

Алгоритмы обработки данных с МЭМС-датчиков в ИС

Датчики инерциальных навигационных систем

Соловьев А. В.

ПетрГУ – КИИСиФЭ

(Rev. 2016 07 09)

Принципы построения систем навигации и ориентации

Датчики:



Инерциальные: барометр, акселерометр, гироскоп, магнитометр,...



GPS/ЛПС: GPS, ГЛОНАСС, UWB, WiFi, BT,...



Системы компьютерного зрения, дальномеры,...

Контекст:



Карты, модели движения,...



Цифровая обработка сигналов

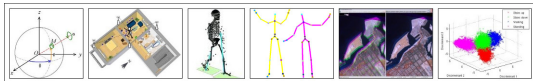
Ограничения



Алгоритмы слияния данных (Data Fusion)

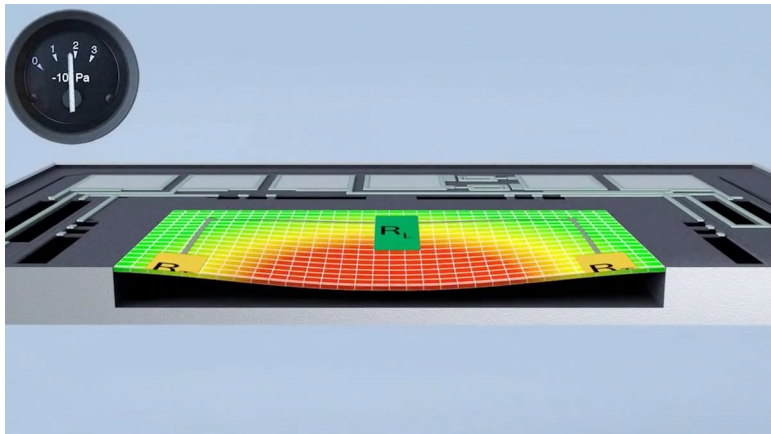
Результат:

ориентация, позиционирование, анализ движения, классификация, распознавание шаблонов (жестов),...



Принципы работы датчиков ИНС

Принципы работы МЭМС-барометра

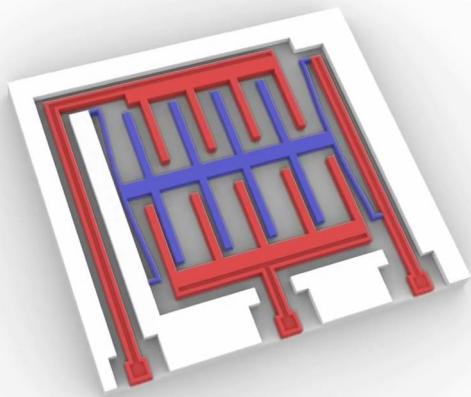


https://www.youtube.com/watch?v=zXIEqeT_FC8

Основные характеристики МЭМС-барометров

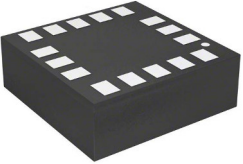
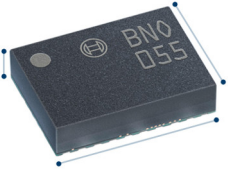
	LPS331AP	BMP280
Производитель	STMicroelectronics	Bosch
		
Ед. измерения: гектопаскали или миллибары		
Размеры, мм	$3 \times 3 \times 1$	$2 \times 2.5 \times 0.95$
Диапазон, гПа	260–1260	300...1100
Разрешение 1 LSB, гПа	$2.4 \cdot 10^{-4}$	0.0016
Точность (средняя), гПа	± 0.1	± 0.12
Разрядность, бит	24	16–20
Частота измерений, Гц	≤ 25	≤ 157
Напряжение питания, В	1.7–3.6	1.7–3.6
Ток потребления, мкА	5.5–30	2.8–1000
Рабочий диапазон, °C	-40 ... +85	-40 ... +85

Принципы работы МЭМС-акселерометра



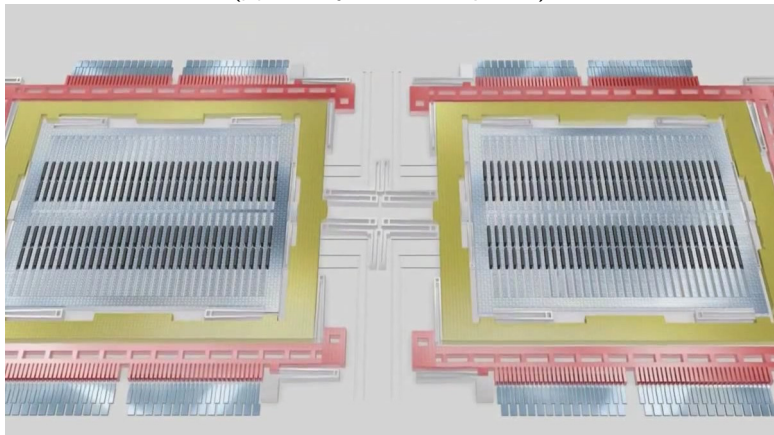
<https://www.youtube.com/watch?v=9eSnxebfuxg>

Основные характеристики МЭМС-акселерометров

	ADXL344	BMO055
Производитель	Analog Devices	Bosch
Ед. измерения: м/с ² или mg		
Размеры, мм	3 × 3 × 0.95	3.8 × 5.2 × 1.13
Диапазон, g	±16	±16
Разрешение 1 LSB, g	0.004	0.001
Разрядность, бит	10–13	14
Частота измерений, Гц	≤3200	≤100
Напряжение питания, В	1.7–2.75	2.4–3.6
Ток потребления, мкА	0.2–140	330–12300
Рабочий диапазон, °C	–40 ... +85	–40 ... +85


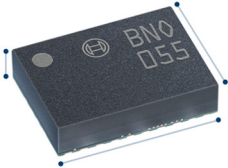
Принципы работы МЭМС-гироскопа

(Датчик угловой скорости)



<https://www.youtube.com/watch?v=XsjvaYAFN1M>

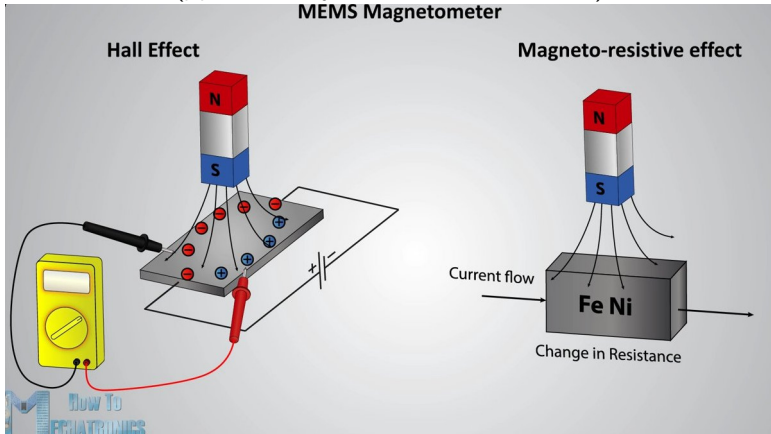
Основные характеристики МЭМС-гироскопов

	I3G4250D	BMO055
Производитель	STMicroelectronics	Bosch
		
Ед. измерения: °/с или рад/с		
Размеры, мм	4 × 4 × 1.1	3.8 × 5.2 × 1.13
Диапазон, °/с	±2000	±2000
Разрешение 1 LSB, °/с	0.07	0.06
Разрядность, бит	16	16
Частота измерений, Гц	≤840	≤100
Напряжение питания, В	2.4–3.6	2.4–3.6
Ток потребления, мкА	5–6100	330–12300
Рабочий диапазон, °С	–40 ... +85	–40 ... +85

Принципы работы магнитометров

(Датчик индукции магнитного поля)

MEMS Magnetometer



<https://https://www.youtube.com/watch?v=eqZgxr6eRjo>

Основные характеристики магнитометров

	AK09916C	BMO055
Производитель	AKM	Bosch
Ед. измерения: мкТл или Гс		
Размеры, мм	1.2 × 0.8 × 0.5	3.8 × 5.2 × 1.13
Диапазон, мкТл	±5000	±1300 ¹ /±2500 ²
Разрешение 1 LSB, мкТл	0.15	0.3
Разрядность, бит	16	13 ¹ /15 ²
Частота измерений, Гц	≤100	≤50
Напряжение питания, В	1.65–1.95	2.4–3.6
Ток потребления, мкА	1–1100	330–12300
Рабочий диапазон, °С	–30 ... +85	–40 ... +85

¹ по осям x и y

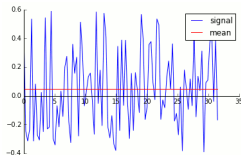
² по оси z

Погрешности инерциальных датчиков

Систематические погрешности (1)

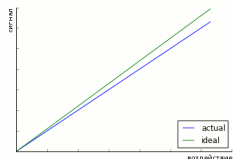
Смещение нуля (Zero offset)

- ▶ Воздействие отсутствует, но сигнал ненулевой
- ▶ Для акселерометра: $\sim 80 \text{ mg}$
- ▶ Для гироскопа: $\sim 1^\circ/\text{с}$



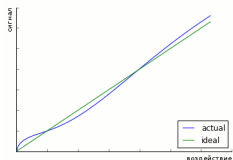
Погрешность чувствительности (Sensitivity tolerance)

- ▶ Действительные значения градуировочных коэффициентов отличаются от паспортных
- ▶ Для акселерометра/гироскопа: 0.5–5 %



Нелинейность (Non-linearity)

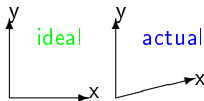
- ▶ Отклонение соотношения воздействие-сигнал от линейной модели
- ▶ Для акселерометра: 0.1–2 %
- ▶ Для гироскопа: 0.01–0.2 %



Систематические погрешности (2)

Неортогональность осей

- ▶ Также межосевая чувствительность
- ▶ Для акселерометра: 1–2 %
- ▶ Для гироскопа: 1–2 %



Погрешность выравнивания

- ▶ Оси датчиков не коллинеарны плоскостям корпуса
- ▶ Для акселерометра: ~ 0.5 %
- ▶ Для гироскопа: ~ 0.5 %



Взаимовлияние воздействий

- ▶ Ускорение влияет на показания гироскопа: $0.05\text{--}0.1$ °/с на 1 g.
- ▶ Влияние вибраций на показания гироскопа
- ▶ ...

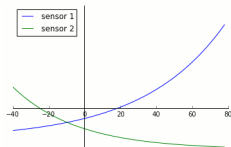
Систематические погрешности (3)

Систематические погрешности датчиков могут зависеть от окружающей среды:

- ▶ от температуры,
- ▶ от стабильности напряжения питания,
- ▶ от влажности, магнитных полей, радиационного излучения,...

Например, от температуры может зависеть:

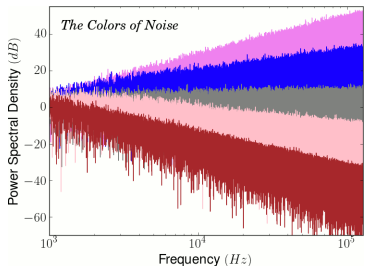
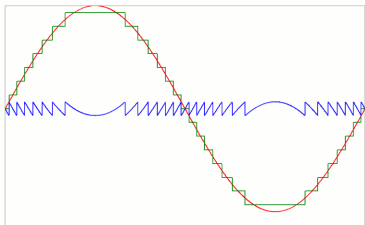
- ▶ смещение нуля
 - ▶ для акселерометра: 0.1–1 mg на 1°C
 - ▶ для гироскопа: 0.01–0.05 °/с на 1°C
- ▶ чувствительность
 - ▶ для акселерометра: 0.005–0.01 % на 1°C
 - ▶ для гироскопа: 0.005–0.01 % на 1°C
- ▶ и др.



Причём для каждого датчика такая зависимость может быть уникальной (нет общей модели для датчиков данного вида).

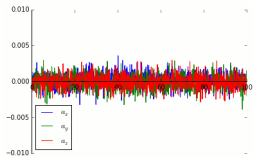
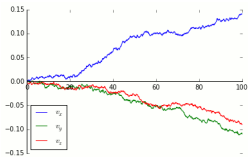
Случайные погрешности (шумы)

- ▶ Электронные шумы
 - ▶ тепловой шум (равновесный шум, обусловленный тепловым движением носителей заряда в проводнике);
 - ▶ фликкер-шум, или «розовый» шум (неоднородности в проводящей среде, генерация и рекомбинация носителей заряда); ...
- ▶ Шум квантования
- ▶ и др.

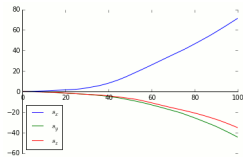


Дрифт ИНС

В неподвижном состоянии акселерометр ИНС генерирует сигнал, включающий погрешности (смещение нуля, нелинейность и др.) и шумы. Двойное интегрирование по ускорению для расчёта координат приводит к существенному росту значений координат с течением времени:


 $a(t)$


$$v(t) = \int_0^t a(\tau) d\tau$$



$$s(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau$$

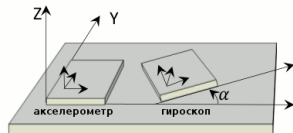
На практике, если не предпринимать действий по обработке данных, такой дрейф может составлять до 100 км за час.

Калибровка инерциальных датчиков

Калибровка инерциальных датчиков

При помощи процедуры калибровки можно учесть некоторые систематические погрешности инерциальных датчиков: смещение нуля, погрешность чувствительности, погрешности выравнивания и неортогональности осей, ...

Кроме того, огрехи сборки ИНС могут тоже сказываться как систематическая погрешность (нарушение выравнивания датчиков при размещении в корпусе ИНС)



Возможные подходы к калибровке:

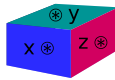
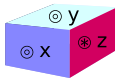
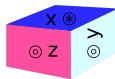
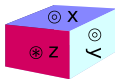
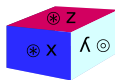
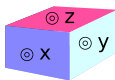
- ▶ на основе эталонных измерений
- ▶ самокалибровка ИНС на основе показаний комплементарных датчиков

Калибровка акселерометра без спец. оборудования (1)

Без специального оборудования можно выполнить калибровку только основных источников ошибок: смещения нуля, погрешностей выравнивания и чувствительности (градуировочных коэфф-тов). Акселерометр можно откалибровать по показаниям g , размещая на столе в шести положениях (по два для каждой оси).

Таблица: План калибровочных замеров

Позиция	a_x	a_y	a_z
z верх	0	0	$+1g$
z низ	0	0	$-1g$
y верх	0	$+1g$	0
y низ	0	$-1g$	0
x верх	$+1g$	0	0
x низ	$-1g$	0	0



Калибровка акселерометра без спец. оборудования (2)

Соотношение между «сырыми» замерами акселерометра a_x , a_y , a_z и нормализованными значениями \tilde{a}_x , \tilde{a}_y , \tilde{a}_z :

$$\begin{bmatrix} \tilde{a}_x \\ \tilde{a}_y \\ \tilde{a}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & 1 & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1/S_x & 0 & 0 \\ 0 & 1/S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/S_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x - Z_x \\ a_y - Z_y \\ a_z - Z_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $[M_{ij}]$ – матрица 3×3 коэффициентов углового рассогласования (misalignment) между осями акселерометра и корпусом устройства;
 S_x , S_y , S_z – градуировочные коэффициенты (чувствительность); и
 Z_x , Z_y , Z_z – смещение нуля.

Это выражение можно переписать следующим образом:

$$[\tilde{a}_x \quad \tilde{a}_y \quad \tilde{a}_z] = [a_x \quad a_y \quad a_z \quad 1] \cdot [C_{ij}]_{4 \times 3}, \quad \text{или} \quad \tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{C} \quad (2)$$

где $[C_{ij}]$ – матрица 4×3 искоемых калибровочных коэффициентов.

Калибровка акселерометра без спец. оборудования (3)

Коэффициенты модели (2) могут быть получены по МНК:

$$C = [A^T \cdot A]^{-1} \cdot A^T \cdot \tilde{A}, \quad (3)$$

где A – матрица с результатами калибровочных замеров (табл. 1):

$$A = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & 1 \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & 1 \\ & \dots & & \\ a_{x6} & a_{y6} & a_{z6} & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

а \tilde{A} – матрица эталонных результатов:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1g \\ 0 & 0 & -1g \\ & \dots & \\ -1g & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

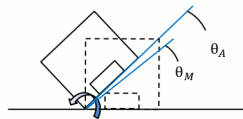
Parameters and calibration of a low-g 3-axis accelerometer / STMicroelectronics.

http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/a0/f0/a0/62/3b/69/47/66/DM00119044.pdf/files/DM00119044.pdf/jcr:content/translations/en_DM00119044.pdf

Калибровка гироскопа без спец. оборудования

- ▶ У гироскопа в статическом положении фиксируется смещение нуля.
- ▶ Вращая ИНС на определённый (точный) угол (например, 90°), можно определить градуировочные коэфф-ты для гироскопа.

Пример методики: M. Looney. A Simple Calibration for MEMS Gyroscopes / Analog Devices. http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/GyroCalibration_EDN_EU_7_2010.pdf



θ_M – измеренный угол

θ_A – реальный угол

Калибровка инерциальных датчиков на стендах



Двухосевой стол для калибровки
линейных ускорений



Стенд для калибровки
вращений по трём осям с
температурной камерой

Калибровка магнитометра (1)

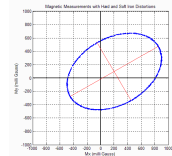
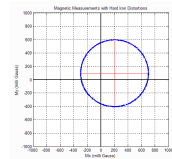
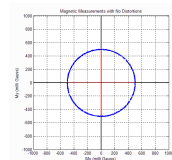
Датчик индукции МП, установленный в ИНС, подлежит калибровке. Существенный вклад вносят два типа искажений:

- ▶ hard iron errors – источники паразитного МП поля рядом с датчиком (магниты, проводники с током);
- ▶ soft iron errors – ферромагнитные материалы рядом с датчиком, искажающие внешнее МП (металлические рамы, проводники, крепёж).

При отсутствии искажений при вращении ИНС вокруг одной из осей показания магнитометра должны формировать окружность.

При наличии источников паразитного МП (hard iron) показания магнитометра формируют смещённую окружность.

Если МП искажается (soft iron), показания магнитометра формируют эллипс.



Калибровка магнитометра (2)

Соотношение между «сырыми» H и нормализованными \tilde{H} замерамаи магнитометра имеет вид, аналогичный формуле (1):

$$\begin{bmatrix} \tilde{H}_x \\ \tilde{H}_y \\ \tilde{H}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & 1 & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1/S_x & 0 & 0 \\ 0 & 1/S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/S_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_x - Z_x \\ H_y - Z_y \\ H_z - Z_z \end{bmatrix}$$

В ходе калибровки устройство вращается по каждой из осей. Полученные данные обрабатываются по МНК.