**ХАРАКТЕРИСТИКИ IMU ICM-20948,BNO055, MPU9250**

**1. Измеряемые сенсором величины, каналы измерения**

Таблица 1 относится ко всем сенсорам.

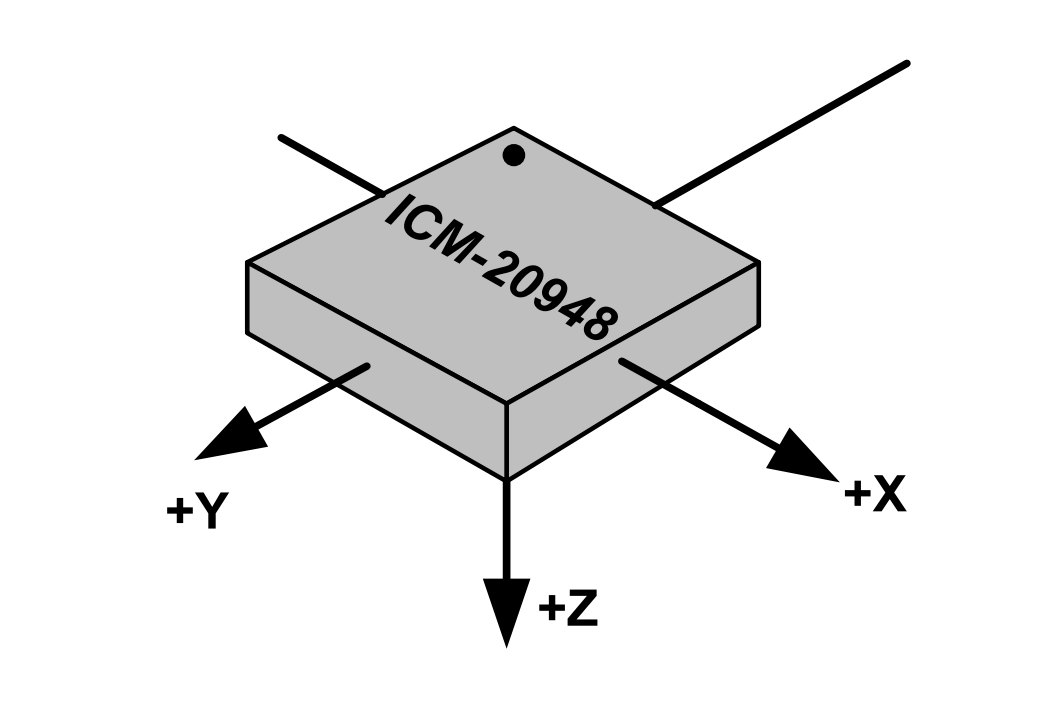
Таблица 1 – измеряемые величины, каналы

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **АКСЕЛЕРОМЕТР** | **МАГНИТОМЕТР** | **ГИРОСКОП** | **ТЕРМОМЕТР** |
| Каналы | X, Y, Z | | | Температура |
| Измеряемая величина | Линейное ускорение, g | Магнитная индукция, µT (мкТесла) | Угловая скорость, dps (углы в сек.) | Температура, °C |

Рисунок 1 – ориентация осей чувствительности и вращенияИзображение выглядит как зарисовка, рисунок, диаграмма, графическая вставка

Автоматически созданное описание

Рисунок 2 – ориентация осей магнитометра в пространстве



**2. Диапазон измеряемых величин, частота дискретизации**

**2.1. Гироскоп**

Таблица 2 – Сравнение гироскопов

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **ICM 20948** | **BNO 055** | **MPU 9250** | **ЕД.** | **ПРИМЕЧАНИЕ** |
| Кол-во каналов | 3 | 3 | 3 |  |  |
| Диапазон | * ±250 * ±500 * ±1000 * ±2000 | * ±125 * ±250 * ±500 * ±1000 * ±2000 | * ±250 * ±500 * ±1000 * ±2000 | dps | ***ICM:*** по умолчанию 250 dps.  ***BNO:*** по умолчанию 2000 dps.  ***MPU:*** по умолчанию 250 dps.  (см. метод setGyroRange [документа](https://disk.yandex.ru/i/TQ6kHQLk6kfvzw)) |
| Частота опроса | * 4.4 * 17.6 * 34.1 * 35.2 * 48.9 * 66.2 * 102.3 * 125 * 187.5 * 281.3 * 375 * 562.5 * 1125 | * 24 * 46 * 64 * 94 * 128 * 232 * 460 * 1046 | * 3.91 - 1000 | Hz | ***ICM:*** Частота определяется по формуле:  **1125/(1+GYRO\_SMPLRT\_DIV)**, где GYRO\_SMPLRT\_DIV это регистр, представленный в виде одного байта и **принимает значения от 0 до 255**  (приведены не все возможные значения, см. таблицу 16 документации).  ***BNO:*** Частота определяется по формуле **Bandwidth \* 2**, где значение Bandwidth определяется 3,4 и 5 битами регистра **GYR\_Config** (см. таблицу 3-9 документации).  Примечание: в режиме **Sensor Fusion** частота опроса не может быть настроена вручную и автоматически принимает значения **от 0 до 100**.  ***MPU:*** По умолчанию значение всегда 1000, которое может быть уменьшено по формуле  **1000/(1+ SMPLRT\_DIV)**, где SMPLRT\_DIV это регистр, представленный в виде одного байта и **принимает значения от 0 до 255** (см. таблицу 1 документации).  (см. метод set\_gyro\_sample\_rate [документа](https://disk.yandex.ru/i/TQ6kHQLk6kfvzw)). |

Из данной таблицы можно сделать вывод, что гироскоп BNO055 имеет незначительные преимущества по диапазону, а контролирование частоты опроса подразумевает отключение главного козыря датчика – Sensor Fusion, при котором частота становится неконтролируемой. Программа овтоматически настраивает частоту по сокрытому алгоритму.

**2.2. Акселерометр**

Таблица 3 – Сравнение акселерометров

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **ICM 20948** | **BNO 055** | **MPU 9250** | **ЕД.** | **ПРИМЕЧАНИЕ** |
| Кол-во каналов | 3 | 3 | 3 |  |  |
| Диапазон | * ±2g * ±4g * ±8g * ±16g | * ±2g * ±4g * ±8g * ±16g | * ±2g * ±4g * ±8g * ±16g | g | ***ICM:*** 2g по умолчанию.  ***BNO:*** 4g по умолчанию.  ***IMU:*** 2g по умолчанию.  (см. метод setAccelRange [документа](https://disk.yandex.ru/i/TQ6kHQLk6kfvzw)). |
| Частота опроса | * 0.27 * 0.55 * 1.1 * 4.4 * 17.6 * 35.2 * 48.9 * 70.3 * 102.3 * 140.6 * 1125 | * 15.63 * 31.25 * 62.5 * 125 * 250 * 500 * 1000 * 2000 | * 3.91 - 1000 | Hz | ***ICM:*** Частота определяется по формуле:  **1125/(1+ACCEL\_SMPLRT\_DIV)**,  где ACCEL\_SMPLRT\_DIV это регистр, представленный в виде 12-ти бит и **принимает значения от 0 до 4095**  (приведены не все возможные значения, см. таблицу 18 документации).  ***BNO:*** Частота определяется по формуле **Bandwidth \* 2**, где значение Bandwidth определяется 3,4 и 5 битами регистра **ACC\_Config** (см. таблицу 3-8 документации).  Примечание: в режиме **Sensor Fusion** частота опроса не может быть настроена вручную и автоматически принимает значения **от 0 до 100**.  ***MPU:*** По умолчанию значение всегда 1000, которое может быть уменьшено по формуле  **1000/(1+ SMPLRT\_DIV)**, где SMPLRT\_DIV это регистр, представленный в виде одного байта и **принимает значения от 0 до 255** (см. таблицу 1 документации).  (см. метод set\_accelerometer\_sample\_rate [документа](https://disk.yandex.ru/i/TQ6kHQLk6kfvzw)). |

Из таблицы 2 и 3 можно увидеть, что за частоту сэмплирования в датчике MPU-9250 отвечает один регистр. ICM-20948 имеет более широкий диапазон частот и распределенную настройку.

**2.3. Магнитометр**

Таблица 4 – Сравнение магнитометров

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **ICM 20948**  **(AK09916)** | **BNO 055** | **MPU 9250**  **(AK8963)** | **ЕД.** | **ПРИМЕЧАНИЕ** |
| Кол-во каналов | 3 | 3 | 3 | µT | (мкТесла) |
| Диапазон оси X | ±4900 | ±1300 | ±4800 | µT | Для магнитометра диапазон статичен и не изменяется. |
| Диапазон оси Y | ±4900 | ±1300 | ±4800 | µT |
| Диапазон оси Z | ±4900 | ±2500 | ±4800 | µT |
| Частота опроса | * 10 * 20 * 50 * 100 | * 2 * 6 * 8 * 10 * 15 * 20 * 25 * 30 | * 8 * 100 | Hz | ***ICM:*** Частота настраивается через регистр **CNTL2** размером в 1 байти определяется значением в младших четырёх битах  (см. страницу 79 документации).  ***BNO:*** Частота определяется тремя младшими битами регистра **MAG\_Config**  (см. таблицу 3-10 документации).  Примечание: в режиме **Sensor Fusion** частота опроса не может быть настроена вручную и автоматически принимает значения **от 0 до 100**.  ***MPU:*** Частота настраивается через регистр **CNTL1** размером в 1 байти определяется значением 2 и 3 бита (см. страницу 51 документации).  (см. метод magnetometer\_data\_rate [документа](https://disk.yandex.ru/i/TQ6kHQLk6kfvzw)) |
| ФНЧ | — | * 20 | — | Hz | ФНЧ для магнитометра присутствует только у BNO055. |

Из таблицы видно, что настройка ФНЧ для магнитометра есть только у BNO055.

**3. Значения частоты ФНЧ**

**3.1 Гироскоп**

Таблица 5 – Сравнение уровней частоты ФНЧ гироскопов

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **ICM 20948** | **BNO 055** | **MPU 9250** | **ЕД.** | **ПРИМЕЧАНИЕ** |
| ФНЧ | * 5.7 * 11.6 * 23.9 * 51.2 * 119.5 * 151.8 * 196.6 * 361.4 | * 32 * 64 * 12 * 23 * 47 * 116 * 230 * 523 | * 5 * 10 * 20 * 41 * 92 * 184 * 250 * 3600 | Hz | ***ICM:*** настраивается через регистр **GYRO\_CONFIG\_1** значениями 3,4 и 5 битов  (см. таблицу 16 документации).  ***BNO:*** определяется 3,4 и 5 битами регистра **GYR\_Config** (см. таблицу 3-9 документации).  ***MPU:*** определяется тремя младшими битами регистра **CONFIG** (см. страницу 13 документации).  (см. метод set\_gyro\_low\_pass [документа](https://disk.yandex.ru/i/TQ6kHQLk6kfvzw)) |

**3.2. Акселерометр**

Таблица 6 – Сравнение уровней частоты ФНЧ акселерометров

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **ICM 20948** | **BNO 055** | **MPU 9250** | **ЕД.** | **ПРИМЕЧАНИЕ** |
| ФНЧ | * 5.7 * 11.5 * 23.9 * 50.4 * 111.4 * 246 * 246 * 473 | * 7.81 * 15.63 * 31.25 * 62.5 * 125 * 250 * 500 * 1000 | * 5.05 * 10.2 * 21.2 * 44.8 * 99 * 218.1 * 218.1 * 420 | Hz | ***ICM:*** настраивается через регистр **ACCEL\_CONFIG** значениями 3,4 и 5 битов  (см. таблицу 18 документации).  ***BNO:*** определяется 3,4 и 5 битами регистра **ACC\_Config** (см. таблицу 3-8 документации).  ***MPU:*** определяется тремя младшими битами регистра **CONFIG** (см. страницу 15 документации).  (см. метод set\_accelerometer\_low\_pass [документа](https://disk.yandex.ru/i/TQ6kHQLk6kfvzw)) |

ФНЧ у MPU-9250 для акселерометра и гироскопа контролируется через один регистр.

**4. Режимы работы сенсоров**

**4.1. ICM-20948**

Таблица 7 – Режимы работы ICM-20948

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Режим** | **Название** | **GYRO** | **ACCEL** | **MAGNET** | **Fusion** | **ПРИМЕЧАНИЕ** |
| 1 | Sleep | Выкл | Выкл | Выкл | Выкл | Режим сна |
| 2 | Low-Power Accel | Выкл | В рабочем цикле | Выкл | Вкл/выкл | Акселерометр вкл, режим экономии энергии |
| 3 | Accel | Выкл | Вкл | Выкл | Вкл/выкл | Акселерометр включен |
| 4 | Gyroscope | Вкл | Выкл | Выкл | Вкл/выкл | Гироскоп включен |
| 5 | Magnet | Выкл | Выкл | Вкл | Вкл/выкл | Магнитометр включен |
| 6 | Accel + Gyro | Вкл | Вкл | Выкл | Вкл/выкл | Гироскоп и акселерометр |
| 7 | Accel + Magnet | Выкл | Вкл | Вкл | Вкл/выкл | Акселерометр и магнитометр |
| 8 | 9-Axis | Вкл | Вкл | Вкл | Вкл/выкл | Режим всех каналов |

**4.2. BNO-055**

Таблица 8 – Режимы BNO055

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **FUSION** | **РЕЖИМ** | **ACCEL** | **MAGNET** | **GYRO** | **Относительная**  **ориентация** | **Абсолютная**  **ориентация** |
| Выкл | CONFIGMODE | — | — | — | — | — |
| ACCONLY | Вкл | Выкл | Выкл | — | — |
| MAGONLY | Выкл | Вкл | Выкл | — | — |
| GYRONLY | Выкл | Выкл | Вкл | — | — |
| ACCMAG | Вкл | Вкл | Выкл | — | — |
| ACCGYRO | Вкл | Выкл | Вкл | — | — |
| MAGGYRO | Выкл | Вкл | Вкл | — | — |
| AMG | Вкл | Вкл | Вкл | — | — |
| Вкл | IMU | Вкл | Выкл | Вкл | + | — |
| COMPASS | Выкл | Вкл | Выкл | — | + |
| M4G | Вкл | Вкл | Выкл | + | — |
| NDOF\_FMC\_OFF | Вкл | Вкл | Вкл | — | + |
| NDOF | Вкл | Вкл | Вкл | — | + |

**4.3. MPU9250**

Таблица 9 – Режимы работы MPU9250

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Режим** | **Название** | **GYRO** | **ACCEL** | **MAGNET** | **DMP** | **ПРИМЕЧАНИЕ** |
| 1 | Sleep | Выкл | Выкл | Выкл | Выкл | Режим сна |
| 2 | Standby | Drive mode | Выкл | Выкл | Выкл | В дежурном режиме, работает только гироскоп, в datasheetне до конца понятно назначение |
| 3 | Low-Power Accel | Выкл | В рабочем цикле | Выкл | Вкл/выкл | Акселерометр вкл, режим экономии энергии |
| 4 | Accel | Выкл | Вкл | Выкл | Вкл/выкл | Акселерометр включен |
| 5 | Gyroscope | Вкл | Выкл | Выкл | Вкл/выкл | Гироскоп включен |
| 6 | Magnet | Выкл | Выкл | Вкл | Вкл/выкл | Магнитометр включен |
| 7 | Accel + Gyro | Вкл | Вкл | Выкл | Вкл/выкл | Гироскоп и акселерометр |
| 8 | Accel + Magnet | Выкл | Вкл | Вкл | Вкл/выкл | Акселерометр и магнитометр |
| 9 | 9-Axis | Вкл | Вкл | Вкл | Вкл/выкл | Режим всех каналов |

Таблица 10 – «Описание режимов BNO-055»

|  |  |
| --- | --- |
| **CONFIGMODE** | Используется для конфигурирования BNO. При нем все выходные данные обнуляются, а срабатывание датчика останавливается.  Является режимом работы по умолчанию после включения питания или сброса. |
| **ACCONLY** | Работа только акселерометра |
| **MAGONLY** | Работа только магнитометра. |
| **GYRONLY** | Работа только гироскопа. |
| **ACCMAG** | Включены акселерометр и магнитометр, пользователь может считывать данные с этих двух датчиков. |
| **ACCGYRO** | Включены и акселерометр, и гироскоп; пользователь может считывать данные с этих двух датчиков. |
| **MAGGYRO** | Включены магнитометр и гироскоп, пользователь может считывать данные с этих двух датчиков. |
| **AMG** | Включаются все три датчика - акселерометр, магнитометр и гироскоп. |
| **IMU** | В режиме IMU относительная ориентация BNO055 в пространстве рассчитывается по данным акселерометра и гироскопа. Расчет выполняется быстро (т.е. с высокой скоростью передачи выходных данных). |
| **COMPASS** | Предназначен для измерения магнитного поля Земли и вычисления географического направления. |
| **M4G** | Аналогичен режиму IMU, но вместо сигнала гироскопа для определения вращения используется изменение ориентации магнитометра в магнитном поле. Поскольку магнитометр потребляет гораздо меньше энергии, чем гироскоп, этот режим является менее энергоемким по сравнению с режимом IMU. В этом режиме отсутствуют эффекты дрейфа, присущие гироскопу. |
| **NDOF\_FMC\_OFF** | Аналогичен режиму NDOF, но при этом быстрая калибровка магнитометра отключена. |
| **NDOF** | Режим слияния с 9 степенями свободы, в котором слитые данные об абсолютной ориентации рассчитываются на основе данных акселерометра, гироскопа и магнитометра. В этом режиме включается быстрая калибровка магнитометра. Потребляемый ток несколько выше по сравнению с режимом слияния NDOFFMCOFF. |

Таблица 11 – BNO-055: частота при различных Fusion режимах

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Режим** | **Частота ввода** | | |  | **Частота вывода** | | | |
| **Acc** | **Mag** | **Gyro** | **Acc** | **Mag** | **Gyro** | **Fusion данные** |
| **IMU** | 100 | - | 100 | 100 | 100 | - | 100 | 100 |
| **COMPASS** | 20 | 20 | - | 20 | 20 | 20 | - | 20 |
| **M4G** | 50 | 50 | - | 50 | 50 | 50 | - | 50 |
| **NDOF\_FMC\_OFF** | 100 | 20 | 100 | 100 | 100 | 20 | 100 | 100 |
| **NDOF** | 100 | 20 | 100 | 100 | 100 | 20 | 100 | 100 |

**4.4. Переключение режимов работы в BNO-055**

Выбор режима работы осуществляется путем записи в регистр OPR MODE, возможные значения регистра и соответствующие им режимы работы приведены в таблице ниже.

Таблица 12 – Команды для переключения режимов BNO

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Значение** | **Значение региста** |
| CONFIGMODE | CONFIGMODE | [OPR\_MODE]: xxxx0000b |
| Non-Fusion Mode | ACCONLY | [OPR\_MODE]: xxxx0001b |
| MAGONLY | [OPR\_MODE]: xxxx0010b |
| GYRONLY | [OPR\_MODE]: xxxx0011b |
| ACCMAG | [OPR\_MODE]: xxxx0100b |
| ACCGYRO | [OPR\_MODE]: xxxx0101b |
| MAGGYRO | [OPR\_MODE]: xxxx0110b |
| AMG | [OPR\_MODE]: xxxx0111b |
| Fusion Mode | IMU | [OPR\_MODE]: xxxx1000b |
| COMPASS | [OPR\_MODE]: xxxx1001b |
| M4G | [OPR\_MODE]: xxxx1010b |
| NDOF\_FMC\_OFF | [OPR\_MODE]: xxxx1011b |
| NDOF | [OPR\_MODE]: xxxx1100b |

**5. Калибровка**

Калибровка необходимя для выявления погрешности измерений и выполняются отдельной программой. Поскольку такие неточности являются статичнымы мы можем поместить датчик в заранее известные положения, результат измерений в которых нам известен заранее, провести серию измерений, накопить полученные результаты и усреднить их, а затем выявленные смещения использовать для приближения показаний сенсора их к максимально истинным. Все рассмотренные IMU-сенсоры состоят из гироскопа, акселерометра и магнитометра, и каждый из них должен быть откалиброван индивидуально.

**5.1 Калибровка акселерометра**

Суть калибровки - поместить сенвор в такие условия, в которых остуствуют любые ускорения, кроме единственного, вызванного гравитационным полем Земли. Таким образом акселерометр, помещенный в состояние покоя две из его осей должны показывать ноль, а ось, совпадающая с вектором гравитации – единицу (1g). Проведя серию из измерений так, чтобы каждая ось акселерометра поочерёдно совпадала с вектором гравитации, мы получим необходимые нам для калибровки смещения.

**5.2 Калибровка гироскопа**

Суть калибровки - поместить гироскоп в состояние покоя. В таком положении датчик должен показывать нулевую угловую скорость по всем своим осям. Ненулевые значения при таком измерении будут нашими искомыми для калибровки отклонениями.

**5.3 Калибровка магнитометра**

Суть калибровки - выявить смещения магнитометра при взаимодействии с магнитным полем Земли. Поскольку на магнитометр действует не только это поле, но и другие статичные поля, вызывающие смещение измерений, следует минимизировать их воздействие на датчик. Для калибровки необходимо выполнить вращение «восьмеркой» вокруг всех осей датчика. Полученные значения и будут нашими искомыми отклонениями.

**5.4 Заключение**

После завершения калибровки полученные значения смещений должны быть записаны в файл. При следующем запуске сенсора во время инициализвации, когда происходит установка диапазонов и частот опроса, необходимо значения смещений из сохраненного файла считать и вычитать из всех получаемых с датчиков значений соответственно.