

# ПРОГРАММНЫЙ ИМИТАТОР СИГНАЛОВ ЦИФРОВЫХ MEMS ДАТЧИКОВ С ШЕСТЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Холопов И.С.

Рязанский государственный радиотехнический университет, Россия

E-mail: kholopov.i.s@rsreu.ru

**Аннотация** — Рассмотрена реализация программного имитатора сигналов MEMS датчика с шестью степенями свободы (трехосный гироскоп + трехосный акселерометр в одном корпусе) с цифровым интерфейсом.

## 1. Введение

В докладе приводятся математические модели сигналов микроэлектромеханического (MEMS) датчика с шестью степенями свободы, позволяющие имитировать формируемые им массивы данных при известном законе вращения такого сенсора.

## 2. Основная часть

Сигналы с выходов идеализированного трехосного акселерометра представляют собой проекции вектора результирующего ускорения на оси связанной с данным датчиком подвижной системы координат  $Ox_a Y_a Z_a$ . В состоянии покоя MEMS акселерометр выдает проекции вектора ускорения свободного падения  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ . Если правую тройку векторов  $Ox_a Y_a Z_a$  ориентировать осью  $OY_a$  в направлении движения объекта, то проекции вектора  $g$  на оси датчика можно рассчитать с использованием аффинных преобразований (матриц поворота)

$$g_z = -g \cos \psi \cos \theta, \quad g_y = -g \sin \theta, \quad g_x = g \cos \theta \sin \psi,$$

где  $\varphi$ ,  $\psi$  и  $\theta$  — соответственно курс, крен и тангаж (углы Эйлера-Крылова).

Сигналы с выходов идеализированного трехосного MEMS гироскопа выражаются из системы кинематических уравнений [1]

$$w_z = w_x \sin \psi + w_y \cos \psi \cos \theta; \quad w_y = w_y^* + w_z^* \sin \theta;$$

$$w_x = w_x \cos \psi - w_z \cos \theta \sin \psi,$$

где  $(w_x, w_y, w_z)^T$  — вектор угловых скоростей с выходов трехосного MEMS гироскопа в связанной с ним подвижной системе координат  $Ox_g Y_g Z_g$ ,  $(w_x^*, w_y^*, w_z^*)^T$  — угловые скорости вращения в неподвижной системе координат  $OXYZ$ , связанной с объектом.

Для реальных трехосных MEMS датчиков выделяют четыре основных фактора, вносящих погрешность измерений [2]:

- 1) наличие постоянного смещения (*bias*);
- 2) «просачивание» сигнала из одного канала в другой, вызванное неколлинеарностью троек векторов, образующих неподвижную  $OXYZ$  и подвижную (связанную с датчиком) систему координат;
- 3) собственные фликер-шумы;
- 4) температурная нестабильность.

С учетом данных факторов сигнал трехосного MEMS акселерометра в состоянии покоя может быть представлен выражением

$$\mathbf{a} = \mathbf{kT}^{-1} \mathbf{g} + \mathbf{b}(T) + \mathbf{n}_a,$$

где  $\mathbf{a} = [a_x, a_y, a_z]^T$  — вектор показаний акселерометра;  $\mathbf{k} = \text{diag}[k_x, k_y, k_z]$  — матрица масштабных коэффици-

ентов;  $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_{yz} & \alpha_{zy} \\ 0 & 1 & -\alpha_{zx} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  — матрица коррекции, в

которой  $\alpha_{ij}$ ,  $i, j = x, y, z$ , — углы между осями систем координат  $Ox_a Y_a Z_a$  и  $OXYZ$ ;  $\mathbf{g} = [g_x, g_y, g_z]^T$ ;  $\mathbf{b}(T) = [b_x, b_y, b_z]^T$  — зависящий от температуры вектор постоянных смещений;  $\mathbf{n}_a = [n_{ax}, n_{ay}, n_{az}]^T$  — вектор собственных шумов.

Математическая модель сигналов трехосного

MEMS гироскопа (без учета ошибок, вызванных воздействующими на датчик ускорениями) определяется выражением

$$\mathbf{w} = \mathbf{B} + \mathbf{KNw}_0 + \mathbf{n}_g,$$

где  $\mathbf{w} = [w_x, w_y, w_z]^T$ ;  $\mathbf{w}_0 = [w_{0x}, w_{0y}, w_{0z}]^T$  — вектор истинных угловых скоростей вращения;  $\mathbf{B}(T) = [B_x, B_y, B_z]^T$  — зависящий от температуры вектор постоянных смещений;  $\mathbf{K} = \text{diag}[K_x, K_y, K_z]$  — матрица масштабных коэффициентов;

$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} C_{xz}C_{xy} & S_{xz}C_{xy} & S_{xy} \\ S_{yz} & C_{yx}C_{yz} & S_{yx}C_{yz} \\ S_{zy}C_{zx} & S_{zx} & C_{zy}C_{zx} \end{bmatrix}$  — матрица, учитыва-

ющая неколлинеарность осей систем координат  $Ox_g Y_g Z_g$  и  $OXYZ$ ,  $C_{ij} = \cos \gamma_{ij}$ ,  $S_{ij} = \sin \gamma_{ij}$ , где  $\gamma_{ij}$ ,  $i, j = x, y, z$ , — углы между соответствующими осями  $i$  в плоскости  $j$ ;  $\mathbf{n}_g = [n_{gx}, n_{gy}, n_{gz}]^T$  — вектор собственных шумов. Векторы  $\mathbf{n}_g$  и  $\mathbf{n}_a$  при реализации имитатора представляют собой отсчеты собственных шумов гироскопа и акселерометра, записанные с микросхемы интересующего MEMS датчика в режиме покоя.

Приближенно можно считать, что величина смещения зависит от температуры линейно

$$\begin{bmatrix} B(T) \\ b(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B(T_0) \\ b(T_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_T \\ k_T \end{bmatrix} (T - T_0),$$

где  $T_0$  — температура в момент включения MEMS датчика,  $K_T$  и  $k_T$  — температурные коэффициенты для гироскопа и акселерометра соответственно.

Проведенные при различных температурах эксперименты по сравнению эпюр сигналов MEMS датчика с шестью степенями свободы MPU-6050 фирмы InvenSense при его одновременном вращении в трех плоскостях с заданными угловыми скоростями и программного имитатора, формирующего векторы  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{w}$  для аналогичного закона вращения, показали адекватность приведенных математических моделей.

## 3. Заключение

Таким образом, разработан программный имитатор, реализующий математическую модель выходных сигналов цифровых трехосных датчиков ориентации (гироскопов и акселерометров), размещенных в одном корпусе.

## 4. Список литературы

- [1] Челноков Ю.Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения / Ю.Н. Челноков. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 512 с.
- [2] Bakkeng J.K. Calibration of a novel MEMS inertial reference unit / J.K. Bakkeng // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2009. — Vol. 58, No. 6. — P. 1967—1974.

## SOFTWARE SIMULATOR OF A DIGITAL SIX DEGREES FREEDOM MEMS SENSOR

Kholopov I.S.

Ryazan State Radio Engineering University, Russia

**Abstract** — The implementation of the 6-DOF MEMS sensor (three-axis gyroscope & three-axis accelerometer in a single package) signal simulator with a digital interface is considered.