляющие скорости дрейфа гироскопов (АСДГ). В современных микромеханических гироскопах (ММГ) они, как правило, значительно превышают уровень вариаций скорости дрейфа в запуске. При этом отметим, что при быстром изменении ориентации подвижного объекта за счет АСДГ быстро изменяются и суммарные скорости дрейфа ММГ, что затрудняет оценку и компенсацию нулевых сигналов. Таким образом, исследования достижимой точности оценивания и возможности эффективной компенсации АСДГ в условиях подвижного основания являются актуальной задачей.

Целью данной работы является исследование стабильности коэффициентов влияния линейных ускорений на скорость дрейфа ММГ (G-sensitivity), возможности разделения зависящих и независящих от линейных ускорений составляющих скоростей дрейфа и последующей их компенсации при обработке сигналов ММГ.

В качестве ИИМ рассмотрим микросборку ADIS 16364, содержащую 3-х компонентный ММГ, 3-х компонентный микромеханический акселерометр (ММА).

Описание математических моделей ошибок ММЧЭ

Математическая модель, описывающая показания гироскопов, представляется в виде:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \delta_{\omega_1} & 0 & 0 \\ 0 & 1 + \delta_{\omega_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 + \delta_{\omega_3} \end{bmatrix} \cdot D_{\omega} \cdot \left(\begin{bmatrix} \omega_{x1} \\ \omega_{x2} \\ \omega_{x3} \end{bmatrix} + K \cdot \begin{bmatrix} W_{x1} \\ W_{x2} \\ W_{x3} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} \Delta\omega_1 \\ \Delta\omega_2 \\ \Delta\omega_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{\omega 1} \\ w_{\omega 2} \\ w_{\omega 3} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где δ_{ω_i} – погрешность масштабного коэффициента i -го ММГ $i = (\overline{1,3})$;

$$D_{\omega} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{\omega 1} \cos \beta_{\omega 1} & \sin \beta_{\omega 1} & -\cos \beta_{\omega 1} \sin \alpha_{\omega 1} \\ -\cos \beta_{\omega 2} \sin \alpha_{\omega 2} & \cos \alpha_{\omega 2} \cos \beta_{\omega 2} & \sin \beta_{\omega 2} \\ \sin \beta_{\omega 3} & -\cos \beta_{\omega 3} \sin \alpha_{\omega 3} & \cos \alpha_{\omega 3} \cos \beta_{\omega 3} \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} 0 & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & 0 & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & 0 \end{bmatrix} - \text{матрица, харак-}$$

теризующая положение измерительных осей гироскопов относительно системы координат $Ox_1x_2x_3$, связанной с ПО и матрица коэффициентов G-sensitivity. W_{xi} – проекции вектора кажущегося ускорения ПО (показания i -го ММА, $i = (\overline{1,3})$); $\Delta\omega_i$ – не зависящее от линейных ускорений смещение нуля i -го ММГ ($i = (\overline{1,3})$); $w_{\omega i}$ – шумовая составляющая i -го ММГ.

Приведем основные технические характеристики ММГ, входящих в состав микросборки ADIS 16364:

- G-sensitivity, СКО – $0.05^\circ/\text{c/g}$;
- нестабильность нулевых сигналов в запуске, СКО – $0.007^\circ/\text{c}$;
- нелинейность масштабных коэффициентов, СКО – 0.1% ;
- систематические составляющие нулевых сигналов, не более – $3^\circ/\text{c}$;
- погрешности выставки измерительных осей датчиков относительно объектового трехгранника – 0.5° .

Анализ данных параметров наглядно показывает, что для микросборки ADIS 16364 АСДГ могут 7...15 раз превышать нестабильность нулевых сигналов в запуске.

Калибровка ММГ и анализ результатов

Калибровка ММГ производилась двумя способами:

- кантованием ММЧЭ, установленных на технологический кронштейн (рис 1);
- вращением ММЧЭ на поворотном стенде (рис 2).

Установка для калибровки гироскопов способом кантования включает в себя стол 1 (рис. 1), на котором установлено калибровочное основание 2, выставленное по горизонту с

помощью квадранта 6 с погрешностью не более $\pm 5'$. На калибровочное основание 2 устанавливается кронштейн 3, на котором закреплен ММЧЭ 4 ADIS 16364BMLZ фирмы Analog Devices с погрешностью не более $\pm 5'$. При калибровке способом вращения кронштейн 3 с ММЧЭ закреплялся на платформе поворотной установки 7 (рис. 2).

Методика калибровки базируется на использовании в качестве калибровочного воздействия силы тяжести. В ходе калибровки ММЧЭ изменяет свою ориентацию по отношению к направлению воздействия силы тяжести в результате: 1) кантования технологического кронштейна – последовательных переустановок кронштейна на разные грани; 2) непрерывного вращения технологического кронштейна вокруг горизонтальной оси с помощью поворотной установки.

В первом случае регистрируются в состоянии покоя нулевые сигналы всех ММГ в каждом из установочных значений кронштейна, а во втором случае регистрируются при вращении основания сигналы ММГ с осями чувствительности ортогональными с осью вращения.

Калибровка способом кантования была повторена 6 раз, с полным циклом переустановок на все грани кронштейна. Продолжительность во времени процесса калибровки составила около 4 часов. В табл. 1 и на рис. 3 приведены результаты оценивания коэффициентов G-sensitivity при калибровке способом кантования, на рис. 4 приведены оценки скоростей дрейфов гироскопов до и после калибровки. Проанализировав полученные данные (табл. 1, рис. 3), следует отметить, что доверительный интервал (с вероятностью 95%) для среднего значения ошибок оценивания коэффициентов G-sensitivity ММГ составляет $\pm 0.01^\circ/\text{c/g}$, что в 10...15 раз меньше допустимых значений этих коэффициентов по паспортным данным.

Для калибровки вторым способом кронштейн с ИММ вращался поочередно вокруг каждой из осей в течение 10 мин. с угловой скоростью $\approx 6^\circ/\text{c}$. В табл. 2 приведены результаты оценивания коэффициентов G-sensitivity при калибровке способом вращения.

На рис 4 изображены выходные сигналы гироскопа ω_{x1} и акселерометра W_{x2} при вращении платформы вокруг оси Ox_3 . На рис.5 приведены графики низкочастотных составляющих дрейфа ММГ до и после компенсации АСДГ и сдвига нуля.

По графикам W_{x2} (рис. 4) и 1 (рис. 5) можно наблюдать корреляцию сигналов акселерометра и ММГ до калибровки. По графику 2 (рис. 5) видно, что после калибровки и компенсации АСДГ указанная выше корреляция отсутствует – СКО низкочастотных составляющих уменьшилось в 3 раза (с 0.078 до $0.025^\circ/\text{c}$).

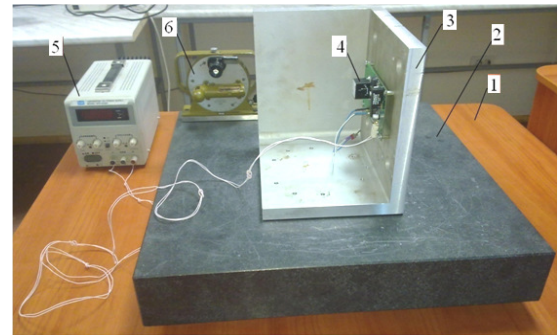


Рис. 1. Калибровочный стенд для калибровки способом кантования

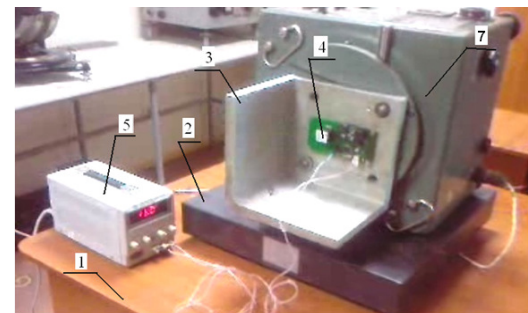


Рис. 2. Калибровочный стенд для калибровки способом вращения

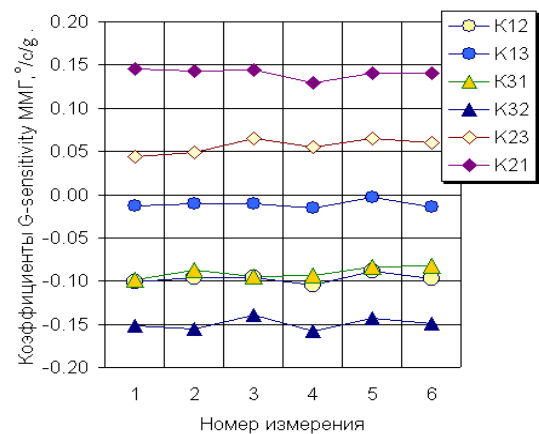


Рис. 3. Оценка коэффициентов G-sensitivity ММГ

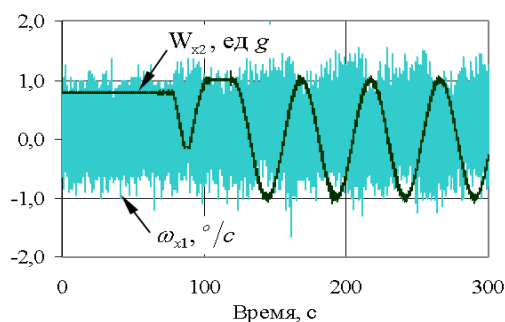


Рис. 4. Сигналы гироскопа ω_{x1} и акселерометра W_{x2} при вращении платформы вокруг оси Ox_3

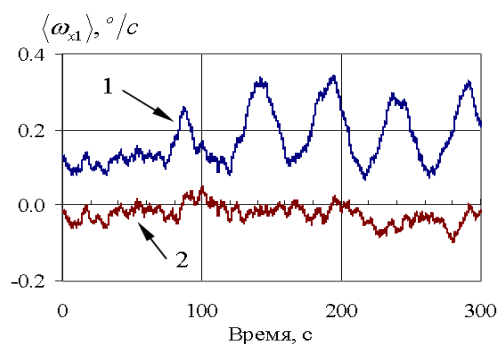


Рис. 5. Низкочастотная составляющая скорости дрейфа ММГ: 1(2) – до (после) компенсации

Таблица 1

Изменение коэффициентов G-sensitivity ММГ от измерения к измерению (способом кантования)

Этапы эксперимента	K_{12}	K_{13}	K_{31}	K_{32}	K_{21}	K_{23}
Последовательное вращение вокруг осей Ox_3, Ox_1, Ox_2	-0.101	-0.013	-0.098	-0.151	0.146	0.044
	-0.096	-0.011	-0.087	-0.155	0.143	0.049
	-0.096	-0.011	-0.095	-0.139	0.144	0.065
Последовательное вращение вокруг осей Ox_3, Ox_1, Ox_2 после часового перерыва	-0.105	-0.015	-0.093	-0.157	0.130	0.055
	-0.088	-0.004	-0.084	-0.143	0.141	0.064
	-0.097	-0.014	-0.083	-0.149	0.140	0.060
Среднее значение	-0.097	-0.011	-0.090	-0.149	0.140	0.056
СКО	0.005	0.004	0.0063	0.007	0.005	0.008

Таблица 2

Коэффициенты G-sensitivity ММГ полученные способом кантования

Вращение вокруг оси	K_{12}	K_{13}	K_{31}	K_{32}	K_{21}	K_{23}
Ox_1	—	—	—	-0.16	—	0.05
Ox_2	—	-0.01	-0.09	—	—	—
Ox_3	-0.11	—	—	—	0.14	—

Кроме этого скомпенсирована и систематическая составляющая скорости дрейфа ММГ, не зависящая от g , с точностью до нестабильности нулевого сигнала в запуске – смещение нуля уменьшилось с 0.185 до 0.012 $^{\circ}/с$.

По результатам проведенных экспериментов, основанных на различных способах определения коэффициентов G-sensitivity ММГ, были получены сопоставимые значения (см. табл. 1 и табл. 2).

Выводы

Экспериментальные исследования стабильности во времени коэффициентов G-sensitivity ММГ показал, что на 4-х часовом временном интервале доверительный интервал (с вероятностью 95%) для среднего значения ошибок оценивания коэффициентов G-sensitivity ММГ составляет $\pm 0.01^\circ/\text{c/g}$, что в 10...15 раз меньше допустимых значений этих коэффициентов по паспортным данным. Оценивание коэффициентов G-sensitivity ММГ позволяет компенсировать до 75% АСГД ММГ, что одновременно улучшает условия оценивания и компенсации низкочастотных составляющих дрейфа ММГ, не зависящих от g.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распопов В.Я. Микромеханические гироскопы и акселерометры в системах управление движением / В.Я. Распопов // Рефераты докладов XXVII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. С. 1-16.
2. Вавилова Н.Б. Калибровка бескарданной инерциальной навигационной системы в сборе на грубых одностепенных стендах / Н.Б. Вавилова, А.А. Голован, Н.А. Парусников, И.Ю. Сазонов // XVII СПб. межд. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». 2010. С. 64-65.
3. Федоров А.Е. Стендовая калибровка инерциального измерительного блока БИНС при ограничениях по углам наклона / А.Е. Федоров, Д.А. Рекунов // XVII СПб. межд. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». 2010. С. 66-74.
4. Емельянец Г.И. Об особенностях калибровки бескарданного инерциального модуля на волоконно-оптических и микромеханических гироскопах в составе интегрированной системы в условиях орбитального полета космического аппарата / Г.И. Емельянец, Л.П. Несенюк, Б.А. Блажнов, А.П. Степанов // Гироскопия и навигация. 2008. № 2. С. 39-53.
5. Олейник Л.Н. Исследование характеристик инерциального модуля на базе микромеханических чувствительных элементов фирмы ANALOG DEVICES / Л.Н. Олейник, А.Н. Ткаченко // Навигация и управление движением : материалы докладов IX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» / науч. редактор д.т.н. О.А. Степанов. : под общ. ред. акад. РАН Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». 2007. С. 319-325.
6. Патент РФ №2269813. Способ калибровки параметров бесплатформенного инерциального модуля // А.И. Синев, Ю.В. Чеботаревский, П.К. Плотников, В.Б. Никишин. 2004.

Никишин Владимир Борисович –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета, руководитель группы «Навигационные технологии» ЗАО «Газприборавтоматикасервис»

Чигирев Петр Григорьевич –

инженер группы «Навигационные технологии» ЗАО «Газприборавтоматикасервис» им. Гагарина Ю.А.

Панченко Сергей Юрьевич –

студент кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.

Шорин Виталий Сергеевич –

ассистент кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.

Гривенев Сергей Анатольевич –

студент кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.

Статья поступила в редакцию 10.07.11, принята к опубликованию 21.11.11