

Метод электронной юстировки MEMS-инклинометра

Д. Е. Проценко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

danilprocenko30032000@gmail.com

Аннотация. Данный доклад посвящен методу электронной юстировки MEMS-инклинометра, используемого для определения угла наклона относительно гравитационного поля земли. Исследование основывается на анализе принципов работы MEMS-инклинометра и методов его юстировки. В ходе исследования предложен и проанализирован алгоритм электронной юстировки. Полученные результаты позволяют оптимизировать процесс юстировки MEMS-инклинометра с целью повышения точности и надежности его измерений в различных приложениях.

Ключевые слова: юстировка, инклинометр, матрицы поворота

I. ВВЕДЕНИЕ

Технологии MEMS (микроэлектромеханические системы) становятся все более популярными и занимают свою нишу в производстве компактного измерительного оборудования. Датчики, построенные на основе MEMS, позволяют объединить в себе как механические части, так и электрические компоненты на одной микросхеме.

Акселерометры, инклинометры, гироскопы, магнитометры, барометрические датчики и другие – все эти датчики могут быть реализованы при помощи технологии MEMS. Одним из таких датчиков, который рассматривается в данной статье, является трехосевой инклинометр на базе акселерометра.

II. MEMS-ИНКЛИНОМЕТР

A. Устройство датчика и принцип работы

Инклинометр – датчик для измерения угла наклона относительно гравитационного поля Земли. Для понимания его работы необходимо рассмотреть структурную схему, примером которой является датчик SCL3300-D01, представленный на рис. 1. Этот датчик состоит из акселерометра и интегральной схемы ASIC, включающей АЦП, цифровой фильтр, интерфейс SPI и другие модули, обеспечивающие функционирование микросхемы.

Акселерометр, в свою очередь, измеряет разность между истинным ускорением и гравитационным ускорением. Наглядная демонстрация работы акселерометра показана на рис. 2. Датчик состоит из конденсаторов, к которым прикреплены чувствительные к ускорению подвесы.

Ускорение вызывает движение подвесов, которое изменяет расстояние между обкладками конденсаторов, вызывая изменение их емкости, что в свою очередь, преобразуется в изменение напряжения. Интегральная схема фиксирует эти изменения при помощи АЦП и

преобразует их в угол наклона вдоль оси, вдоль которой произошло ускорение, в виде кодов. Далее коды от АЦП, прошедшие предварительную обработку и фильтрацию, передаются по интерфейсу SPI на микроконтроллер.

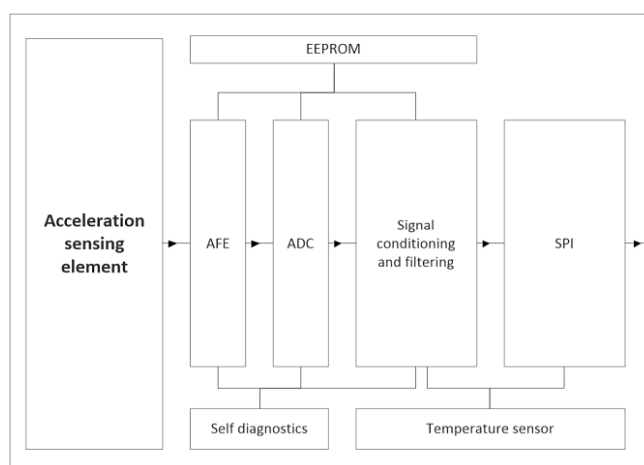


Рис. 1. Блок-схема компонентов SCL3300-D0

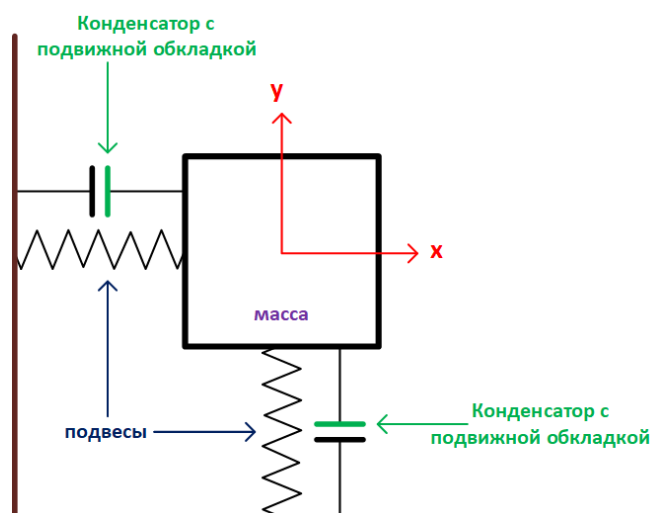


Рис. 2. Принцип работы акселерометра

B. Трудности при измерениях

Так как акселерометр — инерциальный датчик, то измерения необходимо проводить в неподвижном состоянии, так как любое ускорение будет вызывать ошибки измерений. Также на измерение датчика влияют различные вибрации.

Одной из ключевых проблем в измерениях при помощи таких датчиков является несогласованность осей измерения или ошибка установки датчика. На

рисунках ниже изображены различные варианты положения датчика относительно системы координат прибора, на который он установлен. Синим цветом обозначены оси локальной системы координат датчика. Серым цветом показана система координат прибора, в который установлен датчик. На рис. 3 показано правильное расположение датчика, где оси измерения датчика совпадают с осями измерения прибора. На рис. 4 и 5 датчик наклонен на определенные углы относительно системы координат прибора. Такой наклон будет вызывать реакцию акселерометра, вследствие чего появятся ошибки измерений.

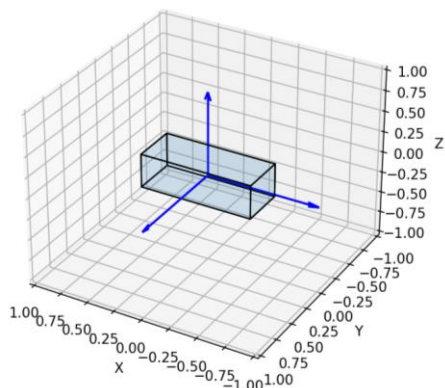


Рис. 3. Правильное положение датчика

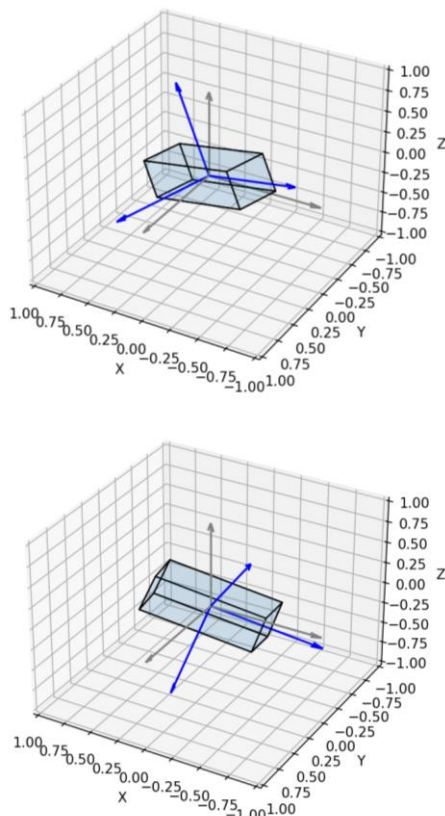


Рис. 4. Наклон относительно локальной системы координат

Корректные данные мы можем получить только когда оси измерений датчика, совпадают с осями измерения прибора, т. е. необходимо максимально ровно выставлять датчик на приборе.

В промышленности одним из методов решения данной проблемы является ручная юстировка датчика. Каждый датчик аккуратно выставляется на приборе вручную, особенно при мелкосерийном производстве. Результат показаний проверяется на эталонном стенде. Такая юстировка затрачивает большое количество времени и не застрахована от человеческого фактора, поэтому был разработан метод программной юстировки, благодаря которому выставление датчика можно свести к двум тривиальным действиям.

III. МЕТОД ЭЛЕКТРОННОЙ ЮСТИРОВКИ

A. Математический аппарат

Прежде чем перейти к алгоритму необходимо рассмотреть математический аппарат, который будет в нем использоваться. Постановка задачи сводится к поиску углов вращения векторов в трехмерном пространстве. Данную задачу можно решать как при помощи кватернионов, так и при помощи матриц поворота, что на первый взгляд проще.

Матрицы поворота позволяют совершить собственное ортогональное преобразование в евклидовом пространстве. При умножении вектора столбца на матрицу поворота координаты вектора преобразуются в соответствии с поворотом самого вектора, при этом длина вектора сохраняется.

Для того чтобы использовать матрицы поворота, необходимо заранее определиться с последовательностью вращений и их системой координат. Так, для данной задачи была выбрана последовательность поочередных вращений сначала вокруг оси x , далее вокруг оси y , затем вокруг оси z . Системы координат следующие: вокруг оси x – правая, y – левая, z – левая.

Выбор обуславливается удобством использования, так как системы координат будут противоположны системе координат датчика, что позволит удобно определять знак вращения. Например, если датчик показывает угол наклона 18 градусов, то матрица по соответствующей оси будет вращать датчик на 18 градусов в противоположную сторону, что позволит не уделять внимания знакам.

Минусом данного метода является критичность к выбору системы координат, так в данной статье формулы будут выводиться для системы координат, описанной выше, но если мы возьмем другой датчик с другой системой координат, то все формулы придется пересчитывать заново. Отличие разных систем координат – знаки в выражениях.

В дальнейшем вся математика будет сводиться к перемножению данных матриц.

Матрица поворота вокруг оси x на угол φ :

$$M_x(\varphi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Матрица поворота вокруг оси y на угол θ :

$$M_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Матрица поворота вокруг оси z на угол ψ :

$$M_z(\psi) = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Искомый поворот равняется последовательности трех поворотов, что в свою очередь равняется произведению трех матриц $M_z(\psi) \cdot M_y(\theta) \cdot M_x(\varphi)$. Вычислив данную матрицу, можно занести ее коэффициенты в энергонезависимую память и каждый раз умножать полученные значения датчика на данную матрицу, тем самым виртуально выровняв датчик относительно прибора.

В. Расчет углов вращения

Представим вектор текущих показаний датчика в виде координат вектора-столбца по соответствующим

осям $\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$, где x, y, z равны соотношению (4).

$$x = \sin(\alpha) \quad y = \sin(\beta) \quad z = \sin(\gamma) \quad (4)$$

Соответственно α, β, γ – углы наклона, которые показывает датчик по соответствующим осям. Нетрудно заметить, что все значения вектора будут нормированы к единице, исходя из этого, можно сформулировать задачу следующим образом. Необходимо найти такие углы вращения, чтобы при умножении вектора показаний датчика на матрицы поворота этих углов, в «положении

ноль» значения вектора равнялись $\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$. Под

«положением ноль» имеется в виду выровненная относительно горизонта эталонная поверхность, на которой будет производиться юстировка. Найдя такие углы и умножив соответствующие матрицы вращения на вектор показаний датчика, мы сможем получить виртуально выровненный датчик, таким образом, достигнув соосности осей датчика и осей прибора.

Исходя из вышесказанного, нетрудно заметить, что показания датчика по оси x равняются углу поворота вокруг оси y , соответственно показания датчика вдоль оси y равняются повороту вокруг оси x , что выражается в следующих соотношениях: $\varphi = \alpha$; $\theta = \beta$.

Основной проблемой остается то, что инклинометр не имеет информации об угле поворота вокруг оси z , при этом мы можем наблюдать реакцию датчика на этот поворот при повороте вокруг других осей. Также, если датчик стоит в нулевом положении, то по осям x и y , датчик будет показывать нули, за исключением шума. Отсюда напрашивается необходимость поднимать прибор вместе с датчиком на определенный угол вокруг оси калибровки, в данном случае вокруг оси y . Вследствие чего в каналах x, y, z появится реакция на

наклон, включающая в себя ошибку поворота датчика на угол ψ . На рис. 5 показан наклон прибора вокруг оси y с присутствующим поворотом датчика вокруг оси z .

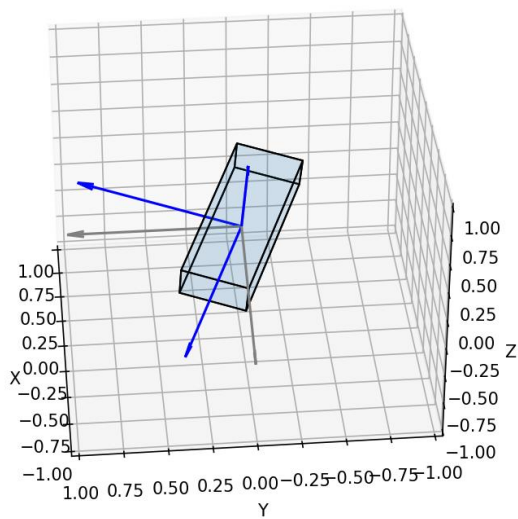
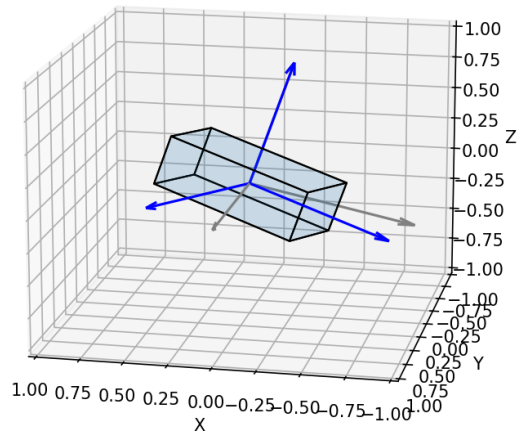


Рис. 5. Наклон прибора вокруг оси y , включая наклон датчика вокруг оси z

В общем виде данный наклон можно представить в виде произведения матриц поворотов прибора, на матрицу поворота вокруг оси z датчика.

Запишем это произведение.

$$\begin{pmatrix} \cos(\psi') & \sin(\psi') & 0 \\ -\sin(\psi') & \cos(\psi') & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\theta') & 0 & -\sin(\theta') \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta') & 0 & \cos(\theta') \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi') & -\sin(\varphi') \\ 0 & \sin(\varphi') & \cos(\varphi') \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

где ψ', θ', φ' – поворот прибора, на который установлен датчик вокруг осей x, y, z . После перемножения данных матриц нас будут интересовать значения в третьем ряду получившейся матрицы. Запишем их в систему уравнений, сопоставив их со значениями показаний датчика.

$$\begin{cases} \sin(\alpha) = \sin(\theta') \cos(\psi) - \sin(\varphi') \cos(\theta') \sin(\psi) \\ \sin(\beta) = \sin(\theta') \sin(\psi) + \sin(\varphi') \cos(\theta') \cos(\psi) \\ \sin(\gamma) = \cos(\theta') \cos(\varphi') \end{cases} \quad (6)$$

Из данной системы уравнений не просто вывести угол ψ , но ее можно упростить, зная, что поверхность, на которой стоит прибор метрологически выровнена по

соответствующим осям, значит угол φ можно приравнять к нулю. Если угол $\varphi = 0$, то система уравнений (6) упрощается до:

$$\begin{cases} \sin(\alpha) = \sin(\theta') \cos(\psi) \\ \sin(\beta) = \sin(\theta') \sin(\psi) \\ \sin(\gamma) = \cos(\theta') \end{cases} \quad (7)$$

Если возвести оба первых уравнения в квадрат и сложить, то можно прийти к следующему соотношению:

$$\operatorname{ctg}(\psi) = \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)}. \quad (8)$$

Так как при калибровке подъем будет происходить вдоль оси x , то $\sin(\alpha) > \sin(\beta)$, тогда выражение (8) логично преобразовать к форме тангенса:

$$\operatorname{tg}(\psi) = \frac{\sin(\beta)}{\sin(\alpha)},$$

тогда искомый угол можно найти как

$$\psi = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\sin(\beta)}{\sin(\alpha)}\right). \quad (9)$$

Данная формула дает большую погрешность при определении угла и не дает однозначности. Угол ψ можно рассчитать, воспользовавшись третьим уравнением из (7). Тогда $\sin(\theta')$ можно заменить следующим соотношением:

$$\sin(\theta') = \sqrt{1 - \sin^2(\gamma)}. \quad (10)$$

Подставив выражение (10) во второе уравнение, получим искомый угол ψ

$$\psi = \operatorname{arcsin}\left(\frac{\sin(\beta)}{\sqrt{1 - \sin^2(\gamma)}}\right). \quad (11)$$

При программировании важно не ошибиться со знаком получаемого значения. Для выражения (11) угол ψ необходимо умножить на знак α при подстановке в выражение (3).

IV. АЛГОРИТМ ДЛЯ ПРОГРАММНОЙ ЮСТИРОВКИ

Далее будет описан алгоритм действий для программной юстировки, на основе вышесказанного.

Необходимо выставить прибор на ровную поверхность или калибровочный стенд, датчик предварительно должен быть закреплен на приборе. Дополнительное выравнивание датчика не требуется. Нажать на кнопку микроконтроллера, вычислив матрицы $M_x(\varphi)$, $M_y(\theta)$ и соответствующие им углы. Далее необходимо наклонить прибор вдоль оси x на небольшой угол, нажать на кнопку еще раз и вычислить матрицу $M_z(\psi)$ и соответствующий угол разворота, например, по формуле (11). Все показания датчика необходимо перемножать на вычисленные матрицы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Jiaxin Zhu, Weifeng Wang, Shiping Huang, Wei Ding. An Improved Calibration Technique for MEMS Accelerometer-Based Inclinometers.
- [2] Murata Electronics Oy. SCL3300-D01. Doc.No. 4921. Rev. 2.
- [3] Analog_design. МЭМСы. Как устроены современные датчики? //habr.com:Хабр.URL:<https://habr.com/ru/companies/milandr/articles/532662>