



RuthHieris 29 ноября 2018 в 19:08

Реклама

MEMS-акселерометры и гироскопы — разбираемся в спецификации

Математика, Робототехника, Электроника для начинающих

Из песочницы

“Хьюстон, у нас проблемы”, — устало раздалось в мозгу, пытающемся в ночи продрасть сквозь Datasheet IMU MPU-9250 от InvenSense. Когда все слова в отдельности понятны, но взаимосвязь их запутана до невозможности. Началось всё с параметра LSB, про который я только смутно помнила, что в переводе это Least Significant Bit. Дальше пошли “Resolution”, “Sensitivity”, а ещё дальше я поняла, что получающийся текст уже можно озаглавить “Datasheet для чайников”.

Немного об основных блоках инерционного модуля.

MEMS-гироскоп

MPU-9250 состоит из трёх независимых одноосных вибрационных датчиков угловой скорости (MEMS гироскопов), которые реагируют на вращение вокруг X-, Y-, Z- осей. Две подвешенные массы совершают колебания по противоположным осям. С появлением угловой скорости эффект Кориолиса вызывает изменение направления вибрации ($\vec{F}_K = -2m[\vec{\omega} \times \vec{v}_r]$), которое фиксируется емкостным датчиком. Измеряемая дифференциальная емкостная составляющая пропорциональна углу перемещения [Время Электроники]. Получившийся сигнал усиливается, демодулируется и фильтруется, давая в итоге напряжение, пропорциональное угловой скорости вращения. Данный сигнал оцифровывается с помощью встроенного в плату 16-битного АЦП. Скорость оцифровки (sample rate) может программно варьироваться от 3.9 до 8000 выборок в секунду (samples per second, SPS), а задаваемые пользователем фильтры низких частот (LPF) предоставляют широкий диапазон возможных частот среза. ФНЧ нужен, в том числе, чтобы убирать вибрации от моторов (как правило, выше 20-25 Гц).

Трёхосевой MEMS-акселерометр

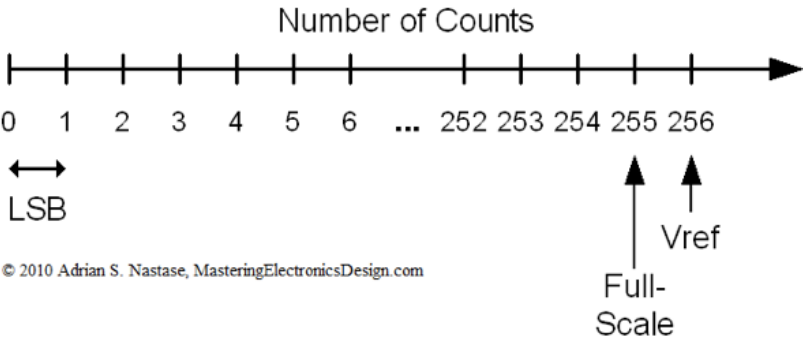
Использует для каждой оси отдельную пробную массу, которая смещается при возникновении ускорения вдоль данной оси (фиксируются емкостными датчиками). Архитектура MPU-9250 снижает подверженность температурному дрейфу и вариациям электропараметров. При расположении устройства на плоской поверхности оно измерит 0g по X- и Y-осям и +1g по Z-оси. *Масштабный коэффициент* (scale factor — отношение изменения выходного сигнала к изменению выходного измеряемого сигнала) калибруется на заводе и не зависит от напряжения питания. Каждый сенсор снабжен индивидуальным сигма-дельта АЦП (состоит из модулятора и цифрового фильтра низких частот, подробнее про устройство в [Easyelectronics]), выходной цифровой сигнал которого имеет настраиваемый диапазон измерений.

И сразу про трёхосевой MEMS-магнетометр

Основан на высокоточной технологии эффекта Холла. Включает в себя магнитные сенсоры, определяющие напряжённость магнитного поля земли по осям, схему управления, цепь усиления сигнала и вычислительную схему для обработки сигналов с каждого датчика. Каждый АЦП имеет разрешение 16 бит, диапазон измерений $\pm 4800 \mu T$. Для измерения слабых магнитных полей применяют либо единицу в системе СИ микротесла (мкТл), либо гаусс (Гс, система СГС): $1 \text{ Гс} = 100 \mu \text{Тл}$, [Радиолюцман]).

Итак, что такое LSB и как его посчитать? Инструкция по добыче

Допустим, наш акселерометр сейчас работает в диапазоне измерений $FS = \pm 2g$, то есть полный размах возможных значений будет $2 \cdot FS = 4g$. Соответствующие им значения напряжений оцифровываются 16-битным АЦП, который может разбить весь интервал максимально на $2^{16} = 65536$ ступеней. Минимальный инкремент, который можно засечь, — это как раз одна ступенька $LSB = 2 \cdot FS / 65536$. Тут надо помнить, что счёт ведётся с нуля, так что на самом деле максимально измеряемое значение будет $2 \cdot FS_{true} = (2^{16} - 1) \cdot LSB = 65535 \cdot LSB = 2 \cdot FS - LSB$. То есть, чем больше бит в цифровом слове АЦП или ЦАП, тем меньше будет расхождение. При этом *чувствительность* (иногда называется *масштабным коэффициентом*, **sensitivity scale factor**) датчика на конкретном диапазоне будет определяться как соотношение электрического выходного сигнала и механического воздействия. Традиционно указывается для частоты сигнала 100 Гц и температуры $T = +25^\circ C$. Для MPU-9250 чувствительность составляет $2^{16} / (2 \cdot FS)$ ступеней на каждые g или $^\circ / s$ (LSB/g , $LSB/(^\circ / s)$), для другого IMU, BMI088 от Bosch Sensortec, чувствительность гироскопа высчитывается так же, а для акселерометра используется $(2^{16} - 2^4) / (2 \cdot FS)$ ступеней на каждое g.



Варианты FS вытаскиваем из спецификации на гироскопы и, чтобы дважды не вставлять, акселерометры.

3.1 Gyroscope Specifications

Typical Operating Circuit of section 4.2, VDD = 2.5V, VDDIO = 2.5V, TA=25°C, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Full-Scale Range	FS_SEL=0		±250		°/s
	FS_SEL=1		±500		°/s
	FS_SEL=2		±1000		°/s
	FS_SEL=3		±2000		°/s
Gyroscope ADC Word Length			16		bits
Sensitivity Scale Factor	FS_SEL=0		131		LSB/(°/s)
	FS_SEL=1		65.5		LSB/(°/s)
	FS_SEL=2		32.8		LSB/(°/s)
	FS_SEL=3		16.4		LSB/(°/s)
Sensitivity Scale Factor Tolerance	25°C		±3		%
Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±4		%
Nonlinearity	Best fit straight line; 25°C		±0.1		%
Cross-Axis Sensitivity			±2		%
Initial ZRO Tolerance	25°C		±5		°/s
ZRO Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±30		°/s
Total RMS Noise	DLPCFG=2 (92 Hz)		0.1		°/s-rms
Rate Noise Spectral Density			0.01		°/s/√Hz
Gyroscope Mechanical Frequencies		25	27	29	KHz
Low Pass Filter Response	Programmable Range	5		250	Hz
Gyroscope Startup Time	From Sleep mode		35		ms
Output Data Rate	Programmable, Normal mode	4		8000	Hz

3.2 Accelerometer Specifications

Typical Operating Circuit of section 4.2, VDD = 2.5V, VDDIO = 2.5V, T_A=25°C, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Full-Scale Range	AFS_SEL=0		±2		g
	AFS_SEL=1		±4		g
	AFS_SEL=2		±8		g
	AFS_SEL=3		±16		g
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		bits
Sensitivity Scale Factor	AFS_SEL=0		16,384		LSB/g
	AFS_SEL=1		8,192		LSB/g
	AFS_SEL=2		4,096		LSB/g
	AFS_SEL=3		2,048		LSB/g
Initial Tolerance	Component-Level		±3		%
Sensitivity Change vs. Temperature	-40°C to +85°C AFS_SEL=0 Component-level		±0.026		%/°C
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		±0.5		%
Cross-Axis Sensitivity			±2		%
Zero-G Initial Calibration Tolerance	Component-level, X,Y		±60		mg
	Component-level, Z		±80		mg
Zero-G Level Change vs. Temperature	-40°C to +85°C		±1.5		mg/°C
Noise Power Spectral Density	Low noise mode		300		μg/√Hz
Total RMS Noise	DLPFCFG=2 (94Hz)			8	mg-rms
Low Pass Filter Response	Programmable Range	5		260	Hz
Intelligence Function Increment			4		mg/LSB
Accelerometer Startup Time	From Sleep mode		20		ms
	From Cold Start, 1ms V _{DD} ramp		30		ms
Output Data Rate	Low power (duty-cycled)	0.24		500	Hz
	Duty-cycled, over temp		±15		%
	Low noise (active)	4		4000	Hz

FS для акселерометров я брала ещё и из документации на BMI088 (см. ниже).

Гироскоп, 16 бит ($2^N = 65535$)		Акселерометр, 16 бит ($2^N = 65535$)	
Диапазон (FS), °/s (dps)	LSB, °/s (dps)	Диапазон (FS), g	LSB, mg
±125 (FS = 250)	0,004	±2 (FS = 4)	0,06
±250 (FS = 500)	0,008	±3 (FS = 6)	0,09
±500 (FS = 1000)	0,0015	±4 (FS = 8)	0,12
±1000 (FS = 2000)	0,03	±6 (FS = 12)	0,18
±2000 (FS = 4000)	0,06	±8 (FS = 16)	0,24
		±12 (FS = 24)	0,37
		±16 (FS = 32)	0,48
		±24 (FS = 48)	0,73

Всё, вроде бы, встало на свои места, можно идти дальше. В некоторых случаях (ниже, например, вырезка из документации на BMI088) отдельно указывается такой параметр, как разрешение (Resolution).

По факту, вроде бы, получается, что это должен быть LSB. Но почему тогда мы видим одно значение вместо нескольких, завязанных на конкретные диапазоны? Пришлось расширять список исследуемых источников в поисках ответов.

Parameter	Technical data
Digital resolution	Accelerometer (A): 16-bit Gyroscope (G): 16-bit
Resolution	(A): 0.09 mg (G): 0.004°/s
Measurement range and sensitivity (calibrated)	(A): ± 3 g: 10920 LSB/g ± 6 g: 5460 LSB/g ± 12 g: 2730 LSB/g ± 24 g: 1365 LSB/g (G): ± 125°/s: 262.144 LSB/°/s ± 250°/s: 131.072 LSB/°/s ± 500°/s: 65.536 LSB/°/s ± 1000°/s: 32.768 LSB/°/s ± 2000°/s: 16.384 LSB/°/s

Что такое разрешение (Resolution)?

Минимальная величина, которую достоверно видит датчик, крайне важна при попытке соблюсти баланс между ценой и производительностью. Это не точность — сенсор с высоким разрешением может быть не особо точным, равно как и сенсор с малым разрешением в определённых областях может обладать достаточной точностью. К сожалению, LSB определяет лишь теоретическое минимально-различимое значение при условии, что мы можем использовать все 16 бит АЦП. Это разрешение в цифровом мире. В аналоговом какая-то часть ступеней будет зашумлена и число эффективных бит будет меньше.

Какие бывают характеристики шума и откуда что берётся?

Источники шума можно в общем разбить на электронный шум схемы, преобразующей движение в сигнал напряжения (джонсоновский тепловой шум, дробовой шум, розовый 1/f фликкер-шум и т.д.), и тепловой механический (броуновский, обусловленный наличием мелких подвижных частей) от самого сенсора. Характеристики последнего будут зависеть от резонансной частоты механической части системы f_0 (собственной частоты колебаний сенсора $\omega_0 = 2\pi/f_0$).

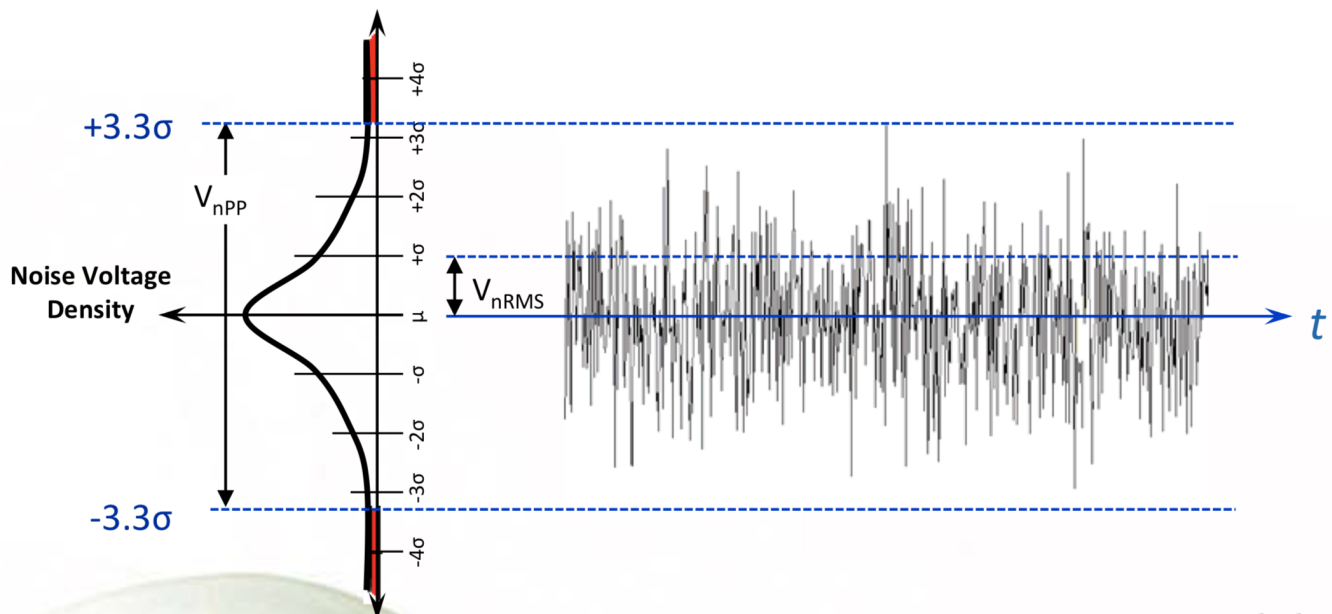
Среднеквадратичное значение шумов во всём спектральном диапазоне — Total RMS (Root mean square) Noise

Уровни шума можно определять несколькими способами. Можно рассматривать их во временной или частотной области (после преобразования Фурье). В первом случае берут остаточный шум как среднеквадратичное значение сигналов от неподвижного датчика (по факту это стандартное отклонение для выборки при $\bar{x} = 0$) за некоторый промежуток времени:

$$x_{RMS} = \sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Ускорения или угловые скорости вращения меньше уровня широкополосного шума будут неразличимы — вот и фактическое разрешение. Среднеквадратичное значение переменного напряжения или тока (часто называется действующим или эффективным) равно величине постоянного сигнала, действие которого произведёт такую же работу в активной (резистивной) нагрузке за время периода. Наиболее эффективен такой подход при оценке широкополосного шума, где доминирует белый шум.

Для белого шума отношение амплитуды (мгновенного пикового значения) к среднеквадратичному с вероятностью 99.9% составляет $N_{PP}/N_{RMS} = 6.6$. Называется такое отношение крест-фактором (crest factor, cross ratio). Можно выбрать вероятность 95.5% — крест фактор будет равен 4.



На деле же сигналы шума ведут себя не так хорошо и могут выдавать пики, увеличивающие крест-фактор до 10 раз. В некоторых спецификациях можно найти значения N_{PP} или сам множитель.

В узкой низкочастотной полосе 0.1-10 Гц основную роль играет фликкер-шум "1/f", для оценки которого используют значение размаха шумового сигнала (peak-to-peak).

Спектральная плотность

Иногда сигнал удобнее рассматривать в частотной области, где его описание называется *спектром* (зависимость амплитуды и фазы от частоты). Одна из возможных характеристик шума в спецификациях зовётся *power spectral density of noise (PSD)*, *noise spectral density*, *noise power density*, или попросту *noise density*). Описывает распределение мощности шума по диапазону частот. Вне зависимости от представления электрического сигнала через ток или напряжение мгновенную рассеиваемую на нагрузке мощность можно нормировать ($R = 1 \text{ Ом}$) и выразить её как $p(t) = v^2(t)/R = i^2(t)R = x^2(t)$. Средняя мощность, рассеиваемая сигналом в течение промежутка времени $(-T/2, T/2)$,

$$P_x^T = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t) dt.$$

Мощность – скорость поступления энергии. Через энергию определяются детерминированные и непериодические сигналы. Периодические и случайные сигналы выражаются через мощность, поскольку они не ограничены по времени и, соответственно, энергии, при этом в любой момент времени их средняя мощность отлична от нуля

$$P_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t) dt.$$

Можно вспомнить [Sklyar], что произвольный периодический сигнал выражается через комбинацию бесконечного числа гармоник с возрастающими частотами:

$$x(\lambda) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\lambda + b_n \sin n\lambda),$$

что после представления косинуса и синуса в экспоненциальной форме

$$\cos \lambda = \frac{e^{i\lambda} + e^{-i\lambda}}{2}, \sin \lambda = \frac{e^{i\lambda} - e^{-i\lambda}}{2i}$$

и замены $\lambda = \omega t = 2\pi f_0 t = \frac{2\pi t}{T_0}$ можно записать в виде

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} [(a_n - ib_n)e^{in\omega t} + (a_n + ib_n)e^{-in\omega t}] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{in\omega t},$$

где комплексные коэффициенты (спектральные компоненты) ряда Фурье для $x(t)$,

$$c_n = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) e^{-in\omega t} dt = \begin{cases} \frac{1}{2}(a_n - ib_n), & n > 0 \\ \frac{a_0}{2}, & n = 0 \\ \frac{1}{2}(a_n + ib_n), & n < 0 \end{cases}$$

В общем случае эти коэффициенты представимы следующим образом:

$$c_n = |c_n| e^{i\theta_n},$$

$$|c_n| = \frac{1}{2} \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \theta_n = \arctan\left(\frac{b_n}{a_n}\right), b_0 = 0, c_0 = \frac{a_0}{2}.$$

Амплитудным и фазовым спектром называют графики зависимости $|c_n|$ и θ_n от частоты. Спектральная плотность мощности $PSD(f)$ периодического сигнала $x(t)$ даёт распределение мощности сигнала по диапазону частот:

$$PSD(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |c_n|^2 \delta(f - nf_0)$$

и имеет размерность $[B_T / \Gamma_{\Pi}] = [x^2 / \Gamma_{\Pi}]$. Средняя нормированная мощность действительного сигнала будет

$$P_x = \int_{-\infty}^{\infty} PSD(f) df.$$

Непериодические случайные сигналы (в частности, шум) можно описать как периодические в предельном смысле. Если T_0 стремится к бесконечности, последовательность импульсов превращается в отдельный импульс $x(t)$, число спектральных линий стремится к бесконечности, график спектра превращается в гладкий спектр частот $X(f)$. Для данного предельного случая можно определить пару интегральных преобразований Фурье

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt$$

и

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi ft} df,$$

где $X(f)$ — Фурье-образ.

Спектральная плотность мощности случайного сигнала определяется через предел

$$PSD(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |X_T(f)|^2.$$

и описывает распределение мощности сигнала в диапазоне частот.

Поскольку мы предполагаем, что среднее для белого шума датчиков в неподвижном состоянии равно нулю ($\bar{x} = \bar{\dot{x}} = 0$), то квадрат среднеквадратического значения равен дисперсии и представляет собой полную мощность в нормированной нагрузке:

$$Noise_{RMS}^2 = \sigma_x^2 = P_x = \int_0^{\infty} PSD(f) df = \int_0^{Bandwidth} PSD(f) df = PSD(Bandwidth - 0)$$

$$Noise_{RMS} = \sqrt{NoiseDensity \times Bandwidth}$$

Смотрим в спецификации — там на самом деле под именем спектральной плотности указан квадратный корень из неё с соответствующей размерностью $[^\circ / s / \sqrt{Hz}]$ или $[\mu g / \sqrt{Hz}]$. То есть значение RMS шума без указания полосы частот, на которой он считался (Bandwidth), бессмысленно.

Чуть подробнее про выбор полосы пропускания

На выходе MEMS-датчика мы получаем сигналы разной частоты. Предполагается, что мы заранее имеем некое представление об измеряемых нами процессах. К примеру, при определении вектора ускорения дрона шумом являются вибрации аппарата.

Отделить их от полезного сигнала можно с помощью фильтра низких частот, который обрежет все частоты выше указанной (к примеру, 200 Гц). MPU-9250 предоставляет возможность настроить частоту среза фильтра низких частот с помощью параметра с магическим названием *DLPFCFG*. Расшифровывается он как Digital Low Pass Filter Configuration. Далее в спецификации там и тут всплывали не менее загадочные выражения типа (DLPFCFG = 2, 92Hz), но за расшифровкой пришлось лезть в другой документ, "Register Map and Descriptions". Там показано, какие наборы битов в какие регистры надо записать для достижения желаемых эффектов:

3 Register Map for Gyroscope and Accelerometer

The following table lists the register map for the gyroscope and accelerometer in the MPU-9250 MotionTracking device.

Addr (Hex)	Addr (Dec.)	Register Name	Serial I/F	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0	
00	0	SELF_TEST_X_GYRO	R/W	xg_st_data [7:0]								
01	1	SELF_TEST_Y_GYRO	R/W	yg_st_data [7:0]								
02	2	SELF_TEST_Z_GYRO	R/W	zg_st_data [7:0]								
0D	13	SELF_TEST_X_ACCEL	R/W	XA_ST_DATA [7:0]								
0E	14	SELF_TEST_Y_ACCEL	R/W	YA_ST_DATA [7:0]								
0F	15	SELF_TEST_Z_ACCEL	R/W	ZA_ST_DATA [7:0]								
13	19	XG_OFFSET_H	R/W	X_OFFSETS_USR [15:8]								
14	20	XG_OFFSET_L	R/W	X_OFFSETS_USR [7:0]								
15	21	YG_OFFSET_H	R/W	Y_OFFSETS_USR [15:8]								
16	22	YG_OFFSET_L	R/W	Y_OFFSETS_USR [7:0]								
17	23	ZG_OFFSET_H	R/W	Z_OFFSETS_USR [15:8]								
18	24	ZG_OFFSET_L	R/W	Z_OFFSETS_USR [7:0]								
19	25	SMP_LRT_DIV	R/W	SMP_LRT_DIV[7:0]								
1A	26	CONFIG	R/W	-	FIFO_MODE	EXT_SYNC_SET[2:0]			DLPF_CFG[2:0]			
1B	27	GYRO_CONFIG	R/W	XGYRO_Ct_en	YGYRO_Ct_en	ZGYRO_Ct_en	GYRO_FS_SEL [1:0]		-	FCHOICE_B[1:0]		
1C	28	ACCEL_CONFIG	R/W	ax_st_en	ay_st_en	az_st_en	ACCEL_FS_SEL[1:0]		-			
1D	29	ACCEL_CONFIG 2	R/W	-				ACCEL_FCHOICE_B			A_DLPF_CFG	

Опуская технические подробности конфигурирования, можно сказать следующее. В данном датчике осуществляется настраиваемая фильтрация показаний не только акселерометров, гироскопов, но и температурного датчика. Для каждого существует в общей сложности от 7 до 10 режимов, характеризующихся такими понятиями, как полоса пропускания (Bandwidth) в Гц, задержка в мс, частота дискретизации (sampling frequency, Fs) в кГц.

[2:0]	DLPF_CFG[2:0]	For the DLPF to be used, fchoice[1:0] must be set to 2'b11, fchoice_b[1:0] is 2'b00. See table 3 below.
-------	---------------	--

The DLPF is configured by *DLPF_CFG*, when *FCHOICE_B* [1:0] = 2'b00. The gyroscope and temperature sensor are filtered according to the value of *DLPF_CFG* and *FCHOICE_B* as shown in the table below. Note that *FCHOICE* mentioned in the table below is the inverted value of *FCHOICE_B* (e.g. *FCHOICE*=2'b00 is same as *FCHOICE_B*=2'b11).

FCHOICE		DLPF_CFG	Gyroscope			Temperature Sensor	
<1>	<0>		Bandwidth (Hz)	Delay (ms)	Fs (kHz)	Bandwidth (Hz)	Delay (ms)
x	0	x	8800	0.064	32	4000	0.04
0	1	x	3600	0.11	32	4000	0.04
1	1	0	250	0.97	8	4000	0.04
1	1	1	184	2.9	1	188	1.9
1	1	2	92	3.9	1	98	2.8
1	1	3	41	5.9	1	42	4.8
1	1	4	20	9.9	1	20	8.3
1	1	5	10	17.85	1	10	13.4
1	1	6	5	33.48	1	5	18.6
1	1	7	3600	0.17	8	4000	0.04

В таблицу режимов фильтра акселерометра добавилась колонка «Плотность шума» в $\mu g/\sqrt{Hz} = \mu g/\sqrt{Hz}$, а «Bandwidth» колонка дополнилась значением «3dB».

BIT	NAME	FUNCTION
[7:6]	Reserved	
[5:4]	Reserved	
[3]	accel_fchoice_b	Used to bypass DLPF as shown in table 2 below. NOTE: This register contains accel_fchoice_b (the inverted version of accel_fchoice as described in the table below).
[2:0]	A_DLPFCFG	Accelerometer low pass filter setting as shown in table 2 below.

Accelerometer Data Rates and Bandwidths (Normal Mode)

ACCE L_FCH OICE	A_DL PF_C FG	Output		Filter Block	Delay (ms)	Noise Density (µg/rHz)
		3dB BW (Hz)	Rate (kHz)			
0	x	1,046	4	Dec1	0.503	300
1	0	218.1	1	DLPF	1.88	300
1	1	218.1	1	DLPF	1.88	300
1	2	99	1	DLPF	2.88	300
1	3	44.8	1	DLPF	4.88	300
1	4	21.2	1	DLPF	8.87	300
1	5	10.2	1	DLPF	16.83	300
1	6	5.05	1	DLPF	32.48	300
1	7	420	1	Dec2	1.38	300

Легче не стало, так что пройдемся прямо по списку.

Наследие Древнего Рима

Частота дискретизации + децимация ΔΣ-АЦП = скорость обновления данных (digital output data rate, ODR)

С частотой дискретизации (она же частота семплирования) всё понятно — это количество взятых за секунду точек непрерывного по времени сигнала при его дискретизации АЦП. Измеряется в герцах.

$$Fs = \frac{1}{\delta t}$$

Для того, чтобы в выборку попало значение, приближенное к пиковой амплитуде сигнала, важно брать частоту дискретизации минимум в 10 раз больше частоты полезного сигнала. MPU-9250 предлагает три варианта Fs = 32kHz, 8kHz, 1kHz.

Но это абсолютно не значит, что сигнал на выходе акселерометра или гироскопа появляется с тем же периодом.

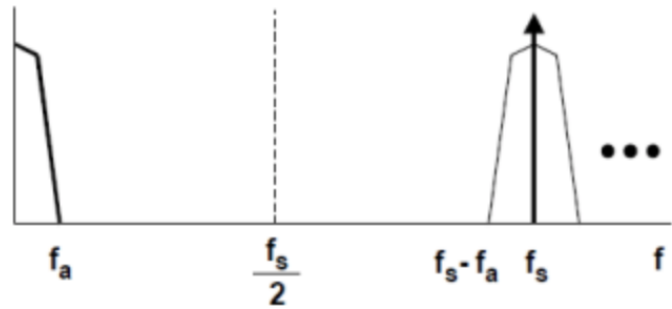
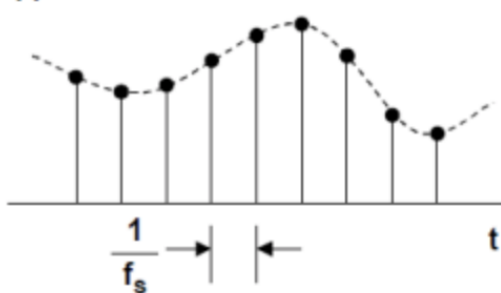
Если взять те же дроны, тут всё упирается в борьбу за снижение энергопотребления, повышение скорости вычислений и снижение шума выходных данных. Можно понизить частоту обновления данных на выходе, позволив внутренним алгоритмам интегрировать входную информацию в течение некоторого периода времени. Среднеквадратичный понизится, но также сузится и полоса пропускания (датчик сможет засечь лишь те процессы, частота которых будет меньше 50% скорости обновления данных).

Тут лучше сразу вспомнить теорему Котельникова. Она обещает, что при дискретизации аналогового сигнала можно избежать потерь информации (то есть восстановить сигнал без искажений), если частота полезного сигнала будет не больше половины частоты дискретизации, называемой также частотой Найквиста. На практике классический антиалиазинговый фильтр (фильтр низких частот, уменьшающий вклад побочных частотных компонентов в выходном сигнале до пренебрежимо малых уровней — ГОСТ Р 8.714-2010) требует в большинстве случаев разницу минимум в 2.5 раза [Siemens].

Для Fs = 32kHz частота Найквиста будет 16kHz. При этом полезный сигнал вряд ли выйдет за полосу fa = 20Hz (мало кто может менять направление движения чаще 20 раз в секунду). Итого, частота дискретизации значительно превышает частоту, требуемую

для сохранения информации, содержащейся в полосе f_a (40Hz, в 400 раз превышает), то есть полезный сигнал избыточно дискретизирован. Полоса между частотами f_a и $f_s - f_a$ не содержит никакой полезной информации. Можно уменьшить частоту дискретизации (на диаграмме это сделано с коэффициентом M , [7]), прорежив последовательность семплов (отсчётов). Этот процесс и называется *децимацией*.

А) ИСХОДНЫЙ ИЗБЫТОЧНО ДИСКРЕТИЗИРОВАННЫЙ СИГНАЛ



В) СИГНАЛ ПОСЛЕ ДЕЦИМАЦИИ С КОЭФФИЦИЕНТОМ M

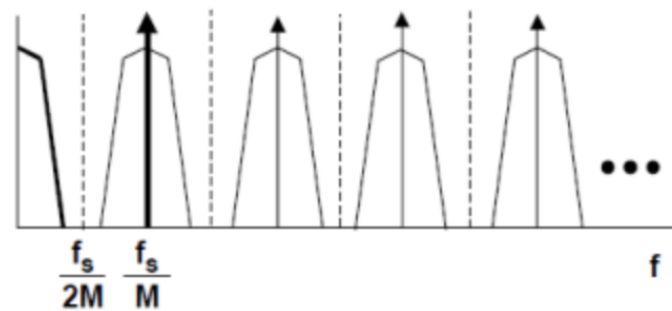
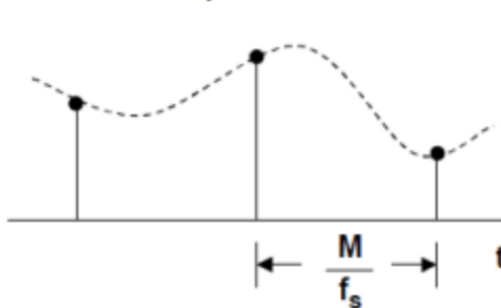


Рис. 2. Децимация дискретного сигнала с коэффициентом M

Согласно спецификации на MPU-9250, акселерометры снабжены *сигма-дельта АЦП*. Схемы на его основе потребляют минимальную мощность. Надо отметить, что полоса пропускания у данных преобразователей весьма узкая, не превышает звукового диапазона [Easyelectronics], но для штатного квадрокоптера больше и не нужно. Состоят они из двух блоков: $\Sigma\Delta$ -модулятора и цифрового децимирующего фильтра низких частот.

Зачем объединять фильтр низких частот и децимацию?

Честная выдержка из Вики:

Если исходный сигнал не содержит частот, превышающих частоту Найквиста децимированного сигнала, то форма спектра полученного (децимированного) сигнала совпадает с низкочастотной частью спектра исходного сигнала. Частота дискретизации, соответствующая новой последовательности отсчётов, в N раз ниже, чем частота дискретизации исходного сигнала. Если исходный сигнал содержит частоты, превышающие частоту Найквиста децимированного сигнала, то при децимации будет иметь место алиасинг (наложение спектров).

Таким образом, для сохранения спектра необходимо до децимации удалить из исходного сигнала частоты, превышающие частоту Найквиста децимированного сигнала. В спецификации на MPU-9250 не очень много информации о характеристиках DLPF, но можно найти исследования энтузиастов [9].

Bandwidth, она же frequency response (частотный отклик)

диапазон частот, в котором датчик обнаруживает движение и выдает действительный выходной сигнал. В некоторых спецификациях приводится частотная характеристика датчика — зависимость электрического выходного сигнала акселерометра от внешних механических воздействий с фиксированной амплитудой, но различными частотами. В пределах полосы пропускания неравномерность частотной характеристики не превышает заданной. В случае применения цифрового фильтра низких частот выбор полосы пропускания как раз позволяет изменять частоту среза, неизбежно оказывая влияние на скорость отклика датчика на изменения положения в пространстве. Частота среза обязана быть меньше половины скорости оцифровки (digital output data rate, ODR), называемой также частотой Найквиста.

Для акселерометров MPU-9250 границы полосы пропускания определяются так, чтобы внутри диапазона спектральная плотность

сигнала отличалась от пиковой (на частоте 0 Гц) не больше, чем на -3дБ. Этот уровень примерно соответствуют падению до половины спектральной плотности (или 70.7% от пиковой спектральной амплитуды). Напомню, для энергетических величин (мощность, энергия, плотность энергии), пропорциональных квадратам силовых величин поля, выраженное в децибелах отношение

$$D_P = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}$$

Итог: сигналы, прошедшие через ФНЧ, менее зашумлены, у них лучшее разрешение, но при этом меньшая полоса пропускания. Поэтому указание разрешения в спецификации без привязки к полосе пропускания смысла не имеет.

Вернёмся к разрешению

В спецификации на MPU-9250 сведений о разрешении в принципе нет, для BMI088 под именем «Разрешение» представлены цифровое разрешение (LSB) и чувствительность»:

Bit	Access	Reset value	Description																		
[7:0]	RW	0x00	Angular rate range and resolution. Possible values:																		
			<table><tr><th>gyro_range</th><th>Full scale [°/s]</th><th>Resolution</th></tr><tr><td>0x00</td><td>±2000</td><td>16.384 LSB/°/s ⇔ 61.0 m°/s / LSB</td></tr><tr><td>0x01</td><td>±1000</td><td>32.768 LSB/°/s ⇔ 30.5 m°/s / LSB</td></tr><tr><td>0x02</td><td>±500</td><td>65.536 LSB/°/s ⇔ 15.3 m°/s / LSB</td></tr><tr><td>0x03</td><td>±250</td><td>131.072 LSB/°/s ⇔ 7.6 m°/s / LSB</td></tr><tr><td>0x04</td><td>±125</td><td>262.144 LSB/°/s ⇔ 3.8m°/s / LSB</td></tr></table>	gyro_range	Full scale [°/s]	Resolution	0x00	±2000	16.384 LSB/°/s ⇔ 61.0 m°/s / LSB	0x01	±1000	32.768 LSB/°/s ⇔ 30.5 m°/s / LSB	0x02	±500	65.536 LSB/°/s ⇔ 15.3 m°/s / LSB	0x03	±250	131.072 LSB/°/s ⇔ 7.6 m°/s / LSB	0x04	±125	262.144 LSB/°/s ⇔ 3.8m°/s / LSB
			gyro_range	Full scale [°/s]	Resolution																
			0x00	±2000	16.384 LSB/°/s ⇔ 61.0 m°/s / LSB																
			0x01	±1000	32.768 LSB/°/s ⇔ 30.5 m°/s / LSB																
			0x02	±500	65.536 LSB/°/s ⇔ 15.3 m°/s / LSB																
			0x03	±250	131.072 LSB/°/s ⇔ 7.6 m°/s / LSB																
			0x04	±125	262.144 LSB/°/s ⇔ 3.8m°/s / LSB																

Оценить разрешение для каждой полосы пропускания можно по пиковому шуму $Noise_{pk-pk} = TotalNoise_{RMS} \times CrestFactor = TotalNoise_{RMS} \times 4$. Среднеквадратичная величина шума на выходе связана с указанной в спецификации спектральной плотностью (а вернее, корнем из неё) и эквивалентной шумовой полосой пропускания (equivalent noise bandwidth, ENBW, — полоса пропускания эквивалентной системы, имеющей прямоугольную АЧХ и одинаковые с исходной системой значение на нулевой частоте и дисперсию на выходе, при воздействии на входы систем белого шума):

$$N_{RMS} = PSD \times \sqrt{ENBW}$$

А шумовая полоса пропускания связана с 3dB полосой коэффициентами, соответствующим порядку низкочастотного фильтра:

$$ENBW = 1.57 \cdot f_{3dB} \text{ для 1-го порядка}$$

$$ENBW = 1.11 \cdot f_{3dB} \text{ для 2-го порядка}$$

$$ENBW = 1.05 \cdot f_{3dB} \text{ для 3-го порядка}$$

$$ENBW = 1.025 \cdot f_{3dB} \text{ для 4-го порядка}$$

Судя по исследованию в [MPU9250_DLPF], наш выбор 1.57. Полученное среднеквадратическое значение учитывает вклад белого шума (ни шума квантования, ни механического шума там нет). Например, для акселерометра расчётное значение для $BW = 99Hz, PSD = 300\mu g/\sqrt{Hz}$ получается $N_{RMS} = 4mg$. При этом в спецификации отдельно указан полный среднеквадратичный шум $TotalRMSNoise = 8mg$. Расхождение значительное. К сожалению, он указан лишь для одной полосы, а для акселерометра BMI088 в спецификации указано только PSD. Так что будем использовать что есть. Кросс-фактор

MPU-9250			BMI088		
Гироскоп					
$N_{RMS}^{Total} = 0.1^{\circ}/s(BW = 92Hz)$			$N_{RMS} = 0.1^{\circ}/s(BW = 47Hz)$		
$PSD = 0.01^{\circ}/s/\sqrt{Hz}$			$PSD = 0.014^{\circ}/s/\sqrt{Hz}$		
BW, Hz	$N_{RMS},^{\circ}/s - rms$	$N_{PP},^{\circ}/s$	BW, Hz	$N_{RMS},^{\circ}/s$	$N_{PP},^{\circ}/s$
			523	0.41	1.6
250	0.2	0.8	230	0.27	1.1
184	0.17	0.69	116	0.19	0.76
92	0.12	0.49	64	0.14	0.57
41	0.08	0.32	47	0.12	0.49
20	0.06	0.23	32	0.1	0.4
10	0.04	0.16	23	0.09	0.34
5	0.03	0.11	12	0.06	0.25
Акселерометр					
$N_{RMS}^{Total} = 8mg (BW=99Hz)$			$PSD_{XY} = 160\mu g/\sqrt{Hz}$		
$PSD = 300\mu g/\sqrt{Hz}$ (Gyro off)			$PSD_Z = 190\mu g/\sqrt{Hz}(g_{FS3g}, Normal mode)$		
BW, Hz	N_{RMS}, mg	N_{PP}, mg	BW, Hz	$N_{RMS_{XY}}, mg$	$N_{PP_{XY}}, mg$
218.1	5.6	22	280	3.4	14
99	3.8	15	145	2.4	10
44.8	2.5	10	80	1.8	7
21.2	1.7	7	40	1.3	5
10.2	1.2	4.9	20	0.9	4
5.05	0.9	3.4	10	0.6	2.6
420	7.8	31	5	0.5	1.8
1046	12.3	49			

Delay (ms), или откуда берётся задержка

Из необходимости сохранять во внутреннем буфере переменные для деления фильтром сигнала на разные частоты

Итого. Чем ниже частота обрезания фильтра, тем меньше шума в сигнале. Но тут надо быть осторожным, потому что одновременно с этим вырастает и задержка. Кроме того, можно пропустить полезный сигнал [8].

MPU-9250		BMI088	
Гироскоп, 16 бит			
Диапазон (FS), °/s (dps)	Разрешение, бит (BW=92Hz)	Диапазон (FS), °/s (dps)	Разрешение, бит (BW=64Hz)
		±125	8

±250	9	±250	9
±500	10	±500	10
±1000	11	±1000	11
±2000	12	±2000	12
Акселерометр			
Диапазон (FS), g	Разрешение, бит ($N_{PP} = 32mg$)	Диапазон (FS), g	Разрешение (по X,Y), бит ($N_{PP}^X Y = 14mg$)
±2	6	±3	8
±4	7	±6	9
±8	8	±12	10
±16	9	±24	11

И это лишь самые основные параметры.

Откуда что бралось:

1. Самый приятный документ от Freescale Semiconductor — «How Many Bits are Enough?»
2. [EE] — «Resolution vs Accuracy vs Sensitivity Cutting Through the Confusion»
3. [Время электроники] — «МЭМС-датчики движения от STMicroelectronics: акселерометры и гироскопы»
4. [LSB] — «An ADC and DAC Least Significant Bit (LSB)»
5. [Measurement Computing] — «TechTip: Accuracy, Precision, Resolution, and Sensitivity»
6. [KIT] — «Акселерометры Analog Devices — устройство и применение»
7. [Easyelectronics] — «Сигма-дельта АЦП»
8. [Радиолоцман] — «Магнитометры: принцип действия, компенсация ошибок»
9. [SO] — «Noise Measurement»
10. [Mide] — «Accelerometer Specifications: Deciphering an Accelerometer’s Datasheet»
11. [CiberLeninka] — Delta-Sigma ADC Filter
12. [SciEd] — «Особенности реализации цифровой фильтрации с изменением частоты дискретизации»
13. [MPU6050] — «Using the MPU6050’s DLPF»
14. [MPU9250_DLPF] — MPU9250 Gyro Noise DLPF work investigation
15. Understanding Sensor Resolution Specifications
16. Siemens Digital Signal Processing
17. МЭМС-датчики движения от STMicroelectronics
18. [TMWorld] — «Evaluating inertial measurement units»
19. [Sklyar] – Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение.

Теги: mems, гироскоп, акселерометр, спецификация, шум

↑

+46

↓

🔖

98

👁

19,7k

💬

9



13,0

Карма

0,0

Рейтинг

2

Подписчики

0

Подписки

@RuthHieris

Пользователь

Поделиться публикацией

ЧИТАЮТ СЕЙЧАС

Сложность отработки космических кораблей

↑ 27

👁 6k

📖 19

💬 27

Витамин D. Краткий экскурс

↑ 44

👁 20,6k

📖 178

💬 196

Европейский суд запретил перепродавать файлы электронных книг

↑ 24

👁 21,3k

📖 17

💬 219

Глубокое погружение в инвестиции Илона Маска

↑ 18

👁 19,2k

📖 81

💬 27

Реклама

Комментарии 9



vasimv

📌 29 ноября 2018 в 19:14



↑

+3

↓

MPU9250/9255 — не самый удобный вариант для начинающих разбираться. Компас там висит на отдельной внутренней I2C шине, которая может работать в двух режимах (pass-through с основной и через внутренний контроллер в чипе MPU6500), причем оно там работает не всегда как написано в даташите, часто просто теряется связь с компасом в момент инициализации, иногда требуется хардварный ресет всего чипа. Хотя, конечно, если запустилось, то нормально пашет. Опытным путем приходится долго подбирать работающую последовательность инициализации (сбросить то, сбросить это, потом туда записать, потом снова сбросить и т.д.).



RuthHieris

29 ноября 2018 в 23:17



↑

0

↓

Мне он достался вместе с квадрокоптером Crazyflie от Bitcraze, так что пришлось разбираться с тем, что есть :) BMI088 они использовали во второй версии продукта, я полезла сравнивать.



amartology

📌 29 ноября 2018 в 19:43



↑

+1

↓

Итак, что такое LSB?

- 1) Минимальный уровень напряжения, который сможет разобрать и осознанно конвертировать АЦП.
- 2) Минимальное приращение напряжения на выходе ЦАП.

Хм, нет. LSB — это полная шкала АЦП/ЦАП, поделенная на 2^N , где N — число бит, которые АЦП/ЦАП *пытается* конвертировать. Фактическая точность может быть как меньше, так и больше, и изменяется (в том числе) в штуках LSB. Например, у АЦП Analog Devices AD9637 INL (интегральная нелинейность) составляет (в некотором режиме работы) ± 0.5 LSB, а у АЦП 5101HB015 компании «Миландр» INL $\pm 2,0$ LSB в 14-битном режиме и $\pm 0,6$ LSB в 12-битном режиме.



RuthHieris

29 ноября 2018 в 23:28



↑

0

↓

Согласна. Я потом на это вышла, но в данном месте некорректно написано. Вернее, написано согласно пониманию на тот момент)

 **amartology** 30 ноября 2018 в 00:10

📖 🔗 🔄

↑ +2 ↓

Возможно, стоит доделать текст согласно пониманию на текущий момент, а не на тогдашний.

 **natan555** 29 ноября 2018 в 20:38

📖

↑ 0 ↓

Не в тему, но рядом... Как перевести, хотя-бы приблизительно, ампер*витки из характеристики геркона в мТ, для подбора магнита или сравнения геркона и датчика холла?

 **RuthHieris** 29 ноября 2018 в 23:32

📖 🔗 🔄

↑ 0 ↓

Не моя тематика, но завтра на работе спрошу — если коллеги ответят, отпишусь

 **AVI-crak** 29 ноября 2018 в 22:52

📖

↑ +4 ↓

Как много лишних громоздких формул, тот самый случай когда они не находят применения. Оно конечно полезно знать, чего в теории может выдать чёрный ящик. Но большинство пользователей MEMS датчиков — просто используют библиотеку от производителя. Тут есть варианты: использовать установки по умолчанию, или самостоятельно проверить все имеющиеся режимы.

Дык вот, два вопроса остались без ответа.

Как быстро оценить уровень шума датчика, используя только его публичную документацию.

Как выглядит идеальный конфиг MPU-9250, при котором уровень шума минимален.

 **RuthHieris** 29 ноября 2018 в 23:25

📖 🔗 🔄

↑ 0 ↓

Это правда, в нормальной деятельности времени на вывод всего этого нет, да и не нужно оно. Но я столько противоречащих друг другу текстов нашла, что решила один раз занырнуть в формулы, чтобы разобраться. Шум — $N_{rms} = \text{SpectralDensity}[BandWidth1.6]^0.5$, $N_{peaktopeak} = N_{rms} * 6$. А подбор конфинальность будет зависеть от диапазона, в котором чаще всего, предположительно, будут работать датчики.

Только полноправные пользователи могут оставлять комментарии. Войдите, пожалуйста.

САМОЕ ЧИТАЕМОЕ

- Сутки
- Неделя
- Месяц

Витамин D. Краткий экскурс

↑ +44 👁 20,6k 📖 178 💬 196

Европейский суд запретил перепродавать файлы электронных книг

↑ +24 👁 21,3k 📖 17 💬 219

ИИ, пытающийся избежать проблем, научился сложному поведению

↑ +30 👁 16,4k 📖 95 💬 42

Как чиновники Московской области измеряют загрязнение воздуха

↑ +83 👁 13,2k 📖 27 💬 55

Глубокое погружение в инвестиции Илона Маска

↑ +18 👁 19,2k 📖 81 💬 27

Ваш аккаунт	Разделы	Информация	Услуги
Войти	Публикации	Правила	Реклама
Регистрация	Новости	Помощь	Тарифы
	Хабы	Документация	Контент
	Компании	Соглашение	Семинары
	Пользователи	Конфиденциальность	Мегaproекты
	Песочница		

Если нашли опечатку в посте, выделите ее и нажмите Ctrl+Enter, чтобы сообщить автору.

