

УДК 004.9

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЛИпсоИДА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ MEMS ДАТЧИКОВ ОРИЕНТАЦИИ В СТОХАСТИЧЕСКОЙ ПОСТАНОВКЕ

Горянина К.И., Лукьянов А.Д.

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, e-mail: gorianina.k@yandex.ru

Развитие систем ориентации навигации, управления различными мобильными объектами, а также различных областей техники привело к увеличению спроса на датчики ориентации. Вследствие чего достоверность показаний акселерометров и магнитометров приобретает все большее значение. Однако традиционные методы калибровки датчиков не всегда обеспечивают необходимую точность для работы. В статье рассмотрен метод калибровки MEMS датчиков ориентации, основанный на вычислении корректировочных коэффициентов с помощью метода наименьших квадратов. Стохастический подход позволяет проводить процедуру калибровки датчиков без точной привязки к координатам. Предложенный метод не использует привязку к конкретной ориентации акселерометра, не требует использования дополнительных датчиков для определения угла поворота, что позволяет использовать этот алгоритм для датчиков, уже смонтированных на оборудовании. В результате погрешность показаний калиброванного датчика составляет менее 1%, что удовлетворяет условиям необходимой точности.

Ключевые слова: MEMS, акселерометр, магнитометр, калибровка, точность, эллипсоид чувствительности, идентификация параметров

METHOD OF IDENTIFICATION OF RESPONSE ELLIPSOID PARAMETERS OF MEMS ORIENTATION SENSORS IN STOCHASTIC SETTING

Goryanina K.I., Lukyanov A.D.

Don State Technical University, Rostov-on-Don, e-mail: gorianina.k@yandex.ru

The development of navigation guidance systems, management of various mobile objects, as well as various fields of technology, has led to an increase in the demand for orientation sensors. As a result, the authenticity of the readings of accelerometers and magnetometers is becoming increasingly important. However, the traditional methods of calibration of sensors do not always provide the necessary accuracy for operation. The method of MEMS calibration of orientation sensors is based on the method of least squares. The stochastic approach allows to carry out the procedure of calibration of sensors without exact binding to coordinates. The proposed method does not use a binding to the specific orientation of the accelerometer, it does not require the use of additional sensors to determine the angle of rotation, which makes it possible to use this algorithm for sensors already mounted on the equipment. As a result, the error of the calibrated sensor is less than 1%, which satisfies the necessary accuracy conditions.

Keywords: MEMS, accelerometer, magnetometer, calibration, accuracy, response ellipsoid, identification of parameters

MEMS датчики ориентации получили широкое распространение благодаря развитию различного рода техники и платформенных инерциальных навигационных систем. При этом вопросы анализа погрешностей, а также калибровки MEMS акселерометров и магнитометров приобретают первостепенное значение [2 – 4, 6, 9].

Целью работы является повышение точности работы систем ориентации мобильных объектов. Достижение цели обеспечивается за счет решения задачи калибровки MEMS акселерометров и магнитометров путем идентификации параметров эллипсоида чувствительности датчиков и определения корректирующих коэффициентов для приведения его к канонической сфере.

Анализ погрешностей измерений

Главным источником погрешностей MEMS акселерометров можно считать

конструкцию самого датчика. В связи с неточным размещением на плате происходит рассогласование показаний. Так же погрешностью является смещение системы координат сенсора относительно системы координат платы и неединичный масштаб осей [3 – 4, 9]. MEMS магнитометры имеют схожие погрешности, основными источниками которых являются:

- наличие магнитного наклона, которое обусловлено особенностью магнитного поля Земли;

- наличие искусственных полей вокруг датчика, создаваемых, например, магнитами двигателей, проводами питания, аккумуляторными батареями и др. Такие погрешности носят название Hard Iron [5, 8, 10];

- искажения, вызванные наличием ферромагнитных материалов рядом с датчиком или Soft Iron [5, 8, 10]. Таким материалом может быть корпус двигателя, проводка, металлические болты крепления.

Soft и Hard Iron оказывают значительное влияние на показания магнитометра. Hard Iron вызывает смещение осей координат облака данных, а Soft Iron, в свою очередь, вносит изменения в масштабность осей координат, а также поворот эллипсоида данных вокруг начала координат. Учитывая схожесть погрешностей, присущих датчикам, процедура калибровки применима как для MEMS акселерометров, так и для магнитометров.

Постановка задачи калибровки

Стохастическая интерпретация процедуры идентификации параметров погрешностей, присущих датчикам, подразумевает концепцию «эллипсоида чувствительности», когда реакция датчика представляется как точка в трехмерном пространстве. В реальном случае из-за наличия погрешностей точки образуют облако данных в виде эллипсоида со сдвинутым центром, который может быть повернут относительно начала координат.

Таким образом, задачей калибровки становится определение коэффициентов в уравнении преобразования эллипсоида в сферу [7]:

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = (M_{xyz})_{3 \times 3} \begin{pmatrix} 1/k_x & 0 & 0 \\ 0 & 1/k_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/k_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_x - a_{x0} \\ r_y - a_{y0} \\ r_z - a_{z0} \end{pmatrix}.$$

Для устранения погрешностей смещения системы координат необходимо центрировать данные. В таком случае калибровка будет иметь вид [1]:

$$\bar{X}_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ia}, \quad X = X_{ia} - \bar{X}_a$$

где X_{ia} – числовые компоненты точек облака данных; \bar{X}_a – среднее компоненты; X – матрица центрированных данных.

Также при калибровке магнитометра необходимо учитывать разницу между географическим и магнитным полюсами, которая зависит от местоположения, в котором проводится измерение. Для устранения этих различий к показаниям датчика необходимо прибавить или вычесть определенный угол, называемый магнитным склонением.

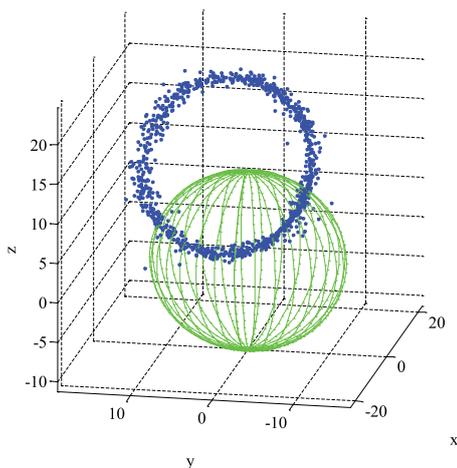
Вектор оценок параметров модели определяется с помощью метода наименьших квадратов (МНК). Он позволяет минимизировать сумму квадратов отклонений экспериментальных точек от эталонных:

$$\vartheta = [X^T * X]^{-1} * (X^T * Y),$$

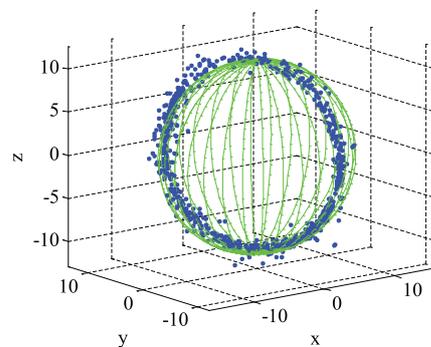
$$X = \begin{bmatrix} x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 \\ x_2^2 & y_2^2 & z_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & y_n^2 & z_n^2 \end{bmatrix},$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}, \quad \vartheta = \begin{bmatrix} 1/a^2 \\ 1/b^2 \\ 1/c^2 \end{bmatrix}$$

где X – матрица объясняющих переменных; Y – вектор экспериментальных результатов; ϑ – вектор оценок параметров.



а



б

Рис. 1. Облако данных на фоне эталонного эллипсоида чувствительности MEMS акселерометра: а – некалиброванного; б – калиброванного

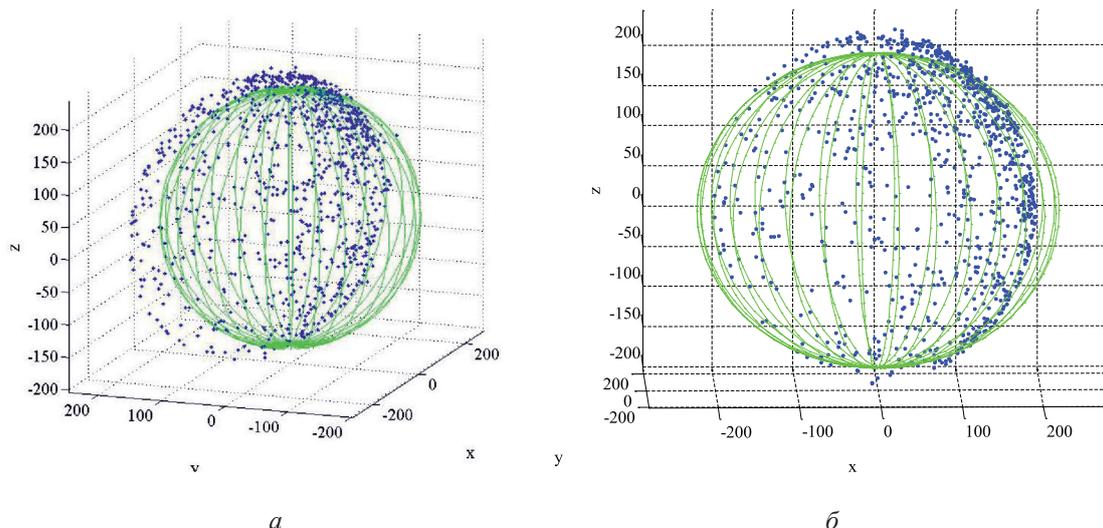


Рис. 2. Облако данных на фоне эталонного эллипсоида чувствительности MEMS магнитометра: а – некалиброванного; б – калиброванного

Так решение задачи калибровки реализует идентификацию эллипсоида чувствительности по облаку точек, что, в отличие от детерминированных методов, позволяет определить не только сдвиг нуля и статистически обоснованно оценить коэффициенты усиления, но и определить ориентацию чувствительных осей.

Результаты экспериментальных измерений

В работе [2] представлены результаты имитационного моделирования на примере акселерометра ADXL345. Метод показал свою работоспособность при обработке облака неполных данных, при этом погрешность составляет порядка 1-2%.

Экспериментальные измерения проводились с помощью датчика MPU-9265. На рис. 1 и 2 представлены данные на фоне эталонного эллипсоида чувствительности акселерометра и магнитометра соответственно. После калибровки погрешность данных составляет менее 1%.

Заключение

Предложенный метод позволяет избавиться от погрешности смещения нуля, а также скомпенсировать неединичный масштаб осей датчиков и погрешность угловой ориентации магнитометра. Основным преимуществом метода вычисления вектора оценок с помощью МНК является возможность производить вычисления без привязки к системе координат. Большее значение это имеет при калибровке магнитометра,

когда можно не учитывать угол наклона и производить калибровку автономно, без гироскопа или акселерометра.

Список литературы

1. Корреляция, ковариация и девиация (часть 3) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habrahabr.ru/post/263907/>. – Дата обращения: 15.02.2017.
2. Лукьянов А.Д. Идентификация параметров преобразующей системы MEMS – акселерометра ADXL-345 методом наименьших квадратов / А.Д. Лукьянов, К.И. Горянина, Д.Т. Фам // Электроника и электротехника. – 2016. – № 2. – С. 38-45.
3. Собоцкий А.В. Калибровка типовых магнитометров на примере HMC5883L // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 7-11 ноября 2016 г. : в 2 т. – Томск, 2016. – Т. 1. – С. 345-346.
4. Холопов И.С. Калибровка цифровых трехосных MEMS акселерометров по шести ортогональным положениям // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2015. – № 2. – С. 61-65.
5. Calibrating an eCompass in the Presence of Hard- and Soft-Iron Interference// Freescale Semiconductor. Application Note, November 2015. – P. 18.
6. Feng W. A Calibration Method of Three-axis Magnetic Sensor Based on Ellipsoid Fitting// Journal of Information & Computational Science, 2013. – P. 1551-1558.
7. Ganssle J. A Designer's Guide to MEMS Sensors [Электронный ресурс]: Digi-Key Electronics. – 2012. – Режим доступа: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/jul/a-designers-guide-to-mems-sensors>. – Дата обращения 25.11.2016.
8. Hard and Soft Iron magnetic compensation explained [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://memsblog.wordpress.com/2011/03/22/hard-and-soft-iron-magnetic-compensation-explained/>
9. Veclak J. Errors of AMR compass and methods of their compensation / J. Veclak, P. Ripka, A. Platil // Sensors and Actuators A: Physical, Czech Republic, – 2006. – P. 53-57.
10. VN-100 Hard and Soft Iron Calibration. Overview and Calibration Method. Application Note. – 2012. – P. 10.