

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКОВ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА

Одной из актуальных задач ракетно-космической техники является определение угловой ориентации в инерциальных навигационных системах космических аппаратов нанокласса. Для решения этой задачи на практике применяются датчики инерциальных измерений (ДИИ) на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) [1]. Данные измерительные устройства широко распространены благодаря их малогабаритности, энергопотреблению и низкой стоимости. Однако, при эксплуатации данных датчиков имеет место относительно низкая точность, обусловленная систематическими и случайными погрешностями. Существуют многие методы лабораторной калибровки, в которых необходимо собрать измерения датчиков при их высокоточном вращательном движении и различных ориентациях [2]. Возможное решение на эту проблему даёт использование робота-манипулятора в качестве вспомогательного поворотного устройства. Данная работа посвящена разработке методики калибровки и испытаний на роботе-манипуляторе для устранения систематических погрешностей МЭМС датчиков угловой скорости и её экспериментальной проверке.

Модель выходных сигналов датчиков угловой скорости

Согласно [3], для датчиков угловой скорости модель выходных сигналов задаётся следующим выражением:

$$U_{\text{ВЫХ}} = S_{\omega} N_{\omega} \omega_{\text{ВХ}} + B_{\omega} + \xi_{\omega}, \quad (1)$$

где $U_{\text{ВЫХ}}$ – вектор проекций выходного сигнала датчиков; S_{ω} – матрица масштабных коэффициентов; N_{ω} – матрица неортогональности осей; $\omega_{\text{ВХ}}$ – вектор проекций истинных значений угловой скорости; B_{ω} – вектор смещения нуля; ξ_{ω} – вектор случайных шумов.

Для определения систематических погрешностей измерений решим обратную задачу. Матрица калибровочных коэффициентов, приведённая в [3], определяется как:

$$M = [S_{\omega} N_{\omega} \quad B_{\omega}] = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xx} N_{xy} & S_{xx} N_{xz} & b_x \\ S_{yy} N_{yx} & S_{yy} & S_{yy} N_{yz} & b_y \\ S_{zz} N_{zx} & S_{zz} N_{zy} & S_{zz} & b_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $b_{\omega i}$ – смещения нуля; S_{ii} – масштабные коэффициенты; $N_{ij} (i \neq j)$ – коэффициенты неортогональности осей; $i, j = x, y, z$.

Матрицу ошибок получим, применив метод наименьших квадратов:

$$M = UA^T(AA^T)^{-1}. \quad (3)$$

где $A = [\omega_{\text{вх}} \ 1]^T$ – расширенный вектор истинной угловой скорости.

Методика калибровки и испытаний

Для проверки пригодности калибровки с помощью робота предложена унифицированная методика испытаний. Целью испытаний является формирование экспериментальных данных для дальнейшей отработки алгоритмом калибровки и оценки калибровочных параметров. В качестве объекта испытаний выступает разработанная бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС). Модель БИНС представлена на рис. 1. Методика позволяет определить систематические погрешности выходных сигналов МЭМС датчиков MPU-9250 и LSM6DS3, установленных в БИНС.

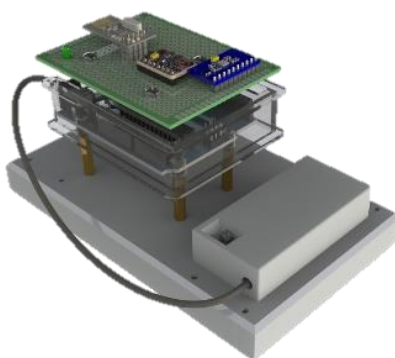


Рис. 1. Модель экспериментальной БИНС

Роботы-манипуляторы могут быть программируемы таким образом, чтобы обеспечивали постоянную опорную скорость вращения с высокой точностью. Для решения задачи калибровки в динамике предлагается использовать схему модифицированного шестипозиционного метода, согласно которой робот вращает БИНС в пространстве при разных угловых скоростях. Схема необходимых вращений метода приведена на рис. 2.

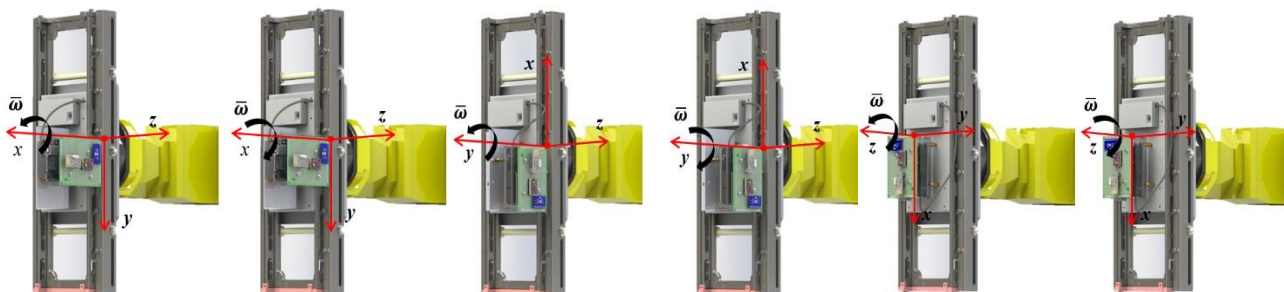


Рис. 2. Схема необходимых вращений шестипозиционного метода

Кинематические характеристики робота дают возможность управлять угловой скоростью конечного звена при её ограничении в процентах от максимального

го значения. В силу этого испытания проводились при пяти различных угловых скоростях для трёх разных ориентаций осей БИНС. В результате методика калибровки датчиков делится на два этапа, в одном из которых проводятся динамические испытания датчиков в динамике, а на другом – обрабатываются полученные результаты. На первом этапе БИНС устанавливается на роботе-манипуляторе и задается безостановочное вращение конечного звена робота по и против часовой стрелки. При включении БИНС, выполняется измерение угловой скорости. Эти измерения, обрабатываются и сравниваются с заданными. На втором этапе проводится обработка результатов испытаний в следующем порядке:

1. Матрица U заполняется выходными данными датчиков при всех необходимых угловых скоростях;
2. Проводится предварительный анализ на предмет отбраковки аномальных измерений;
3. Матрица истинных значений угловой скорости заполняется угловыми скоростями, заданными роботом;
4. По формуле (3) вычисляется матрица калибровочных коэффициентов;
5. Вычисляются откалиброванные данные датчиков с учётом найденных коэффициентов.

Результаты испытаний

Приведены результаты экспериментальной проверки предложенной методики калибровки. Испытания проводились с использованием робота-манипулятора FANUC M-10iA. Экспериментальная установка показана на рис. 3.



Рис. 3. Экспериментальная установка

Оценка эффективности калибровки осуществлялась путём анализа погрешности модуля угловой скорости с учётом компенсации систематических ошибок измерений в соответствии с выбранной математической моделью, как показано на рис. 4.

В табл. 1 приведены средняя квадратичная ошибка модуля угловой скорости и средняя относительная погрешность датчиков до и после компенсации найденных погрешностей измерений. В табл. 2 указаны средняя квадратичная ошибка и средняя относительная погрешность модуля вектора угловой скорости. После калибровочной процедуры погрешность измерений уменьшается в 3–5 раза.

Таблица 1. СКО и средняя относительная погрешность модуля вектора угловой скорости

МЭМС датчик	СКО, градус/с		Средняя относительная погрешность, %	
	До калибровки	После калибровки	До калибровки	После калибровки
MPU-9250	2,5897	0,5493	7,64	1,82
LSM6DS3	3,6591	0,8022	14,90	2,72

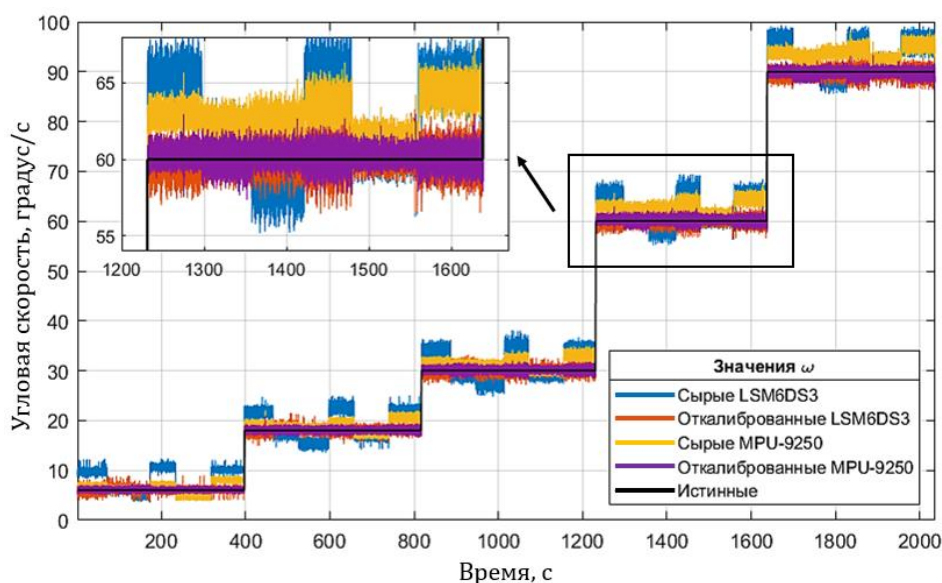


Рис. 4. Модуль вектора угловой скорости

В заключении рассмотрена методика калибровки и испытаний на роботеманипуляторе для определения калибровочных коэффициентов МЭМС датчиков угловой скорости. На основе полученных результатов испытаний методики установлено, что робот-манипулятор является пригодным для решения задачи калибровки в реальных условиях работы научной аппаратуры.

Библиографический список

1. Мелешко В.В., Нестеренко О.И. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы / Мелешко В.В. // Учебное пособие. – Кировоград: ПОЛИМЕД - Сервис, 2011. – 164с.
2. Шаврин В.В., Конаков А.С., Тисленко В.И. Калибровка микроэлектромеханических датчиков ускорений и угловых скоростей в бесплатформенных инерциальных навигационных системах: В.В. Шаврин // Доклады ТУСУРа, 2012.
3. Аврутов В.В. Испытания инерциальных приборов: учебное пособие. -К.: НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», 2016. – 205 с.