

Малогабаритный инерциальный навигационный модуль

Техническое описание

Версия 0.7

АО «ПКК Миландр»
2022

Содержание

1	Общее описание модуля.....	3
1.1	Характеристики	3
1.2	Системы координат	4
2	Конструкция и внешний вид.....	4
3	Схема подключения	5
4	Порядок информационного взаимодействия.....	5
4.1	Соответствие версии	5
4.2	Логика запуска и работы модуля.....	5
4.3	Структура регистров SPI.....	7
4.4	Информационный обмен по шине SPI.....	8
4.4.1	Аспекты алгоритма обработки транзакций по шине SPI	8
4.4.2	Аспекты записи и чтения регистров SPI.....	9
4.5	Запись в регистры	11
4.6	Регистры выходных данных	11
5	Описание регистров	12
5.1	Общий перечень регистров.....	12
5.1.1	Формат данных инерциальных датчиков	17
5.2	Угловая скорость	18
5.3	Ускорение	20
5.4	Магнитометры.....	21
5.5	Барометр.....	23
5.6	Кватернион и углы ориентации. Матрица ориентации.....	24
5.6.1	Кватернион и углы ориентации	24
5.6.2	Матрица ориентации	27
5.7	Температура в корпусе блока	29
5.8	Слово состояния	30
5.9	Версия и дата прошивки.....	31
5.10	Идентификационные данные модуля	32
5.11	Коэффициент децимации.....	32
5.12	Данные о координатах	33
5.12.1	Широта	33
5.12.2	Долгота	34
5.12.3	Высота над эллипсоидом	35
5.12.4	Порядок записи данных о координатах.....	36
5.12.5	Данные о высоте из внешнего источника	37
5.13	Данные о скоростях	38
5.13.1	Регистры с данными о скоростях	38
5.13.2	Запись данных о скоростях.....	40
5.14	Режим работы с внешними данными о координатах и скоростях	41
5.15	Слово состояния взаимодействия с внешним источником данных о координатах и скоростях	44
5.16	Слово признаков качества данных, принимаемых от приемника GNSS	46
5.17	Внешнее значение угла рыскания	47
5.18	Заданный режим работы модуля.....	48
5.19	Текущий режим работы модуля.....	48
5.20	Конфигурация модуля	49
5.21	Калибровка ДУС	52

5.21.1	Компенсация дрейфов.....	52
5.21.2	Коррекция масштабных коэффициентов	54
5.22	Калибровка акселерометров	56
5.22.1	Компенсация ненулей	56
5.22.2	Коррекция масштабных коэффициентов	59
5.23	Калибровка магнитометра	60
5.23.1	Компенсация hard-iron искажений.....	61
5.23.2	Коррекция soft-iron искажений	62
5.24	Магнитное склонение.....	65
5.25	Счетчик обновлений данных в программном буфере SPI	66
5.26	Команды управления.....	66
5.27	Регистр FNCTIO_CTRL: управление функцией линии GPS_T_PULSE.....	68
5.28	Обнаружение отказов.....	69
5.28.1	Логика определения отказов	69
5.28.2	Учет отказов датчиков в логике работы модуля	71
5.28.3	Обобщенные признаки отказов.....	71
5.28.4	Детализированные признаки отказов.....	73
6	Функции цифровых линий ввода-вывода	77
6.1	DIO1	77
6.2	DIO2	78
6.3	DIO3	78
7	Телеметрия на внешней SD-карте	79
7.1	Общие сведения.....	79
7.2	Порядок формирования файлов	79
7.3	Структура файла .tt.....	81
7.3.1	Структура заголовка	81
7.3.2	Порядок хранения данных	82

1 Общее описание модуля

Малогабаритный инерциальный навигационный модуль (МИНМ, модуль) функционально представляет собой курсовертикаль/бесплатформенную инерциальную навигационную систему (БИНС) с магнетометром, построенную на основе микроэлектромеханических инерциальных датчиков. При отсутствии внешней информационной поддержки работает в режиме курсовертикали с выдачей информации об угловых скоростях, кажущихся ускорениях, а также углах Эйлера-Крылова или соответствующего кватерниона ориентации; при передаче в модуль данных о начальных координатах относительно Земли МИНМ работает также в режиме БИНС с выдачей текущих счисляемых координат и скоростей относительно Земли. Высокая частота съёма информации с датчиков, первичная обработка инерциальной и другой информации позволяют проводить полное решение навигационной задачи с частотой до 1000 Гц. Частота оцифровывания датчиков — фиксированная, 5000 Гц. Предварительная цифровая спектральная обработка «сырых» данных датчиков позволяет уменьшить влияние вибраций для конкретного случая применения. Специальные алгоритмы комплексирования инерциальных, магнитометрического и барометрического датчиков позволяют сохранять точность счисления углов Эйлера-Крылова (или соответствующего кватерниона) на уровне менее $\pm 0.25^\circ$ в горизонте и $\pm 0.5^\circ$ по курсу при относительно неподвижном состоянии практически неограниченное время. При подключении МИНМ по каналу UART к прибору приёмника спутникового радионавигационного сигнала все точностные характеристики улучшаются, при этом блок по умолчанию переходит в режим БИНС.

1.1 Характеристики

Диапазон измеряемых угловых скоростей, по каждой из 3-х осей: $\pm 450^\circ/\text{с}$ или $\pm 250^\circ/\text{с}$ в зависимости от варианта исполнения.

Диапазон измеряемых кажущихся линейных ускорений, по каждой из 3-х осей: $\pm 100 \text{ м/с}^2$ или $\pm 50 \text{ м/с}^2$ в зависимости от варианта исполнения;

Диапазон измеряемого атмосферного давления: 30...110 кПа;

Диапазоны счисляемых углов Эйлера-Крылова, курс, крен и тангаж соответственно: $\pm 180^\circ$, $\pm 180^\circ$, $\pm 90^\circ$.

Интерфейсы для взаимодействия с внешними устройствами: SPI для связи с потребителем, UART для связи с модулем GNSS $\mu\text{Blox NEO-8P}$.

Напряжение питания модуля: 3,3 В, потребляемый ток, не более: 0,4 А.

Возможность записи телеметрической информации на съемную microSD-карту, т.е. работа функции «черный ящик».

Датчики калибруются после установки в модуль, в том числе в температурном диапазоне, на данный момент от минус 60°C до $+80^\circ\text{C}$. Акселерометры — по смещению нуля, масштабному коэффициенту и углам неортогональности. Датчики угловой

скорости — по смещению нуля, масштабному коэффициенту и воздействию линейного ускорения. Магнетометр — по смещению нуля, масштабному коэффициенту и углам неортогональности. При этом для каждой оси акселерометров и ДУС используется несколько датчиков, каждый из которых имеет свои собственные калибровочные характеристики, хранящиеся в ПМО.

1.2 Системы координат

В «Техническом описании» используются следующие системы координат:

- связанная система координат (ССК) — система координат, связанная с корпусом модуля. Определяется правой тройкой векторов, точка начала координат лежит в центре масс модуля, направления осей показаны на рисунке ниже;
- нормальная система координат (НСК) — система координат, связанная одновременно с корпусом модуля и с Землей: точка начала координат лежит в центре масс модуля, ось Y направлена вверх по местной вертикали, ось X — на север, ось Z — на восток.

2 Конструкция и внешний вид

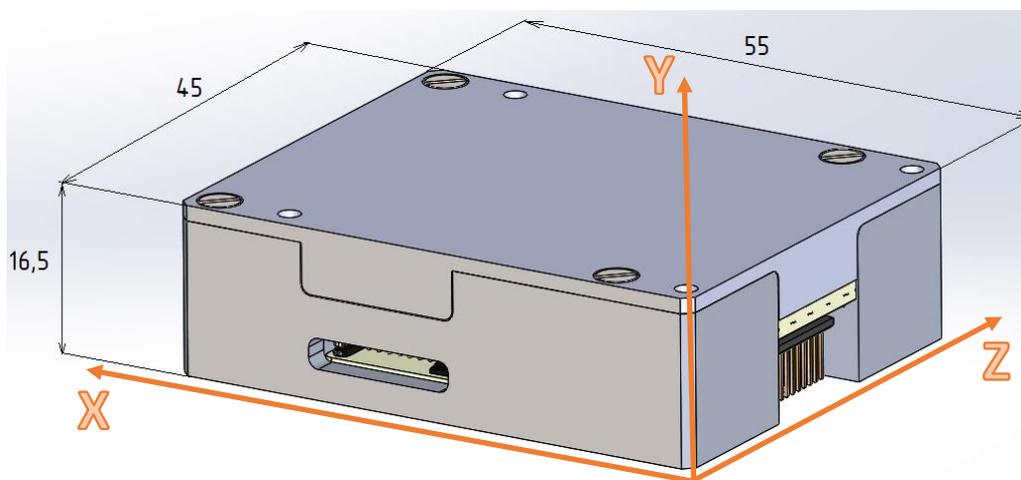


Рис. 2.1 Внешний вид и габариты модуля

Представленная на рисунке конструкция модуля предназначена для установки на печатную плату с креплением с помощью четырех винтов M2. Все модификации МИНМ, вне зависимости от измеряемого диапазона угловой скорости или кажущегося ускорения, имеют одинаковую конструкцию.

3 Схема подключения

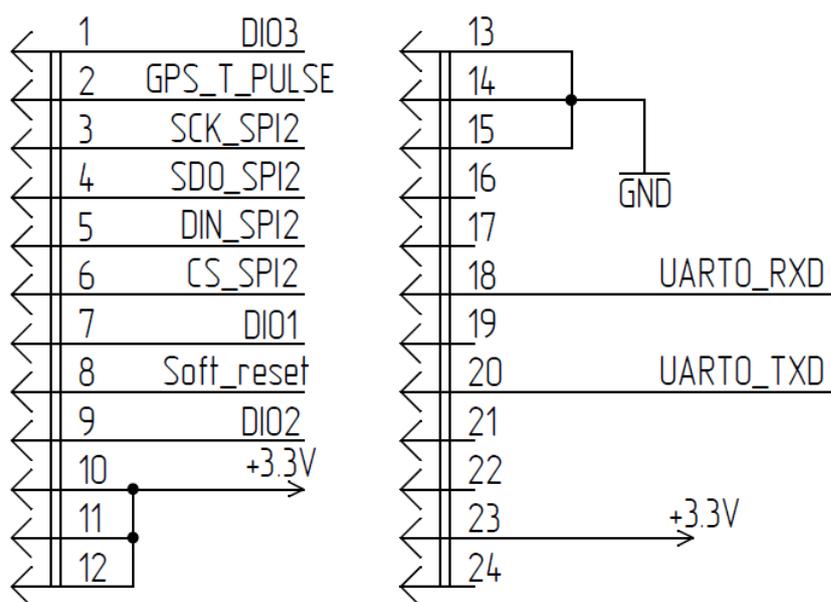


Рис. 3.1

4 Порядок информационного взаимодействия

4.1 Соответствие версии

Текущая версия документа актуальна для версии 182 прошивки.

4.2 Логика запуска и работы модуля

После подачи питания последовательно выполняется:

- инициализация аппаратных составных частей;
- инициализация потоков исполнения, отвечающих за различные аспекты работы модуля (запись телеметрии, первичной обработки данных с датчиков, основного цикла расчетов и др.);
- запуск информационного обмена по SPI.

Характерная длительность исполнения всего этого перечня задач составляет 0,95 с.

Затем на протяжении 0,5 с. выполняется калибровка калькулятора загрузки процессора, в ходе которого все остальные потоки исполнения остановлены. В это время возможно чтение регистров по SPI, но результат записи непредсказуем: по завершении калибровки калькулятора все остальные потоки начинают исполнение, и в них, в том числе, выполняется инициализация и/или сброс различных буферов, связанных с обменом по SPI. В силу этого часть записанных через SPI данных может быть утеряна.

Далее на протяжении еще 0,6 с. происходит выдача аппаратных тестовых сигналов на акселерометры и ДУС. В это время возможна результирующая запись в регистры SPI, в

том числе — в регистры, определяющие выбор того или иного внутреннего алгоритма работы модуля, такие, как EXT_DATA_SRC (Таблица 5.75), SYS_MODE_REQ (Таблица 5.80) и EKF_CNFG (в части выбора алгоритма коррекции угла рыскания, Таблица 5.82). В этот период времени основные вычисления еще не выполняются. Определить момент начала процедуры калибровки можно, считывая в состоянии покоя модуля значение какого-либо из регистров X_ACCL_OUT (Таблица 5.9), Y_ACCL_OUT (Таблица 5.10) и Z_ACCL_OUT (Таблица 5.11): в момент запуска калибровки, при условии исправности датчиков, их показания скачком изменяются — для X_ACCL_OUT возрастают, для Y_ACCL_OUT и Z_ACCL_OUT падают — на величину порядка 7.5-9 м/с² (для варианта модуля, оснащенного акселерометрами с диапазоном чувствительности 10 g;).

По снятии аппаратных калибровочных сигналов начинается исполнение основных циклов вычислений модуля, при этом модуль проходит ряд режимов работы. Текущий режим может быть получен чтением регистра SYS_MODE_CURR (Таблица 5.81). Долговременный режим, которого модуль пытается достичь, определяется значением регистра SYS_MODE_REQ (Таблица 5.80), и это может быть либо режим курсовертикали (численное значение 1), либо режим БИНС (численное значение 2). Для достижения режима 2 модуль должен пройти через режим 1. По умолчанию в качестве заданного режима установлен режим 2, «БИНС».

Начальный режим работы имеет численное значение 0, и представляет собой процесс инициализации курсовертикали. Инициализация состоит из определения начальных углов крена и тангажа по данным акселерометрического инклинометра, при условии невозмущенности акселерометров. Затем следует определение начального значения угла курса в соответствии с установленным по умолчанию или заданным через SPI методом коррекции угла и оценки дрейфа в канале рыскания (см. описание регистра EKF_CNFG в части выбора алгоритма коррекции угла рыскания, Таблица 5.82).

После получения значений для всех трёх углов ориентации курсовертикаль переходит в основной режим работы, и далее выполняет счисление углов ориентации в предположении, что модуль размещается на широте 0°. Это — режим работы 1, «курсовертикаль».

Если при работе модуля в режиме курсовертикали модуль получает данные о координатах из источника, определенного значением регистра EXT_DATA_SRC (Таблица 5.75), то эти данные используются для уточнения счисления углов за счет более точного учета вращения Земли.

Если заданный режим работы модуля — 2, «БИНС», то модуль, продолжая счисление в режиме курсовертикали, дожидается получения блока данных о координатах и скоростях из источника, определенного значением регистра EXT_DATA_SRC. По получении таких данных запускается полный алгоритм БИНС, обеспечивающий счисление и углов ориентации, и координат со скоростями: модуль достигает режима 2, «БИНС». В этом режиме дальнейшие данные о координатах и скоростях из источника, определенного значением регистра EXT_DATA_SRC, используются для коррекции счисляемых инерциально координат и скоростей и, при наличии подходящих условий движения, углов крена и тангажа.

Рекомендуемая частота передачи внешних данных о координатах и скоростях в модуль — 1 Гц.

4.3 Структура регистров SPI

Регистры данных и порт SPI обеспечивают информационный обмен между модулем и внешней системой, использующей его. Регистры модуля содержат как выходные данные, так и управляющие слова, а также слова для передачи в модуль внешних («объективных») данных.

Выходные регистры содержат данные с датчиков, данные о координатах и скоростях, слово признаков ошибок, данные идентификации модуля, слова режимов и состояний и др. Управляющие регистры обеспечивают установку и считывание различных параметров работы модуля: частоты исполнения цикла расчета, требуемого режима работы и др. Регистры передачи в модуль «объективных» данных дают возможность заносить в модуль данные о координатах, скоростях и угле рыскания, получаемые с внешнего источника, например, с модуля GPS.

Регистры реализованы в виде набора из 13 страниц по 64 регистра в каждой. Размер каждого регистра — 16 бит, каждый регистр имеет уникальный адрес в пределах той страницы, которой он принадлежит. Обмен по SPI-порту выполняется с данными только одной из страниц, которая предварительно выбирается путем записи номера страницы в регистр PAGE_ID текущей выбранной страницы. Для упрощения задачи переключения страниц регистр PAGE_ID на всех страницах имеет один и тот же адрес, «0». Чтение регистра PAGE_ID возвращает номер текущей выбранной страницы. В таблице ниже показан перечень номеров страниц с пояснением основных характеристик данных, хранящихся в данной странице.

Таблица 4.1 Страницы регистров SPI

Страница	PAGE_ID	Характеристика данных
0	0x00	Данные датчиков, идентификация
1	0x01	Координаты, скорости, режимы работы
2	0x02	Калибровочные значения
3	0x03	Управление: частота расчетов, слово признаков
4	0x04	Серийный номер
5..12	0x05..0x0C	Резерв

4.4 Информационный обмен по шине SPI

Шина SPI обеспечивает полнодуплексную связь, что позволяет внешнему устройству записывать данные в модуль, одновременно считывая запрошенные ранее данные, если предыдущая команда была запросом на чтение.

Модуль работает как ведомое устройство на шине. Режим работы шины SPI — 3 (CPOL = 1, CPHA = 1), размер слова (пакета) — 16 бит, передача пакета — старшим битом вперед. Максимальная частота тактового сигнала SPI (SCLK) — 5 МГц. Минимальная длительность паузы между пакетами, от заднего фронта последнего импульса SCLK одного пакета до переднего фронта первого импульса SCLK следующего пакета (t_{STALL}) — 6 мкс; это время необходимо на обработку принятого запроса и помещение ответного слова данных в аппаратный выходной регистр блока SPI цифрового сигнального процессора, на котором реализован модуль.

4.4.1 Аспекты алгоритма обработки транзакций по шине SPI

Поскольку модуль исполняет роль ведомого устройства на шине, то он не может управлять ходом информационного обмена. При этом обработка запросов, поступающих от устройства-мастера, может занимать различное время как ввиду специфики самих запросов, так и ввиду аппаратной организации системы прерываний в цифровом сигнальном процессоре, лежащем в основе модуля. В силу этого возможно возникновение ситуации перекрытия запросов: мастер-устройство может начать очередную транзакцию до того, как модуль закончил подготовку данных в ответ на предыдущую транзакцию, причем за время подготовки данных модулем таких «ранних» транзакций может случиться несколько. Это приводит одновременно к следующим последствиям:

- в ходе каждой такой транзакции на вход мастер-устройства передаются «мусорные» данные, забираемые аппаратурой SPI модуля из своего пустого на тот момент аппаратного выходного буфера, при этом аппаратура SPI модуля фиксирует факт передачи данных мастеру из пустого буфера;

- во входном буфере SPI блока накапливаются необработанные запросы, переданные мастер-устройством;

- в некоторых условиях и в выходном буфере SPI блока остаются неотправленные данные.

В таких условиях алгоритм обработки запросов нацелен на то, чтобы:

- при обнаружении перекрытия запросов уведомить пользователя о недостоверности принятых им данных;

- обеспечить корректный ответ на последнее из слов, находящихся в аппаратном входном буфере. В случае штатного хода информационного обмена последнее из слов является также единственным во входном буфере, а в ситуации перекрытия на все запросы, кроме последнего в очереди, мастер-устройством уже получены «мусорные» ответы. В этом случае готовить данные для всех запросов, кроме последнего, бессмысленно.

Таким образом, процедура обработки запроса, принятого по SPI, имеет следующие основные этапы:

- переводится в высокий уровень аппаратный сигнал готовности данных в выходном буфере SPI модуля (DIO1, Таблица 6.1);
- из входного буфера аппаратуры SPI считываются все имеющиеся слова; все слова, кроме последнего, отбрасываются;
- очищается выходной буфер аппаратуры SPI;
- производится обработка принятого слова и подготовка выходного слова, в том числе устанавливается признак ошибки SPI в регистре SYS_E_FLAG (слово состояния модуля);
- выходное слово передается в выходной буфер аппаратуры SPI;
- переводится в низкий уровень аппаратный сигнал готовности данных в выходном буфере SPI модуля (DIO1).

В связи со всем перечисленным рекомендуется вести обмен по шине SPI с учетом состояния аппаратного сигнала готовности выходных данных SPI (DIO1, передний фронт соответствует началу обработки данных, принятых в завершившейся транзакции SPI, задний фронт — факту готовности данных в выходном аппаратном буфере, т.е. готовности аппаратуры SPI к приему следующего запроса с одновременной передачей ответа на предыдущий).

При отсутствии возможности использовать аппаратный сигнал готовности данных алгоритм информационного обмена может быть следующим: основной набор данных передается в серии транзакций со штатной длительностью пауз между ними (6 мкс). Затем выполняется запрос регистра SYS_E_FLAG (Таблица 5.46), за которым следует пауза увеличенной длительности, 20 мкс, чтобы гарантировать, что обработка этого запроса будет завершена корректно независимо от возможных задержек. Если бит №3 слова SYS_E_FLAG («Ошибка связи по SPI») установлен в «1», это означает, что обнаружено перекрытие запросов и в какой-то части принятые мастером данные оказались «мусорными». В этом случае необходимо отбросить все принятые данные и провести серию транзакций вновь, с последующим повторным контролем состояния регистра SYS_E_FLAG.

4.4.2 Аспекты записи и чтения регистров SPI

При работе с регистрами SPI необходимо иметь в виду, что для большинства записываемых регистров (или групп регистров, если раздельное использование значений регистров, входящих в группу, невозможно в рамках логики выполнения расчетов модулем) принятые по SPI данные буферизуются в промежуточных хранилищах до момента начала очередного цикла вычислений курсовертикали/БИНС, если иное не сказано в описании регистра. В начале очередного цикла вычислений все вновь поступившие к этому моменту буферизованные величины считываются и принимаются в работу.

Кроме того, в системе существует программный буфер выходных значений регистров SPI, цель которого — обеспечить согласованность считываемых данных в смысле принадлежности их к одному и тому же циклу вычислений модуля, и отсутствие зависимости значений считываемых данных от текущей стадии процесса расчета в случае, когда считывание приходится на момент выполнения очередного цикла вычислений, в ходе которого расчетные значения в модуле изменяются. Этот программный буфер обновляется по завершении каждого очередного цикла вычислений. В ходе обновления в этот буфер передаются, в том числе, и те данные, что ранее поступили по SPI и были буферизованы, а затем использованы в текущем цикле.

В силу всего сказанного, результатом чтения регистра, в который только что была выполнена запись, будет, в общем случае, получение не вновь записанного в регистр значения, а предыдущего такого значения (или значения по умолчанию, если запись в регистр еще не производилась), поскольку именно это значение хранится в еще не обновленном буфере выходных значений. Вновь записанное значение окажется доступным для чтения только после завершения процедуры обновления программного буфера выходных значений, при условии, что записанное значение было считано модулем из входного буфера и использовано в завершившемся цикле вычислений; в противном случае перенос записанного значения в выходной буфер задерживается еще на один цикл.

Учтите, что при переключении модуля в режим внешней синхронизации модуль переходит в этот режим непосредственно в ходе обработки соответствующего командного слова, принятого по SPI, а не в ближайшем цикле вычислений. При этом текущий цикл вычислений, если он уже начался, будет продолжен, но в общем случае нет возможности гарантировать, что значения прочих параметров, переданные в модуль к этому моменту, уже были приняты в работу, и что их выходные значения будут поэтому обновлены в ходе ближайшей процедуры обновления программного модуля. И так как модуль переключен на режим внешней синхронизации, то с этого момента выполнение всех следующих тактов опроса датчиков и циклов расчета — а, следовательно, и обновление программного буфера SPI, — зависит от того, подается или не подается на модуль сигнал внешней синхронизации. В частности, при чтении регистра управления внешней синхронизацией после подачи в него команды перехода на внешнюю синхронизацию его обновленное значение не будет возвращено до тех пор, пока модулем не будет принято нужное количество внешних тактов синхронизации, достаточное для выполнения очередного цикла расчетов и завершения его.

Для определения моментов начала и окончания процедуры обновления программного буфера выходных значений регистров SPI следует анализировать состояние регистра счетчика обновлений данных SPI (SPI_UPD_CNT, Таблица 5.121): смена его значения на нечетное соответствует началу процедуры обновления выходного буфера. Значение регистра SPI_UPD_CNT сохраняется нечетным до конца процедуры обновления. Чтение из иных регистров в это время может привести к получению несогласованных данных: часть регистров будет возвращать данные, относящиеся к предыдущему циклу расчетов, часть — к только что завершившемуся. Кроме того, для 32-битных регистров возможно также, что одно из полуслов регистра будет содержать данные из предыдущего цикла расчетов, а второе — из нового.

По завершении обновления буфера счетчик SPI_UPD_CNT увеличивается еще на единицу, снова становясь четным, и сохраняет это значение до начала следующей процедуры обновления буфера. Пока значение счетчика остается четным, чтение регистров SPI будет гарантированно возвращать согласованный результат, в смысле принадлежности всех данных к одному и тому же циклу вычислений модуля.

4.5 Запись в регистры

Через SPI возможно выполнять запись в управляющие регистры и в регистры, принимающие «внешние» данные (координаты и скорости, угол рыскания), по одному байту за одну операцию записи. Каждый из регистров устройства имеет разрядность 16 бит, при этом младшим адресом, представленным в таблице, адресуется байт, соответствующий младшим 8 бит регистра, указанным в таблице, а следующим за ним со сдвигом 1, старшим адресом — байт, соответствующий старшим 8 битам регистра. Для записи в 16-битный регистр необходимо выполнить последовательно запись сначала в младший байт регистра, а затем — в старший байт. Единственный регистр, значение которого можно изменить записью одиночного байта — это регистр PAGE_ID каждой страницы.

Для формирования команды записи самый старший бит 16-битного слова данных, передаваемого в SPI, должен быть установлен в «1». Следующие 7 бит содержат адрес изменяемого регистра, а остальные, младшие 8 бит передаваемого слова, содержат байт данных, записываемый по указанному адресу.

4.6 Регистры выходных данных

По завершении инициализации обмена по SPI модуля его регистр PAGE_ID содержит значение 0x0000. Это соответствует фактически установленной активной странице №0 (она содержит, например, выходные данные датчиков, углы ориентации модуля, регистр идентификатора модуля и др.). Чтобы получить доступ к данным страницы №0 после доступа к данным любой другой страницы, запишите значение 0x00 в регистр PAGE_ID текущей активной страницы (необходимое для этого значение слова данных: 0x8000).

Чтение данных из одиночного регистра требует выполнения двух 16-битных циклов обмена данными по SPI:

- в ходе первого цикла в модуль передается адрес регистра, данные из которого требуется получить;
- в ходе следующего затем цикла принимаются данные, подготовленные модулем после обработки запроса из цикла №1.

При этом в первом цикле старший бит передаваемого слова данных устанавливается в 0, формируя тем самым команду на чтение из регистра; следующие, младшие 7 бит, должны содержать адрес запрашиваемого регистра. Младшие 8 бит могут иметь произвольное значение: при операции чтения они игнорируются.

Во втором цикле пары в качестве слова данных может быть передан 0, как значение, не являющее никакой командой. Однако на практике обычно требуются сведения от

группы, состоящей из сразу нескольких логически связанных регистров с одной страницы, т.е. данные нужны «пакетами». Поэтому во втором цикле целесообразно передавать в качестве слова данных команду чтения очередного регистра: таким образом, пользователем в этом цикле, помимо получения данных, запрошенных в первом цикле, окажутся также запрошены (и затем, в ходе обработки запроса модулем, подготовлены к дальнейшей выдаче) данные из очередного регистра. Получить их можно будет в ходе следующего, третьего цикла обмена — и так далее, достигая в итоге близкого к двухкратному значения экономии по общему количеству необходимых запросов.

Для проверки связи по интерфейсу SPI рекомендуется выполнять последовательность запросов на чтение регистра PROD_ID страницы 0 (Таблица 5.50): его значение неизменно и равно 16480₁₀ (0x4060).

5 Описание регистров

5.1 Общий перечень регистров

Таблица 5.1 Общий перечень регистров

ID	R/W	PAGE_ID	Адрес	Значение по умолчанию	Описание
PAGE_ID	R/W	0x00	0x00	0x00	Номер страницы
Резерв	-	0x00	с 0x02 по 0x06	-	Резерв
SYS_E_FLAG	R	0x00	0x08	0x0000	Слово состояния модуля
Резерв	-	0x00	с 0x0A по 0x0C	-	Резерв
TEMP_OUT	R	0x00	0x0E	-	Температура в корпусе
X_GYRO_LOW	R	0x00	0x10	-	Угловая скорость по оси X ССК, младшие 16 бит
X_GYRO_OUT	R	0x00	0x12	-	Угловая скорость по оси X ССК, старшие 16 бит
Y_GYRO_LOW	R	0x00	0x14	-	Угловая скорость по оси Y ССК, младшие 16 бит
Y_GYRO_OUT	R	0x00	0x16	-	Угловая скорость по оси Y ССК, старшие 16 бит
Z_GYRO_LOW	R	0x00	0x18	-	Угловая скорость по оси Z ССК, младшие 16 бит
Z_GYRO_OUT	R	0x00	0x1A	-	Угловая скорость по оси Z ССК, старшие 16 бит
X_ACCL_LOW	R	0x00	0x1C	-	Ускорение по оси X, младшие 16 бит
X_ACCL_OUT	R	0x00	0x1E	-	Ускорение по оси X, старшие 16 бит
Y_ACCL_LOW	R	0x00	0x20	-	Ускорение по оси Y, младшие 16 бит
Y_ACCL_OUT	R	0x00	0x22	-	Ускорение по оси Y, старшие 16 бит
Z_ACCL_LOW	R	0x00	0x24	-	Ускорение по оси Z, младшие 16 бит
Z_ACCL_OUT	R	0x00	0x26	-	Ускорение по оси Z, старшие 16 бит
X_MAGN_OUT	R	0x00	0x28	-	Показания магнитометра по оси X
Y_MAGN_OUT	R	0x00	0x2A	-	Показания магнитометра по оси Y
Z_MAGN_OUT	R	0x00	0x2C	-	Показания магнитометра по оси Z

ID	R/W	PAGE_ID	Адрес	Значение по умолчанию	Описание
BAROM_LOW	R	0x00	0x2E	-	Показания барометра, младшие 16 бит
BAROM_OUT	R	0x00	0x30	-	Показания барометра, старшие 16 бит
ACCL_FAIL_X12	R	0x00	0x32	-	Детализированные признаки отказов акселерометров №1 и №2 по оси X
ACCL_FAIL_X34	R	0x00	0x34	-	Детализированные признаки отказов акселерометров №3 и №4 по оси X
ACCL_FAIL_Y12	R	0x00	0x36	-	Детализированные признаки отказов акселерометров №1 и №2 по оси Y
ACCL_FAIL_Y34	R	0x00	0x38	-	Детализированные признаки отказов акселерометров №3 и №4 по оси Y
ACCL_FAIL_Z12	R	0x00	0x3A	-	Детализированные признаки отказов акселерометров №1 и №2 по оси Z
ACCL_FAIL_Z34	R	0x00	0x3C	-	Детализированные признаки отказов акселерометров №3 и №4 по оси Z
Резерв	-	0x00	0x3E	-	Резерв
ACCL_FAIL_SUMM	R	0x00	0x40	-	Обобщенные признаки отказа акселерометров
GYRO_FAIL_SUMM	R	0x00	0x42	-	Обобщенные признаки отказа ДУСов
MISC_FAIL_SUMM	R	0x00	0x44	-	Обобщенные признаки отказа магнетометров, термометров и бародатчика
OTHER_FAIL_SUMM	R	0x00	0x46	-	Прочие обобщенные признаки отказов
GYRO_FAIL_X12	R	0x00	0x48	-	Детализированные признаки отказов ДУС №1 и №2 по оси X
GYRO_FAIL_X34	R	0x00	0x4A	-	Детализированные признаки отказов ДУС №3 и №4 по оси X
GYRO_FAIL_Y12	R	0x00	0x4C	-	Детализированные признаки отказов ДУС №1 и №2 по оси Y
GYRO_FAIL_Y34	R	0x00	0x4E	-	Детализированные признаки отказов ДУС №3 и №4 по оси Y
GYRO_FAIL_Z12	R	0x00	0x50	-	Детализированные признаки отказов ДУС №1 и №2 по оси Z
GYRO_FAIL_Z34	R	0x00	0x52	-	Детализированные признаки отказов ДУС №3 и №4 по оси Z
MAGN_FAIL_XY	R	0x00	0x54	-	Детализированные признаки отказов магнитометров осей X и Y
MAGN_Z_BARO_FAIL	R	0x00	0x56	-	Детализированные признаки отказов магнитометра по оси Z и барометра
TEMP_FAIL_12	R	0x00	0x58	-	Детализированные признаки отказов «аналоговых» термометров №1 и №2
TEMP_FAIL_3DIG	R	0x00	0x5A	-	Детализированные признаки отказов «аналогового» термометра №3 и «цифрового» термометра
Резерв	-	0x00	с 0x5C по 0x5E	-	Резерв
Q0_C11_OUT	R	0x00	0x60	-	Компонент λ_0 кватерниона ориентации или элемент [1,1] матрицы ориентации
Q1_C12_OUT	R	0x00	0x62	-	Компонент λ_1 кватерниона ориентации или элемент [1,2] матрицы ориентации
Q2_C13_OUT	R	0x00	0x64	-	Компонент λ_2 кватерниона ориентации или элемент [1,3] матрицы ориентации
Q3_C21_OUT	R	0x00	0x66	-	Компонент λ_3 кватерниона ориентации или элемент [2,1] матрицы ориентации

ID	R/W	PAGE_ID	Адрес	Значение по умолчанию	Описание
C22_OUT	R	0x00	0x68	-	Элемент [2,2] матрицы ориентации
ROLL_C23_OUT	R	0x00	0x6A	-	Угол крена или элемент [2,3] матрицы ориентации
PITCH_C31_OUT	R	0x00	0x6C	-	Угол тангажа или элемент [3,1] матрицы ориентации
YAW_C32_OUT	R	0x00	0x6E	-	Угол рыскания или элемент [3,2] матрицы ориентации
C33_OUT	R	0x00	0x70	-	Элемент [3,3] матрицы ориентации
Резерв	-	0x00	с 0x72 по 0x74	-	Резерв
SPI_UPD_CNT	R	0x00	0x76	0x0000	Счетчик обновлений данных в программном буфере SPI
Резерв	-	0x00	с 0x78 по 0x7C	-	Резерв
PROD_ID	R	0x00	0x7E	0x4060	Идентификационный номер изделия
PAGE_ID	R/W	0x01	0x00	0x00	Номер страницы
Резерв	-	0x01	с 0x02 по 0x0E	-	Резерв
LATITUDE_LOW	R/W	0x01	0x10	0x0000	Широта, младшие 16 бит
LATITUDE_OUT	R/W	0x01	0x12	0x0000	Широта, старшие 16 бит
HABS_LOW	R/W	0x01	0x14	0x0000	Высота над эллипсоидом, младшие 16 бит
HABS_OUT	R/W	0x01	0x16	0x0000	Высота над эллипсоидом, старшие 16 бит
LONGITUDE_LOW	R/W	0x01	0x18	0x0000	Долгота, младшие 16 бит
LONGITUDE_OUT	R/W	0x01	0x1A	0x0000	Долгота, старшие 16 бит
VN_LOW	R/W	0x01	0x1C	0x0000	Северная скорость, младшие 16 бит
VN_OUT	R/W	0x01	0x1E	0x0000	Северная скорость, старшие 16 бит
VH_LOW	R/W	0x01	0x20	0x0000	Вертикальная скорость, младшие 16 бит
VH_OUT	R/W	0x01	0x22	0x0000	Вертикальная скорость, старшие 16 бит
VE_LOW	R/W	0x01	0x24	0x0000	Восточная скорость, младшие 16 бит
VE_OUT	R/W	0x01	0x26	0x0000	Восточная скорость, старшие 16 бит
VGND_LOW	R	0x01	0x28	0x0000	Путевая скорость, младшие 16 бит
VGND_OUT	R	0x01	0x2A	0x0000	Путевая скорость, старшие 16 бит
EXT_DATA_SRC	R/W	0x01	0x2C	0x0003	Режим работы с внешними данными о координатах и скоростях
EDS_COMM_STATE	R	0x01	0x2E	0x0000	Состояние взаимодействия с источником внешних данных о координатах и скоростях
GPS_DATA_QUALITY_FLAGS	R	0x01	0x30	0x0000	Слово признаков качества данных, получаемых от приемника GNSS
YAW_EXT	R/W	0x01	0x32	0x0000	Внешнее значение угла рыскания
SYS_MODE_REQ	R/W	0x01	0x34	0x0002	Заданный режим работы модуля
SYS_MODE_CURR	R	0x01	0x36	0x0000	Текущий режим работы модуля
MAGN_NORM_OUT	R	0x01	0x38	0x0000	Евклидова норма величины регистрируемого магнитного поля
HABS_EXT_SRC	R/W	0x01	0x3A	0x0000	Тип внешнего источника данных о высоте
HABS_EXT_LOW	R/W	0x01	0x3C	0x0000	Значение высоты над эллипсоидом из внешнего источника, младшие 16 бит
HABS_EXT_OUT	R/W	0x01	0x3E	0x0000	Значение высоты над эллипсоидом из внешнего источника, старшие 16 бит

ID	R/W	PAGE_ID	Адрес	Значение по умолчанию	Описание
Резерв	-	0x01	с 0x40 по 0x7E	-	Резерв
PAGE_ID	R/W	0x02	0x00	0x00	Номер страницы
Резерв	-	0x00	0x02	-	Резерв
X_GYRO_SCALE	R/W	0x02	0x04	0x0000	Масштабный коэффициент ДУС по оси X ССК
Y_GYRO_SCALE	R/W	0x02	0x06	0x0000	Масштабный коэффициент ДУС по оси Y ССК
Z_GYRO_SCALE	R/W	0x02	0x08	0x0000	Масштабный коэффициент ДУС по оси Z ССК
X_ACCL_SCALE	R/W	0x02	0x0A	0x0000	Масштабный коэффициент акселерометра по оси X ССК
Y_ACCL_SCALE	R/W	0x02	0x0C	0x0000	Масштабный коэффициент акселерометра по оси Y ССК
Z_ACCL_SCALE	R/W	0x02	0x0E	0x0000	Масштабный коэффициент акселерометра по оси Z ССК
XG_BIAS_LOW	R/W	0x02	0x10	0x0000	Величина компенсации дрейфа (ненуля) ДУС по оси X ССК, младшие 16 бит
XG_BIAS_HIGH	R/W	0x02	0x12	0x0000	Величина компенсации дрейфа (ненуля) ДУС по оси X ССК, старшие 16 бит
YG_BIAS_LOW	R/W	0x02	0x14	0x0000	Величина компенсации дрейфа (ненуля) ДУС по оси Y ССК, младшие 16 бит
YG_BIAS_HIGH	R/W	0x02	0x16	0x0000	Величина компенсации дрейфа (ненуля) ДУС по оси Y ССК, старшие 16 бит
ZG_BIAS_LOW	R/W	0x02	0x18	0x0000	Величина компенсации дрейфа (ненуля) ДУС по оси Z ССК, младшие 16 бит
ZG_BIAS_HIGH	R/W	0x02	0x1A	0x0000	Величина компенсации дрейфа (ненуля) ДУС по оси Z ССК, старшие 16 бит
XA_BIAS_LOW	R/W	0x02	0x1C	0x0000	Величина компенсации нуля акселерометра по оси X ССК, младшие 16 бит
XA_BIAS_HIGH	R/W	0x02	0x1E	0x0000	Величина компенсации нуля акселерометра по оси X ССК, старшие 16 бит
YA_BIAS_LOW	R/W	0x02	0x20	0x0000	Величина компенсации нуля акселерометра по оси Y ССК, младшие 16 бит
YA_BIAS_HIGH	R/W	0x02	0x22	0x0000	Величина компенсации нуля акселерометра по оси Y ССК, старшие 16 бит
ZA_BIAS_LOW	R/W	0x02	0x24	0x0000	Величина компенсации нуля акселерометра по оси Z ССК, младшие 16 бит
ZA_BIAS_HIGH	R/W	0x02	0x26	0x0000	Величина компенсации нуля акселерометра по оси Z ССК, старшие 16 бит
HARD_IRON_X	R/W	0x02	0x28	0x0000	Величина компенсации нуля (hard-iron искажений) магнитометра по оси X ССК

ID	R/W	PAGE_ID	Адрес	Значение по умолчанию	Описание
HARD_IRON_Y	R/W	0x02	0x2A	0x0000	Величина компенсации ненуля (hard-iron искажений) магнитометра по оси Y ССК
HARD_IRON_Z	R/W	0x02	0x2C	0x0000	Величина компенсации ненуля (hard-iron искажений) магнитометра по оси Z ССК
SOFT_IRON_S11	R/W	0x02	0x2E	0x0000	Элемент (1,1) матрицы компенсации soft-iron искажений магнитометра
SOFT_IRON_S12	R/W	0x02	0x30	0x0000	Элемент (1,2) матрицы компенсации soft-iron искажений магнитометра
SOFT_IRON_S13	R/W	0x02	0x32	0x0000	Элемент (1,3) матрицы компенсации soft-iron искажений магнитометра
SOFT_IRON_S21	R/W	0x02	0x34	0x0000	Элемент (2,1) матрицы компенсации soft-iron искажений магнитометра
SOFT_IRON_S22	R/W	0x02	0x36	0x0000	Элемент (2,2) матрицы компенсации soft-iron искажений магнитометра
SOFT_IRON_S23	R/W	0x02	0x38	0x0000	Элемент (2,3) матрицы компенсации soft-iron искажений магнитометра
SOFT_IRON_S31	R/W	0x02	0x3A	0x0000	Элемент (3,1) матрицы компенсации soft-iron искажений магнитометра
SOFT_IRON_S32	R/W	0x02	0x3C	0x0000	Элемент (3,2) матрицы компенсации soft-iron искажений магнитометра
SOFT_IRON_S33	R/W	0x02	0x3E	0x0000	Элемент (3,3) матрицы компенсации soft-iron искажений магнитометра
Резерв	-	0x02	с 0x40 по 0x7E	-	Резерв
PAGE_ID	R/W	0x03	0x00	0x00	Номер страницы
GLOB_CMD	R/W	0x03	0x02	0x00	Команды управления
Резерв	-	0x03	0x04	-	Резерв
FNCTIO_CTRL	R/W	0x03	0x06	0x00	Настройка функций портов ввода-вывода
Резерв	-	0x03	с 0x08 по 0x0A	-	Резерв
DEC_RATE	R/W	0x03	0x0C	0x19	Коэффициент децимации частоты выполнения расчетов по отношению к частоте съема данных с датчиков или частоте внешнего сигнала синхронизации
Резерв	-	0x03	с 0x0E по 0x4E	-	Резерв
EKF_CNFG	R/W	0x03	0x50	0x2108	Конфигурация модуля
Резерв	-	0x03	0x52	-	Резерв
DECLN_ANGL	R/W	0x03	0x54	0x0888	Величина магнитного склонения
Резерв	-	0x03	с 0x56 по 0x76	-	Резерв
FIRM_REV	R	0x03	0x78	-	Номер версии прошивки
FIRM_DM	R	0x03	0x7A	-	День и месяц создания прошивки
FIRM_Y	R	0x03	0x7C	-	Год создания прошивки
Резерв	-	0x03	0x7E	-	Резерв
PAGE_ID	R/W	0x04	0x00	0x00	Номер страницы
Резерв	-	0x04	с 0x02 по 0x1E	-	Резерв
SERIAL_NUM	R	0x04	0x20	-	Серийный номер блока

ID	R/W	PAGE_ID	Адрес	Значение по умолчанию	Описание
Резерв	-	0x04	с 0x22 по 0x7E	-	Резерв
PAGE_ID	R/W	0x05	0x00	0x00	Номер страницы
Резерв	-	0x05	с 0x02 по 0x7E	-	Резерв
PAGE_ID	R/W	0x06	0x00	0x00	Номер страницы
Резерв	-	0x06	с 0x02 по 0x7E	-	Резерв
PAGE_ID	R/W	0x07	0x00	0x00	Номер страницы
Резерв	-	0x07	с 0x02 по 0x7E	-	Резерв
PAGE_ID	R/W	0x08	0x00	0x00	Номер страницы
Резерв	-	0x08	с 0x02 по 0x7E	-	Резерв
PAGE_ID	R/W	0x09	0x00	0x00	Номер страницы
Резерв	-	0x09	с 0x02 по 0x7E	-	Резерв
PAGE_ID	R/W	0x0A	0x00	0x00	Номер страницы
Резерв	-	0x0A	с 0x02 по 0x7E	-	Резерв
PAGE_ID	R/W	0x0B	0x00	0x00	Номер страницы
Резерв	-	0x0B	с 0x02 по 0x7E	-	Резерв
PAGE_ID	R/W	0x0C	0x00	0x00	Номер страницы
Резерв	-	0x0C	с 0x02 по 0x7E	-	Резерв

5.1.1 Формат данных инерциальных датчиков

Данные датчиков угловой скорости, акселерометров и барометра выдаются в виде 32-битных чисел в дополнительном коде. Для обеспечения указанной точности каждое значение передается в паре регистров. На рисунке ниже показан пример того, как именно данные расположены в регистрах при передаче показаний инерциальных датчиков. В этом случае X_GYRO_OUT (Таблица 5.2) содержит старшую часть 32-битного слова показаний датчика после усреднения/децимации (наиболее значащие биты), а X_GYRO_LOW (Таблица 5.6) — младшую часть того же слова (наименее значащие биты).



Рис. 5.1 Передача данных повышенной точности (32 бита) в паре 16-битных регистров

Стрелки на рисунке ниже показывают направление движения, при котором показания датчиков имеют положительный знак:

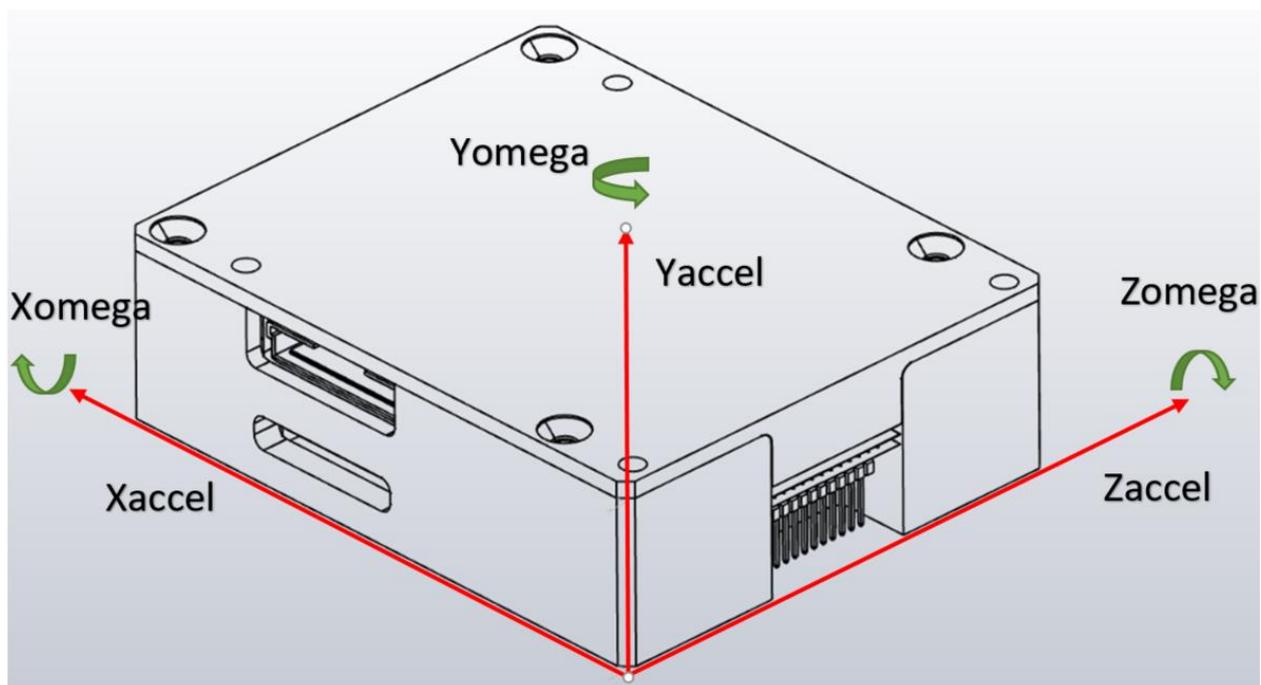


Рис. 5.2 Направление осей чувствительности модуля

Акселерометры измеряют кажущееся ускорение, то есть реагируют как на ускоренное движение вдоль соответствующей оси, так и на результат действия вдоль нее силы тяжести. При строго горизонтальном расположении блока на неподвижной опоре значение, выдаваемое акселерометром по оси Y, равно 1 g, а акселерометров по осям X и Z — 0 g. Данные выдаются в связанной системе координат.

5.2 Угловая скорость

Регистры с именами формата x_GYRO_OUT содержат результаты измерений датчиков угловой скорости в осях ССК. При обработке данных из этих регистров необходимо интерпретировать их как 16-битные знаковые числа, записанные в дополнительном коде. Таблица 5.5 дает примеры хранения данных в регистрах x_GYRO_OUT.

Таблица 5.2 X_GYRO_OUT (Страница 0, адрес 0x12)

Биты	Описание
[15:0]	Данные датчика угловой скорости по оси X ССК. Дополнительный код, диапазон значений: $\pm 450^\circ/\text{с}$, $0^\circ/\text{с} = 0x0000$, ЦМР = $0,02^\circ/\text{с}$

Таблица 5.3 Y_GYRO_OUT (Страница 0, адрес 0x16)

Биты	Описание
[15:0]	Данные датчика угловой скорости по оси Y ССК. Дополнительный код, диапазон значений: $\pm 450^\circ/\text{с}$, $0^\circ/\text{с} = 0x0000$, ЦМР = $0,02^\circ/\text{с}$

Таблица 5.4 Z_GYRO_OUT (Страница 0, адрес 0x1A)

Биты	Описание
[15:0]	Данные датчика угловой скорости по оси Z ССК. Дополнительный код, диапазон значений: $\pm 450^\circ/\text{с}$, $0^\circ/\text{с} = 0x0000$, ЦМР = $0,02^\circ/\text{с}$

Таблица 5.5 Примеры формата хранения данных в регистрах x_GYRO_OUT

Угловая скорость	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
+450°/с	+22500	0x57E4	0101 0111 1100 0100
+0,04°/с	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
+0,02°/с	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0°/с	0	0	0000 0000 0000 0000
-0,02°/с	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
-0,04°/с	-2	0xFFFFE	1111 1111 1111 1110
-450°/с	-22500	0xA81C	1010 1000 0001 1100

В регистрах x_GYRO_LOW цена старшего разряда равна $0,01^\circ/\text{с}$, для всех последующих бит цена каждого равна $\frac{1}{2}$ цены предыдущего.

Таблица 5.6 X_GYRO_LOW (Страница 0, адрес 0x10)

Биты	Описание
[15:0]	Данные датчика угловой скорости по оси X ССК: биты дополнительной разрешающей способности

Таблица 5.7 Y_GYRO_LOW (Страница 0, адрес 0x14)

Биты	Описание
[15:0]	Данные датчика угловой скорости по оси Y ССК: биты дополнительной разрешающей способности

Таблица 5.8 Z_GYRO_LOW (Страница 0, адрес 0x18)

Биты	Описание
[15:0]	Данные датчика угловой скорости по оси Z ССК: биты дополнительной разрешающей способности

5.3 Ускорение

Регистры с именами формата `x_ACCL_OUT` содержат результаты измерений акселерометров: либо кажущееся, либо расчетное истинное ускорение, в зависимости от значения бита №0 регистра `EKF_CNFG` (Таблица 5.82): «0» (значение по умолчанию) — кажущееся ускорение, «1» — истинное ускорение. Кроме того, эти данные выдаются либо в осях ССК, либо в осях НСК, в зависимости от значения бита №3 регистра `EKF_CNFG` (Таблица 5.82): «0» — данные выдаются в НСК, «1» (значение по умолчанию) — данные выдаются в ССК. При обработке данных из этих регистров необходимо интерпретировать их как 16-битные знаковые числа, записанные в дополнительном коде. Таблица 5.12 дает примеры хранения данных в регистрах `x_ACCL_OUT`.

Таблица 5.9 X_ACCL_OUT (Страница 0, адрес 0x1E)

Биты	Описание
[15:0]	Ускорение по оси X выбранной системы координат. Дополнительный код, диапазон значений: $\pm 10 g$, $0 g = 0x0000$, ЦМР = 0,8 мг

Таблица 5.10 Y_ACCL_OUT (Страница 0, адрес 0x22)

Биты	Описание
[15:0]	Ускорение по оси Y выбранной системы координат. Дополнительный код, диапазон значений: $\pm 10 g$, $0 g = 0x0000$, ЦМР = 0,8 мг

Таблица 5.11 Z_ACCL_OUT (Страница 0, адрес 0x26)

Биты	Описание
[15:0]	Ускорение по оси Z выбранной системы координат. Дополнительный код, диапазон значений: $\pm 10 g$, $0 g = 0x0000$, ЦМР = 0,8 мг

Таблица 5.12 Примеры формата хранения данных в регистрах x_ACCL_OUT

Кажущееся ускорение	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
+10 g	+12500	0x30D4	0011 0000 1101 0100
+1,6 mg	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
+0,8 mg	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0 g	0	0	0000 0000 0000 0000
-0,8 mg	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
-1,6 mg	-2	0xFFFE	1111 1111 1111 1110
-10 g	-12500	0xCF2C	1100 1111 0010 1100

В регистрах x_ACCL_LOW цена старшего разряда равна 0,4 mg, для всех последующих бит цена каждого равна ½ цены предыдущего.

Таблица 5.13 X_ACCL_LOW (Страница 0, адрес 0x1C)

Биты	Описание
[15:0]	Ускорение по оси X выбранной системы координат: биты дополнительной разрешающей способности

Таблица 5.14 Y_ACCL_LOW (Страница 0, адрес 0x20)

Биты	Описание
[15:0]	Ускорение по оси Y выбранной системы координат: биты дополнительной разрешающей способности

Таблица 5.15 Z_ACCL_LOW (Страница 0, адрес 0x24)

Биты	Описание
[15:0]	Ускорение по оси Z выбранной системы координат: биты дополнительной разрешающей способности

5.4 Магнитометры

Регистры с именами формата x_MAGN_OUT содержат результаты измерений магнитометров, выдаваемые либо в осях ССК, либо в осях НСК, в зависимости от значения бита №3 регистра EKF_CNFG (Таблица 5.82): «0» — данные выдаются в НСК, «1» (значение по умолчанию) — данные выдаются в ССК. Регистр MAGN_NORM_OUT — евклидову норму этих результатов. При обработке данных из этих регистров необходимо интерпретировать их как 16-битные знаковые числа, записанные в дополнительном коде.

Таблица 5.20 дает примеры хранения данных в регистрах x_MAGN_OUT и MAGN_NORM_OUT.

Таблица 5.16 X_MAGN_OUT (Страница 0, адрес 0x28)

Биты	Описание
[15:0]	Данные магнитометра по оси X выбранной системы координат. Дополнительный код, диапазон значений: –3,2768..+3,2767 Гаусс, 0 Гаусс = 0x0000, ЦМР = 0,1 мГаусс

Таблица 5.17 Y_MAGN_OUT (Страница 0, адрес 0x2A)

Биты	Описание
[15:0]	Данные магнитометра по оси Y выбранной системы координат. Дополнительный код, диапазон значений: –3,2768..+3,2767 Гаусс, 0 Гаусс = 0x0000, ЦМР = 0,1 мГаусс

Таблица 5.18 Z_MAGN_OUT (Страница 0, адрес 0x2C)

Биты	Описание
[15:0]	Данные магнитометра по оси Z выбранной системы координат. Дополнительный код, диапазон значений: –3,2768..+3,2767 Гаусс, 0 Гаусс = 0x0000, ЦМР = 0,1 мГаусс

Таблица 5.19 MAGN_NORM_OUT (Страница 1, адрес 0x38)

Биты	Описание
[15:0]	Евклидова норма величины магнитного поля, регистрируемого магнитометрами (квадратный корень из суммы квадратов показаний всех трех магнитометров). Дополнительный код, диапазон значений: –3,2768..+3,2767 Гаусс, 0 Гаусс = 0x0000, ЦМР = 0,1 мГаусс

Таблица 5.20 Примеры формата хранения данных в регистрах x_MAGN_OUT и MAGN_NORM_OUT

Напряженность магнитного поля	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
+3,2767 Гаусс	+32767	0x7FFF	0111 1111 1111 1111
+0,2 мГаусс	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
+0,1 мГаусс	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0 Гаусс	0	0	0000 0000 0000 0000
-0,1 мГаусс	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
-0,2 мГаусс	-2	0xFFFFE	1111 1111 1111 1110
-3,2768 Гаусс	-32768	0x8000	1000 0000 0000 0000

5.5 Барометр

Регистры BAROM_OUT и BAROM_LOW содержат результаты измерений барометрического датчика. Комбинация этих двух регистров формирует 32-битное число в дополнительном коде. Если точность представления, обеспечиваемая старшим 16-битным словом, BAROM_OUT, достаточна для решаемой задачи, то можно пользоваться только его данными. Для случаев, когда требуется повышенная точность показаний, величины, получаемые из регистров BAROM_OUT и BAROM_LOW, комбинируются как описано в разделе «Формат данных инерциальных датчиков». В следующих таблицах описан формат представления данных в регистрах BAROM_OUT и BAROM_LOW и даются примеры представления показаний.

Таблица 5.21 BAROM_OUT (Страница 0, адрес 0x30)

Биты	Описание
[15:0]	Данные барометрического датчика. Дополнительный код, диапазон значений: -1,31072..+1,31071 бар, 0 бар = 0x0000, ЦМР = 40 мкбар

Таблица 5.22 Примеры формата хранения данных в регистре BAROM_OUT

Давление, бар	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
+0,00004·(2 ¹⁵ -1)	+32767	0x7FFF	0111 1111 1111 1111
+0,00008	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
+0,00004	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0 Гаусс	0	0	0000 0000 0000 0000
-0,00004	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111

Давление, бар	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
-0,00008	-2	0xFFFE	1111 1111 1111 1110
-0,00004·2 ¹⁵	-32768	0x8000	1000 0000 0000 0000

В регистре BAROM_LOW цена старшего разряда равна 20 мкбар, для всех последующих бит цена каждого равна ½ цены предыдущего.

Таблица 5.23 BAROM_LOW (Страница 0, адрес 0x2E)

Биты	Описание
[15:0]	Данные барометрического датчика: биты дополнительной разрешающей способности

5.6 Кватернион и углы ориентации. Матрица ориентации

Регистры с адресами из диапазона с 0x60 по 0x70 включительно на странице №0 регистров содержат либо данные кватерниона ориентации вкупе с углами ориентации в соответствии с ГОСТ 20058-80¹, либо элементы матрицы ориентации, в зависимости от значения бита №4 регистра EKF_CNFG, Таблица 5.82: «0» (значение по умолчанию) — элементы кватерниона и углы ориентации, «1» — элементы матрицы ориентации.

В двух следующих подразделах дается описание содержимого регистров для каждого из этих случаев.

5.6.1 Кватернион и углы ориентации

Кватернион представляет собой гиперкомплексное число с одной действительной и тремя мнимыми частями, определяющее ориентацию ССК относительно НСК. В исходном положении элементы кватерниона имеют значения [1, 0, 0, 0].

Углы ориентации по ГОСТ 20058-80 также определяют ориентацию ССК относительно НСК, но в более интуитивно ясной форме: в виде углов трех последовательных поворотов вокруг различных осей ССК. Чтобы повернуть некоторое тело из исходного положения в системе НСК (ось X направлена на север, плоскость XZ совпадает с плоскостью местного горизонта) в то же положение, в котором находится ССК, необходимо:

- повернуть его по курсу вокруг оси Y (вертикальной) на величину угла рыскания;
- затем повернуть вокруг оси Z (направленной «из центра масс в сторону правого крыла») на величину угла тангажа;

¹ Ссылка на документ в «Электронном фонде правовых и нормативно-технических документов»: <https://docs.cntd.ru/document/1200009362>

- и затем повернуть вокруг оси X (направленной «в сторону носа») на величину угла крена.

Более строгое описание углов ориентации см. в ГОСТ 20058-80.

Регистры с именами формата Qx_Cxx_OUT содержат компоненты кватерниона ориентации ССК блока относительно НСК. Регистры ROLL_C23_OUT, PITCH_C31_OUT и YAW_C32_OUT содержат, соответственно, углы крена, тангажа и рыскания. При обработке данных из этих регистров необходимо интерпретировать их как 16-битные знаковые числа, записанные в дополнительном коде. В следующих таблицах описан формат представления данных в перечисленных регистрах и даются примеры представления показаний.

Таблица 5.24 Q0_C11_OUT (Страница 0, адрес 0x60)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компонента λ_0 кватерниона ориентации ССК блока относительно НСК. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.25 Q1_C12_OUT (Страница 0, адрес 0x62)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компонента λ_1 кватерниона ориентации ССК блока относительно НСК. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.26 Q2_C13_OUT (Страница 0, адрес 0x64)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компонента λ_2 кватерниона ориентации ССК блока относительно НСК. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.27 Q3_C21_OUT (Страница 0, адрес 0x66)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компонента λ_3 кватерниона ориентации ССК блока относительно НСК. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.28 ROLL_C23_OUT (Страница 0, адрес 0x6A)

Биты	Описание
[15:0]	Угол крена, γ . Дополнительный код, диапазон значений: $-180^\circ..180 \cdot (1-2^{-15})^\circ$, 0 = 0x0000, ЦМР = $180 \cdot 2^{-15}$

Таблица 5.29 PITCH_C31_OUT (Страница 0, адрес 0x6C)

Биты	Описание
[15:0]	Угол тангажа, θ . Дополнительный код, диапазон значений: $\pm 90^\circ$, 0 = 0x0000, ЦМР = $180 \cdot 2^{-15}$

Таблица 5.30 YAW_C32_OUT (Страница 0, адрес 0x6E)

Биты	Описание
[15:0]	Угол рыскания, ψ . Дополнительный код, диапазон значений: $-180^\circ..180 \cdot (1-2^{-15})^\circ$, 0 = 0x0000, ЦМР = $180 \cdot 2^{-15}$

Таблица 5.31 Примеры формата хранения данных в регистрах Qx_Sxx_OUT

Величина компонента λ_N	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
$+1-1/2^{15}$	+32767	0x7FFF	0111 1111 1111 1111
$+2/2^{15}$	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
$+1/2^{15}$	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0	0	0	0000 0000 0000 0000
$-1/2^{15}$	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
$-2/2^{15}$	-2	0xFFFFE	1111 1111 1111 1110
-1	-32768	0x8000	1000 0000 0000 0000

Таблица 5.32 Примеры формата хранения данных в регистрах ROLL_C23_OUT и YAW_C32_OUT

Угол, $^\circ$	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
$+180 \cdot (1-2^{-15})$	+32767	0x7FFF	0111 1111 1111 1111
$+360/2^{15}$	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
$+180/2^{15}$	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0	0	0	0000 0000 0000 0000

Угол, °	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
-180/2 ¹⁵	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
-360/2 ¹⁵	-2	0xFFFE	1111 1111 1111 1110
-180	-32768	0x8000	1000 0000 0000 0000

Таблица 5.33 Примеры формата хранения данных в регистре PITCH_C31_OUT

Угол, °	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
+90	+16384	0x4000	0100 0000 0000 0000
+360/2 ¹⁵	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
+180/2 ¹⁵	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0	0	0	0000 0000 0000 0000
-180/2 ¹⁵	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
-360/2 ¹⁵	-2	0xFFFE	1111 1111 1111 1110
-90	-16384	0xC000	1100 0000 0000 0000

5.6.2 Матрица ориентации

Матрица ориентации представляет собой матрицу размерности 3x3, описывающую ориентацию СКК относительно НСК. Если предположить, что существует некий вектор V , заданный 3-мя своими проекциями, то задачу, решаемую матрицей ориентации, можно описать двумя эквивалентными утверждениями:

- если считать, что V задан своими проекциями на оси **НСК**, то после умножения матрицы ориентации на этот вектор он поворачивается относительно своего исходного положения так же, как система СКК повернута относительно НСК, и становится вектором V' (при этом его проекции на оси СКК становятся численно такими же, какими они до поворота были на соответствующие оси НСК, но эти числа в явном виде больше нигде не фигурируют). Результатом операции в этом случае являются 3 проекции повернутого вектора, V' , на исходные оси **НСК**;
- либо можно считать, что, при тех же численных значениях элементов, вектор V есть вектор V' , но уже изначально заданный в проекциях на оси **СКК**. Тогда операция умножения матрицы ориентации на него является не операцией поворота, а операцией перепроецирования, и дает в результате те же 3 элемента-проекции вектора V' на оси **НСК**, что и в предыдущем варианте.

Таблица 5.34 Q0_C11_OUT (Страница 0, адрес 0x60)

Биты	Описание
[15:0]	Значение элемента [1,1] матрицы ориентации. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.35 Q1_C12_OUT (Страница 0, адрес 0x62)

Биты	Описание
[15:0]	Значение элемента [1,2] матрицы ориентации. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.36 Q2_C13_OUT (Страница 0, адрес 0x64)

Биты	Описание
[15:0]	Значение элемента [1,3] матрицы ориентации. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.37 Q3_C21_OUT (Страница 0, адрес 0x66)

Биты	Описание
[15:0]	Значение элемента [2,1] матрицы ориентации. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.38 C22_OUT (Страница 0, адрес 0x68)

Биты	Описание
[15:0]	Значение элемента [2,2] матрицы ориентации. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.39 ROLL_C23_OUT (Страница 0, адрес 0x6A)

Биты	Описание
[15:0]	Значение элемента [2,3] матрицы ориентации. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.40 PITCH_C31_OUT (Страница 0, адрес 0x6C)

Биты	Описание
[15:0]	Значение элемента [3,1] матрицы ориентации. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.41 YAW_C32_OUT (Страница 0, адрес 0x6E)

Биты	Описание
[15:0]	Значение элемента [3,2] матрицы ориентации. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.42 C33_OUT (Страница 0, адрес 0x70)

Биты	Описание
[15:0]	Значение элемента [3,3] матрицы ориентации. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.43 Примеры формата хранения данных в регистрах <x>Cxx_OUT

Величина компонента λ_N	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
$+1-1/2^{15}$	+32767	0x7FFF	0111 1111 1111 1111
$+2/2^{15}$	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
$+1/2^{15}$	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0	0	0	0000 0000 0000 0000
$-1/2^{15}$	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
$-2/2^{15}$	-2	0xFFFFE	1111 1111 1111 1110
-1	-32768	0x8000	1000 0000 0000 0000

5.7 Температура в корпусе блока

Регистр TEMP_OUT содержит результаты измерений датчика температуры, расположенного в корпусе блока. Эти показания могут быть полезны для отслеживания относительных изменений температуры внутри корпуса блока. При обработке данных из этого регистра их необходимо интерпретировать их как 16-битные знаковые числа, записанные в дополнительном коде. В следующих таблицах описан формат представления данных в регистре TEMP_OUT и даются примеры представления показаний.

Таблица 5.44 TEMP_OUT (Страница 0, адрес 0x0E)

Биты	Описание
[15:0]	Температура в корпусе блока. Дополнительный код, диапазон значений: –40..+85 °С, 25 °С = 0x0000, ЦМР = 0,00565 °С

Таблица 5.45 Примеры формата хранения данных в регистре TEMP_OUT

Температура, °С	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
+85	+10619	0x297B	0010 1001 0111 1011
25 + 0,0113	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
25 + 0,00565	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
25	0	0	0000 0000 0000 0000
25 – 0,00565	–1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
25 – 0.0113	–2	0xFFFE	1111 1111 1111 1110
–40	–11504	0xD310	1101 0011 0001 0000

5.8 Слово состояния

Регистр SYS_E_FLAG содержит слово состояния модуля. Чтение регистра SYS_E_FLAG сбрасывает все его биты в состояние «0». В следующей таблице описано содержимое бит регистра SYS_E_FLAG.

Таблица 5.46 SYS_E_FLAG (Страница 0, адрес 0x08)

Биты	Описание
[15:4]	Резерв
3	Ошибка связи по SPI
2	Резерв
1	Отказ датчика
0	Резерв

Признак «Ошибка связи по SPI» активизируется в случае, если аппаратурой SPI модуля зафиксирован факт выдачи данных из пустого аппаратного буфера. Возможный вариант использования этого признака см. в разделе 4.4.1 «Аспекты алгоритма обработки транзакций по шине SPI».

Признак «Отказ датчика» активизируется в случае, если в системе обнаружен отказ, по любой из возможных причин, хотя бы одного из акселерометров, ДУС, магнитметров, термометров или бародатчика. Для уточнения того, какие именно датчики признаны отказавшими, см. раздел 5.28.3 «Обобщенные признаки отказов».

5.9 Версия и дата прошивки

Регистр FIRM_REV содержит номер версии прошивки в двоично-десятичном коде. Например, если величина, возвращаемая при чтении регистра, равна 0x0082, это означает, что модуль работает под управлением прошивки 82-й версии.

Таблица 5.47 FIRM_REV (Страница 3, адрес 0x78)

Биты	Описание
[15:12]	Номер версии, тысячи
[11:8]	Номер версии, сотни
[7:4]	Номер версии, десятки
[3:0]	Номер версии, единицы

Регистр FIRM_DM содержит день и месяц создания прошивки в двоично-десятичном коде. Например, если величина, возвращаемая при чтении регистра, равна 0x0915, это означает, что версия прошивки создана 15 сентября.

Таблица 5.48 FIRM_DM (Страница 3, адрес 0x7A)

Биты	Описание
[15:12]	Номер месяца создания версии прошивки, десятки
[11:8]	Номер месяца создания прошивки, единицы
[7:4]	Номер дня создания версии прошивки, десятки
[3:0]	Номер дня создания версии прошивки, единицы

Регистр FIRM_Y содержит год создания прошивки в двоично-десятичном коде. Например, если величина, возвращаемая при чтении регистра, равна 0x2021, это означает, что версия прошивки создана в 2021-м году.

Таблица 5.49 FIRM_Y (Страница 3, адрес 0x7C)

Биты	Описание
[15:12]	Номер года создания версии прошивки, тысячи
[11:8]	Номер года создания версии прошивки, сотни
[7:4]	Номер года создания версии прошивки, десятки
[3:0]	Номер года создания версии прошивки, единицы

5.10 Идентификационные данные модуля

Регистр PROD_ID содержит идентификационный номер модели модуля, число 16480 (0x4060), а регистр SERIAL_NUM — серийный номер конкретного модуля, 16-битное беззнаковое целое число.

Таблица 5.50 PROD_ID (Страница 0, адрес 0x7E)

Биты	Описание
[15:12]	Идентификационный номер модели модуля, 0x4060

Таблица 5.51 SERIAL_NUM (Страница 4, адрес 0x20)

Биты	Описание
[15:12]	Серийный номер модуля. 16-битное беззнаковое целое.

5.11 Коэффициент децимации

Регистр DEC_RATE содержит коэффициент децимации: число, определяющее, во сколько раз реже производится цикл расчетов курсовертикали/БИНС по сравнению с частотой съема данных с инерциальных датчиков или с частотой сигнала внешней синхронизации, если активирован режим внешней синхронизации. Таким образом, значением в регистре DEC_RATE косвенно задается частота решения навигационной задачи.

Таблица 5.52 DEC_RATE (Страница 3, адрес 0x0C)

Биты	Описание
[15]	Резерв

[14:0]	Коэффициент децимации, беззнаковое целое, допустимый диапазон 5..32767.
--------	---

Частота съема данных с инерциальных датчиков фиксирована и составляет 5 кГц. Допустимые значения коэффициента децимации лежат в диапазоне от 1 до 32767. При попытке задать значение, выходящее за этот диапазон, фактически будет установлено значение, соответствующее ближайшей границе диапазона. Значение по умолчанию составляет 25, что соответствует частоте решения навигационной задачи, равной 200 Гц.

Корректность расчетов БИСН при результирующей частоте расчетов, превышающей 1000 Гц, не гарантируется: для этого недостаточно вычислительной мощности процессора модуля, поэтому часть данных от датчиков будет теряться из-за превышения скоростью заполнения очереди на обработку скорости выборки данных из этой очереди. Исходя из этого, не рекомендуется устанавливать значение коэффициента децимации меньше 5 при тактировании от внутреннего таймера. При применении внешнего сигнала синхронизации также рекомендуется выбирать такую комбинацию частоты этого сигнала и коэффициента децимации, чтобы результирующая частота решения навигационной задачи в режиме БИСН не превышала 1000 Гц.

Децимация не означает отбрасывания данных, снимаемых с датчиков, а только устанавливает соотношение между частотой съема данных с датчиков и частотой передачи этих данных в подсистему расчетов БИСН. В ходе цикла децимации данные, снимаемые с датчиков с частотой 5 кГц, накапливаются, а по окончании цикла, перед передачей их в подсистему расчетов БИСН, телеметрию и программный буфер SPI, усредняются за период накопления.

При уменьшении значения коэффициента децимации следует учитывать, что из-за соответствующего повышения частоты расчетов возрастает нагрузка на процессор, а это приведет к возникновению пропусков в данных телеметрии, сохраняемых на SD-карту. Кроме того, при высокой частоте расчетов может сложиться ситуация, когда за время между двумя тактами расчета невозможно будет прочитать и записать все потребные данные из-за необходимости выдерживать паузу между соседними запросами по SPI длительностью не менее 10 мкс, в ходе которой принятый модулем запрос обрабатывается.

При увеличении значения коэффициента децимации следует учитывать, что точность расчетов курсовертикали/БИСН будет уменьшаться по мере снижения частоты решения навигационной задачи в силу нарастания величины ошибок численного интегрирования. Нерационально понижать частоту решения навигационной задачи ниже 30 Гц, то есть задавать коэффициенту децимации значение, превышающее 166.

5.12 Данные о координатах

5.12.1 Широта

Регистры LATITUDE_OUT и LATITUDE_LOW содержат, в комбинации, 32-битное знаковое целое число, представляющее текущее значение комплексированной широты. В

следующих таблицах описан формат представления данных в регистрах LATITUDE_OUT и LATITUDE_LOW, и даются примеры представления показаний в них.

Таблица 5.53 LATITUDE_OUT (Страница 1, адрес 0x12)

Биты	Описание
[15:0]	Значение комплексированной широты. Дополнительный код, диапазон значений: $\pm 90^\circ$, $0^\circ = 0x0000$, ЦМР = $(180 \cdot 2^{-15})^\circ$. Можно также интерпретировать это число как радианы, в этом случае диапазон $\pm \pi/2$, ЦМР = $\pi \cdot 2^{-15}$ рад.

Таблица 5.54 Примеры формата хранения данных в регистре LATITUDE_OUT

Широта, °	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
+90	+16384	0x4000	0100 0000 0000 0000
$+360/2^{15}$	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
$+180/2^{15}$	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0	0	0	0000 0000 0000 0000
$-180/2^{15}$	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
$-360/2^{15}$	-2	0xFFFFE	1111 1111 1111 1110
-90	-16384	0xC000	1100 0000 0000 0000

В регистре LATITUDE_LOW цена старшего разряда равна $(180 \cdot 2^{-16})^\circ$ (альтернативно $\pi \cdot 2^{-16}$ рад), для всех последующих бит цена каждого равна $\frac{1}{2}$ цены предыдущего, цена младшего разряда $(180 \cdot 2^{-31})^\circ$ (альтернативно $\pi \cdot 2^{-31}$ рад), что соответствует представлению позиции на поверхности Земли с точностью около 1 см.

Таблица 5.55 LATITUDE_LOW (Страница 1, адрес 0x10)

Биты	Описание
[15:0]	Значение комплексированной широты: биты дополнительной разрешающей способности

5.12.2 Долгота

Регистры LONGITUDE_OUT и LONGITUDE_LOW содержат, в комбинации, 32-битное знаковое целое число, представляющее текущее значение комплексированной долготы. В следующих таблицах описан формат представления данных в регистрах LONGITUDE_OUT и LONGITUDE_LOW, и даются примеры представления показаний в них.

Таблица 5.56 LONGITUDE_OUT (Страница 1, адрес 0x1A)

Биты	Описание
[15:0]	Значение комплексированной долготы. Дополнительный код, диапазон значений: $-180^\circ \dots +180 \cdot (1-2^{-15})^\circ$, $0^\circ = 0x0000$, ЦМР = $(180 \cdot 2^{-15})^\circ$. Можно также интерпретировать это число как радианы, в этом случае диапазон $-\pi \dots +\pi \cdot (1-2^{-15})$, ЦМР = $\pi \cdot 2^{-15}$ рад.

Таблица 5.57 Примеры формата хранения данных в регистре LONGITUDE_OUT

Долгота, °	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
$+180 \cdot (1-2^{-15})$	+32767	0x7FFF	0111 1111 1111 1111
$+360/2^{15}$	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
$+180/2^{15}$	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0	0	0	0000 0000 0000 0000
$-180/2^{15}$	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
$-360/2^{15}$	-2	0xFFFFE	1111 1111 1111 1110
-180	-32768	0x8000	1000 0000 0000 0000

В регистре LONGITUDE_LOW цена старшего разряда равна $(180 \cdot 2^{-16})^\circ$ (альтернативно $\pi \cdot 2^{-16}$ рад), для всех последующих бит цена каждого равна $\frac{1}{2}$ цены предыдущего, цена младшего разряда $(180 \cdot 2^{-31})^\circ$ (альтернативно $\pi \cdot 2^{-31}$ рад), что соответствует представлению позиции на поверхности Земли с точностью около 1 см и точнее, в зависимости от текущего значения широты.

Таблица 5.58 LONGITUDE_LOW (Страница 1, адрес 0x18)

Биты	Описание
[15:0]	Значение комплексированной долготы: биты дополнительной разрешающей способности

5.12.3 Высота над эллипсоидом

Регистры HABS_OUT и HABS_LOW содержат, в комбинации, 32-битное знаковое целое число, представляющее текущее значение комплексированной высоты над земным эллипсоидом. В следующих таблицах описан формат представления данных в регистрах HABS_OUT и HABS_LOW, и даются примеры представления показаний в них.

Таблица 5.59 HABS_OUT (Страница 1, адрес 0x16)

Биты	Описание
[15:0]	Значение комплексированной высоты над земным эллипсоидом, м. Дополнительный код, диапазон значений: -20000..+32767 м, 0 м = 0x0000, ЦМР = 1 м

Таблица 5.60 Примеры формата хранения данных в регистре HABS_OUT

Высота над эллипсоидом, м	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
+32767	+32767	0x7FFF	0111 1111 1111 1111
+2	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
+1	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0	0	0	0000 0000 0000 0000
-1	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
-2	-2	0xFFFE	1111 1111 1111 1110
-20000	-20000	0xB1E0	1011 0001 1110 0000

В регистре HABS_LOW цена старшего разряда равна 0,5 м, для всех последующих бит цена каждого равна ½ цены предыдущего, цена младшего разряда равна 2^{-16} м.

Таблица 5.61 HABS_LOW (Страница 1, адрес 0x14)

Биты	Описание
[15:0]	Значение комплексированной высоты над земным эллипсоидом: биты дополнительной разрешающей способности

5.12.4 Порядок записи данных о координатах

Данные о координатах относятся к числу как считываемых, так и записываемых данных. Записываться в модуль могут данные о координатах, получаемые пользователем от внешнего источника «объективных» данных, например, от аппаратуры спутниковой навигации. Будучи записаны в модуль, такие данные используются для комплексирования и коррекции расчетов. Однако для использования внешних данных о координатах необходимо, чтобы в алгоритм расчета попадал сразу весь их необходимый набор: и широта, и долгота, и высота.

Для того, чтобы обеспечить полноту набора, порядок записи данных о координатах должен удовлетворять следующему требованию: в последовательности транзакций, записывающих данные о координатах в модуль, последней транзакцией должна идти запись в самый старший из регистров, представляющих координаты: регистр LONGITUDE_OUT (Таблица 5.56). Ни порядок, ни факт записи остальных регистров:

LATITUDE_LOW (Таблица 5.55), LATITUDE_OUT (Таблица 5.53), HABS_LOW (Таблица 5.61), HABS_OUT (Таблица 5.59), LONGITUDE_LOW (Таблица 5.58) — не контролируются и остаются на усмотрение пользователя, передаваемые в эти регистры данные сохраняются в уникальной для каждого из регистров ячейке промежуточного буфера. Если какие-то из данных не были записаны, в соответствующих ячейках промежуточного буфера сохраняются их предыдущие значения. Если запись в ячейку буфера не производилась ни разу, в ней сохраняется значение по умолчанию: ноль. При этом по окончании выполнения запроса на запись в регистр LONGITUDE_OUT все имеющиеся в промежуточном буфере данные собираются в единый массив и передаются в алгоритм расчета, который принимает этот массив к использованию в ближайшем следующем цикле расчетов, если выполнены необходимые условия (см. описание регистра EXT_DATA_SRC, Таблица 5.75).

5.12.5 Данные о высоте из внешнего источника

Группа регистров HABS_EXT_SRC (Таблица 5.65), HABS_EXT_LOW (Таблица 5.64) и HABS_EXT_OUT (Таблица 5.62) определяют тип внешнего по отношению к модулю источника данных о высоте над эллипсоидом, и величину этой высоты.

Таблица 5.62 HABS_EXT_OUT (Страница 1, адрес 0x3E)

Биты	Описание
[15:0]	Значение высоты над земным эллипсоидом, полученное из внешнего источника, м. Дополнительный код, диапазон значений: $-32768..+32767$ м, 0 м = 0x0000, ЦМР = 1 м

Таблица 5.63 Примеры формата хранения данных в регистре HABS_EXT_OUT

Высота над эллипсоидом, м	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
+32767	+32767	0x7FFF	0111 1111 1111 1111
+2	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
+1	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0	0	0	0000 0000 0000 0000
-1	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
-2	-2	0xFFFFE	1111 1111 1111 1110
-32768	-32768	0x8000	1000 0000 0000 0000

В регистре HABS_EXT_LOW цена старшего разряда равна 0,5 м, для всех последующих бит цена каждого равна $\frac{1}{2}$ цены предыдущего, цена младшего разряда равна 2^{-16} м.

Таблица 5.64 HABS_EXT_LOW (Страница 1, адрес 0x3C)

Биты	Описание
[15:0]	Значение высоты над земным эллипсоидом, полученное из внешнего источника: биты дополнительной разрешающей способности

Использование этих данных определяется состоянием бита №6 слова конфигурации модуля (регистр EKF_CNFG, Таблица 5.82): если использование данных разрешено, то принимаемые данные поступают на вход инерциального фильтра, вырабатывающего поправку к чисто инерциальной высоте. Если использование данных запрещено, поправка формируется из оценки высоты, вырабатываемой на основе показаний встроенного бародатчика.

Таблица 5.65 HABS_EXT_SRC (Страница 1, адрес 0x3A)

Биты	Описание
[15:0]	Код типа внешнего источника данных о высоте над эллипсоидом: 16-битное целое число без знака

Значение по умолчанию: 0.

В текущей версии значение регистра HABS_EXT_SRC не учитывается.

5.13 Данные о скоростях

5.13.1 Регистры с данными о скоростях

Регистры с именами формата Vx_OUT содержат текущее значение северной, вертикальной, восточной и земной скоростей (земная скорость рассчитывается как квадратный корень из суммы квадратов северной и восточной скоростей). При обработке данных из этих регистров необходимо интерпретировать как 16-битные знаковые числа, записанные в дополнительном коде. В таблицах ниже даются описания формата хранения и примеры хранения данных в регистрах Vx_OUT.

Таблица 5.66 VN_OUT (Страница 1, адрес 0x1E)

Биты	Описание
[15:0]	Величина северной скорости, м/с. Дополнительный код, диапазон значений: -327,68..+327,67 м/с, 0 м/с = 0x0000, ЦМР = 0,01 м/с

Таблица 5.67 VN_OUT (Страница 1, адрес 0x22)

Биты	Описание
[15:0]	Величина вертикальной скорости, м/с. Дополнительный код, диапазон значений: -327,68..+327,67 м/с, 0 м/с = 0x0000, ЦМР = 0,01 м/с

Таблица 5.68 VE_OUT (Страница 1, адрес 0x26)

Биты	Описание
[15:0]	Величина восточной скорости, м/с. Дополнительный код, диапазон значений: -327,68..+327,67 м/с, 0 м/с = 0x0000, ЦМР = 0,01 м/с

Таблица 5.69 VGND_OUT (Страница 1, адрес 0x2A)

Биты	Описание
[15:0]	Величина путевой скорости, м/с. Дополнительный код, диапазон значений: -327,68..+327,67 м/с, 0 м/с = 0x0000, ЦМР = 0,01 м/с

Таблица 5.70 Примеры формата хранения данных в регистрах Vx_OUT

Скорость, м/с	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
+327,67	+32767	0x7FFF	0111 1111 1111 1111
+0,02	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
+0,01	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0	0	0	0000 0000 0000 0000
-0,01	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
-0,02	-2	0xFFFFE	1111 1111 1111 1110
-32768	-32768	0x8000	1000 0000 0000 0000

В регистрах Vx_LOW цена старшего разряда равна 0,005 м/с, для всех последующих бит цена каждого равна ½ цены предыдущего.

Таблица 5.71 VN_LOW (Страница 1, адрес 0x1C)

Биты	Описание
[15:0]	Величина северной скорости: биты дополнительной разрешающей способности

Таблица 5.72 VN_LOW (Страница 1, адрес 0x20)

Биты	Описание
[15:0]	Величина вертикальной скорости: биты дополнительной разрешающей способности

Таблица 5.73 VE_LOW (Страница 1, адрес 0x24)

Биты	Описание
[15:0]	Величина восточной скорости: биты дополнительной разрешающей способности

Таблица 5.74 VGND_LOW (Страница 1, адрес 0x28)

Биты	Описание
[15:0]	Величина путевой скорости: биты дополнительной разрешающей способности

5.13.2 Запись данных о скоростях

Данные о скоростях относятся к числу как считываемых, так и записываемых данных. Записываться в модуль могут данные о скоростях, получаемые пользователем от внешнего источника «объективных» данных, например, от аппаратуры спутниковой навигации. Будучи записаны в модуль, такие данные могут использоваться для комплексирования и коррекции расчетов. Однако для использования внешних данных о скоростях необходимо, чтобы в алгоритм расчета одновременно попадал набор из пары скоростей: северной и восточной. Внешние данные о вертикальной и путевой скоростях не используются в текущей версии программного обеспечения блока.

Для того, чтобы обеспечить полноту набора, порядок записи данных о скоростях должен удовлетворять следующему требованию: в последовательности транзакций, записывающих данные о скоростях в модуль, последней транзакцией должна идти запись в самый старший из регистров, представляющих скорости в НСК: регистр VE_OUT (Таблица 5.68). Ни порядок, ни факт записи остальных регистров: VN_LOW (Таблица 5.71), VN_OUT (Таблица 5.66), VH_LOW (Таблица 5.72), VH_OUT (Таблица 5.67), VE_LOW (Таблица 5.73) — не контролируются и остаются на усмотрение пользователя, передаваемые в эти регистры данные сохраняются в уникальной для каждого из регистров ячейке промежуточного буфера. Если какие-то из данных не были записаны, в соответствующих ячейках промежуточного буфера сохраняются их предыдущие значения. Если запись в ячейку буфера не производилась ни разу, в ней сохраняется значение по умолчанию: ноль. При этом по окончании выполнения запроса на запись в регистр VE_OUT все имеющиеся в промежуточном буфере данные собираются в единый массив и передаются в алгоритм

расчета, который при необходимости принимает этот массив к использованию в ближайшем следующем цикле расчетов, если выполнены необходимые условия (см. описание регистра EXT_DATA_SRC, Таблица 5.75).

5.14 Режим работы с внешними данными о координатах и скоростях

Регистр EXT_DATA_SRC доступен как для чтения, так и для записи, и определяет один из доступных режимов работы с внешними данными о координатах и скоростях.

Таблица 5.75 EXT_DATA_SRC (Страница 1, адрес 0x2C)

Биты	Описание
[15:0]	Код режима работы с внешними данными о координатах и скоростях: 16-битное целое число без знака

Возможны следующие значения этого регистра:

- «0» — получение данных о координатах и скоростях через SPI без использования аппаратной метки времени;
- «1» — получение данных о координатах и скоростях через SPI с учетом состояния аппаратной метки времени;
- «2» — получение данных о координатах и скоростях через UART от приемника GNSS μ Blox NEO-8P без использования аппаратной метки времени;
- «3» — получение данных о координатах и скоростях через UART от приемника GNSS μ Blox NEO-8P с учетом состояния аппаратной метки времени.

5.14.1 В режиме «0» коррекция координат выполняется по мере того, как по шине SPI поступают данные об «объективных» координатах и скоростях в соответствии с описанным в разделах 5.12 «Данные о координатах» и 5.12.5 «Данные о высоте из внешнего источника»

Группа регистров HABS_EXT_SRC (Таблица 5.65), HABS_EXT_LOW (Таблица 5.64) и HABS_EXT_OUT (Таблица 5.62) определяют тип внешнего по отношению к модулю источника данных о высоте над эллипсоидом, и величину этой высоты.

Таблица 5.62 HABS_EXT_OUT (Страница 1, адрес 0x3E)

Биты	Описание
[15:0]	Значение высоты над земным эллипсоидом, полученное из внешнего источника, м. Дополнительный код, диапазон значений: $-32768..+32767$ м, 0 м = 0x0000, ЦМР = 1 м

Таблица 5.63 Примеры формата хранения данных в регистре HABS_EXT_OUT

Высота над эллипсоидом, м	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
+32767	+32767	0x7FFF	0111 1111 1111 1111
+2	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
+1	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0	0	0	0000 0000 0000 0000
-1	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
-2	-2	0xFFFE	1111 1111 1111 1110
-32768	-32768	0x8000	1000 0000 0000 0000

В регистре HABS_EXT_LOW цена старшего разряда равна 0,5 м, для всех последующих бит цена каждого равна ½ цены предыдущего, цена младшего разряда равна 2^{-16} м.

Таблица 5.64 HABS_EXT_LOW (Страница 1, адрес 0x3C)

Биты	Описание
[15:0]	Значение высоты над земным эллипсоидом, полученное из внешнего источника: биты дополнительной разрешающей способности

Использование этих данных определяется состоянием бита №6 слова конфигурации модуля (регистр EKF_CNFG, Таблица 5.82): если использование данных разрешено, то принимаемые данные поступают на вход инерциального фильтра, вырабатывающего поправку к чисто инерциальной высоте. Если использование данных запрещено, поправка формируется из оценки высоты, вырабатываемой на основе показаний встроенного бародатчика.

Таблица 5.65 HABS_EXT_SRC (Страница 1, адрес 0x3A)

Биты	Описание
[15:0]	Код типа внешнего источника данных о высоте над эллипсоидом: 16-битное целое число без знака

Значение по умолчанию: 0.

В текущей версии значение регистра HABS_EXT_SRC не учитывается.

Данные о скоростях настоящего «Технического описания». Для выполнения коррекции необходимо получение и блока данных о координатах, и блока данных о скоростях. Порядок передачи блоков данных не имеет значения. Коррекция выполняется в ближайшем такте расчетов БИНС, следующим за тем моментом, когда по шине SPI поступят данные обоих блоков. После этого содержимое промежуточных буферов

сбрасывается. Считается, что принятые данные описывают параметры движения модуля непосредственно на момент, когда они задействуются в алгоритме коррекции. Если есть необходимость учета того, что момент коррекции отстаёт от момента фактической выработки передаваемых по SPI данных, следует пользоваться режимом «1» работы с внешними данными о координатах и скоростях. Регистр EDS_COMM_STATE (Таблица 5.76) в режимах «0» и «1» содержит код состояния автомата, управляющего приемом по SPI и использованием данных о координатах и скоростях.

В режиме «1» используется также дополнительный по отношению к режиму «0» источник данных: аппаратный сигнал метки времени, ожидаемый блоком на входе №2 разъема модуля. Передний фронт этого сигнала (переход сигнала с низкого уровня на высокий), передаваемого в модуль, должен соответствовать моменту выработки на стороне потребителя «объективных» данных о скоростях и координатах, которые в дальнейшем будут переданы в модуль по шине SPI. По обнаружении переднего фронта сигнала модуль фиксирует время его приема и текущие значения численных инерциальных координат и скоростей, и ожидает приема «объективных» данных о координатах и скоростях по шине SPI тем же порядком, что в режиме «0». По приеме полного набора данных модуль выполняет коррекцию координат и скоростей с учетом момента приема метки времени. Ожидание данных, следующих за меткой времени, не имеет таймаута. Если до момента прихода по SPI полного набора данных будут зарегистрированы новые передние фронты метки времени, каждый из них будет обработан так же, как описано выше. В этом случае к моменту, когда набор принятых по SPI данных достигнет полноты и будет использован для коррекции, он будет считаться целиком относящимся к моменту обнаружения последней из принятых меток времени, независимо от того, была или нет часть данных о координатах и скоростях принята ранее такого момента. Данные о координатах и скоростях, принимаемые до приема первой из меток времени, отбрасываются.

В режимах «2» и «3» предполагается, что к модулю по шине UART (контакты №18 и №20 разъема) подключен приемник GNSS μ Blox NEO-8P. В режиме «3» предполагается дополнительно, что выход №3 («TIMEPULSE») приемника подключен ко входу №2 разъема модуля. При инициализации режимов «2» и «3» модуль настраивает приемник GNSS на следующие параметры работы:

- скорость обмена по шине UART 19200 бод;
- использование навигационных систем GPS (NAVSTAR) и QZSS;
- информационный обмен по протоколу NMEA;
- формирование решения навигационной задачи с периодом 1 с.;
- выдачу сигнала метки времени положительным фронтом 10-мс импульса на выходе TIMEPULSE при условии, что выработано решение навигационной задачи.

По окончании инициализации модуль переходит в режим циклического приема от приемника GNSS пакетов NMEA, анализирует их, и использует полученные данные для коррекции счисления при условии достаточного качества этих данных. Регистр GPS_DATA_QUALITY_FLAGS (Таблица 5.77) содержит текущие значения признаков качества

данных. Регистр EDS_COMM_STATE (Таблица 5.76) в режимах «2» и «3» содержит код состояния автомата управления информационным обменом с приемником GNSS.

В режиме «3», по сравнению с режимом «2», учитывается состояния сигнала метки времени от приемника GNSS μ Blox NEO-8P, аналогично описанному для режима «1», и вводится проверка на применимость полученных от приемника данных по критерию прихода их в определенном интервале времени с момента обнаружения переднего фронта метки времени.

При записи значения в регистр EXT_DATA_SRC соответствующий новый режим работы с внешними данными о координатах и скоростях инициализируется в начале ближайшего следующего такта расчетов. При этом принятые ранее по SPI и не использованные для коррекции данные о координатах и скоростях отбрасываются; при установке режимов «2» и «3» приемник GNSS реинициализируется, даже если переход осуществляется между этими двумя режимами.

По умолчанию установлен и исполняется режим «3».

5.15 Слово состояния взаимодействия с внешним источником данных о координатах и скоростях

Регистр EDS_COMM_STATE доступен для чтения и хранит код состояния автомата, управляющего взаимодействием с выбранным источником «объективных» данных о координатах и скоростях, используемых для коррекции счисления курсовертикали/БИНС.

Расшифровка слова состояния, содержащегося в регистре, зависит от того, какой режим работы с внешними данными о координатах и скоростях активен: один из основанных на получении данных по шине SPI (режимы «0» и «1»), или один основанных на работе с приемником GNSS μ Blox NEO-8P (режимы «2» и «3»), см. описание регистра EXT_DATA_SRC (Таблица 5.75).

Таблица 5.76 EDS_COMM_STATE (Страница 1, адрес 0x2C)

Биты	Описание
[15:0]	Код состояния взаимодействия с внешним источником данных о координатах и скоростях: 16-битное целое число без знака

Возможные значения кода состояния автомата в режимах «0» и «1» работы с внешними данными о координатах и скоростях:

- 0 — взаимодействие не начато или остановлено;
- 1 — проведена инициализация, начато ожидание ведущего элемента данных: в режиме «0» — блока данных о координатах и скоростях, в режиме «1» — метки времени;
- 2 — принята метка времени, ожидание блока данных (состояние возможно только в режиме «1»);

- 3 — принята метка времени, принят полный блок данных (состояние возможно только в режиме «1»);
- 4 — метка времени не используется, принят полный блок данных (состояние возможно только в режиме «0»);
- 5 — принятые данные использованы для коррекции вычислений.

Фактически автомат, достигнув состояния 3 или 4, проходит затем через состояние 5 и возвращается в состояние 1 в рамках одного такта основных расчетов модуля, ближайшего следующего за достижением состояний 3 или 4. Поскольку буфер выходных данных SPI обновляется по окончании такта расчетов, в этих условиях код состояния 5 никогда не оказывался бы достижим для чтения. Во избежание такой ситуации и для удобства анализа выдаваемый по SPI код состояния 5, будучи достигнут, сохраняется еще на протяжении 1 с. с момента достижения. При этом фактически автомат находится в состоянии, эквивалентном состоянию 1 (ожидает ведущего элемента данных). Время 1 с. выбрано в соответствии с рекомендуемой периодичностью передачи в БИНС внешних данных о координатах и скоростях. Если новая метка времени или блок данных, в зависимости от режима, не были получены в течение 1 с., автомат явным образом возвращается в состояние 1.

Возможные значения кода состояния автомата в режимах «2» и «3» работы с внешними данными о координатах и скоростях:

- 0 — взаимодействие не начато или остановлено;
- 1 — выполняется инициализация приемника GNSS μ Blox NEO-8P;
- 2 — инициализация проведена успешно, начато ожидание ведущего элемента данных от приемника: в режиме «2» — данных решения навигационной задачи, в режиме «3» — метки времени;
- 3 — принята метка времени, ожидание данных решения навигационной задачи (состояние возможно только в режиме «3»);
- 4 — принята метка времени, приняты данные решения навигационной задачи, но качество решения навигационной задачи недостаточно (состояние возможно только в режиме «3»);
- 5 — принята метка времени, приняты данные решения навигационной задачи хорошего качества (состояние возможно только в режиме «3»);
- 6 — метка времени не используется, приняты данные решения навигационной задачи, но качество решения навигационной задачи недостаточно (состояние возможно только в режиме «2»);
- 7 — метка времени не используется, приняты данные решения навигационной задачи хорошего качества (состояние возможно только в режиме «2»);
- 8 — принятые данные использованы для коррекции вычислений.

Аналогично описанному для режимов «0» и «1», следующие переходы между состояниями происходят в рамках одного такта расчетов модуля: 3-4-2, 2-6-2, 5-8-2 и 7-8-2. Это не дает возможности состояниям, средним в каждой из этих цепочек, оказаться достижимыми для чтения. Во избежание такой ситуации и для удобства анализа каждое из средних состояний в этих цепочках, будучи достигнуто, сохраняется еще на протяжении

1 с. с момента достижения. При этом фактически автомат находится в состоянии, эквивалентном состоянию 2 (ожидает ведущего элемента данных). Время 1 с. выбрано в соответствии с той периодичностью выдачи решения навигационной задачи, на которую приемник GNSS настраивается в процессе инициализации. Если новая метка времени или данные решения навигационной задачи, в зависимости от режима, не были получены в течение 1 с., автомат явным образом возвращается в состояние 2.

Длительное нахождение автомата в состояниях 2 и 3 и отсутствие переходов в состояния 4..7 может быть обусловлено как проблемами связи с приемником GNSS (полное отсутствие связи; множественные ошибки контрольных сумм пакетов NMEA из-за помех на линии), так и тем, что приемник «не видит» спутников, не вырабатывает решений навигационной задачи, и в силу этого передаваемые им пакеты NMEA не содержат достаточно информации, чтобы можно было выработать суждение о качестве решения навигационной задачи, необходимое для перехода в режимы 4..7.

В случаях, когда качество решения навигационной задачи недостаточное, следует проанализировать содержимое регистра GPS_DATA_QUALITY_FLAGS (Таблица 5.77), чтобы определить, какие конкретно параметры качества решения не удовлетворяют внутренним требованиям БИНС.

5.16 Слово признаков качества данных, принимаемых от приемника GNSS

Регистр GPS_DATA_QUALITY_FLAGS доступен для чтения и хранит слово признаков качества данных, принимаемых от приемника GNSS μ Blox NEO-8P. Содержимое регистра имеет смысл только в том случае, если активен режим «2» или «3» работы с внешними данными о координатах и скоростях (т.е. один из режимов, основанных на использовании приемника GNSS, см. описание регистра EXT_DATA_SRC, Таблица 5.75).

Таблица 5.77 GPS_DATA_QUALITY_FLAGS (Страница 1, адрес 0x30)

Биты	Описание
[15:3]	Резерв
2	Признак величины HDOP «1» — в принятой строке GGA протокола NMEA поле «HDOP» имеет значение, меньшее 6,0. «0» — в принятой строке GGA значение поля «HDOP» больше либо равно 6,0.
1	Признак качества решения навигационной задачи «1» — в принятой строке GGA протокола NMEA поле «GPS Quality indicator» имеет значение, отличное от «0». «0» — в принятой строке GGA значение поля «GPS Quality indicator» равно «0».
0	Признак статуса решения навигационной задачи

	<p>«1» — в принятой строке RMC протокола NMEA поле «статус решения навигационной задачи» имеет значение «А».</p> <p>«0» — в принятой строке RMC значение поля «статус решения навигационной задачи» не равно «А».</p>
--	---

Содержимое регистра обновляется каждый раз, когда приемник GNSS выработал решение навигационной задачи, от него приняты обе строки NMEA, и значение поля времени у них совпадает. Определить момент очередного приема таких строк можно, анализируя состояние регистра EDS_COMM_STATE (Таблица 5.76).

5.17 Внешнее значение угла рыскания

Регистр YAW_EXT доступен для записи и служит для передачи в модуль величины угла рыскания от внешнего источника этой информации. Чтение из регистра возможно, но возвращаемое значение не определено.

Таблица 5.78 YAW_EXT (Страница 1, адрес 0x32)

Биты	Описание
[15:0]	Значение угла рыскания по данным внешнего источника. Дополнительный код, диапазон значений: $-180^{\circ} \dots +180 \cdot (1-2^{-15})^{\circ}$, $0^{\circ} = 0x0000$, ЦМР = $(180 \cdot 2^{-15})^{\circ}$. Можно также интерпретировать это число как радианы, в этом случае диапазон $-\pi \dots +\pi \cdot (1-2^{-15})$, ЦМР = $\pi \cdot 2^{-15}$ рад.

Таблица 5.79 Примеры формата хранения данных в регистре YAW_EXT

Угол рыскания, °	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
$+180 \cdot (1-2^{-15})$	+32767	0x7FFF	0111 1111 1111 1111
$+360/2^{15}$	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
$+180/2^{15}$	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0	0	0	0000 0000 0000 0000
$-180/2^{15}$	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
$-360/2^{15}$	-2	0xFFFFE	1111 1111 1111 1110
-180	-32768	0x8000	1000 0000 0000 0000

Передаваемые значения используются для коррекции угла и оценки дрейфа в канале рыскания, если в битах [15:13] слова конфигурации модуля (регистр EKF_CNFG, Таблица 5.82) установлен код «0», т.е. выбран метод коррекции угла рыскания по данным из внешнего источника, принимаемым через SPI.

5.18 Заданный режим работы модуля

Регистр SYS_MODE_REQ доступен для чтения и записи и служит для передачи в модуль заданного режима его работы.

Таблица 5.80 SYS_MODE_REQ (Страница 1, адрес 0x34)

Биты	Описание
[15:0]	Код заданного режима работы модуля: 16-битное целое число без знака

Возможные значения:

- 1 — режим «курсовертикаль»;
- 2 — режим «БИНС».

Переданное по SPI значение заданного режима работы принимается к исполнению в ближайшем следующем за получением данных такте расчетов модуля. Фактический переход в заданный режим осуществляется как можно скорее по достижении необходимых условий, см. раздел 4.2 «Логика запуска и работы модуля». Значение текущего достигнутого режима работы модуля можно получить, прочитав регистр SYS_MODE_CURR (Таблица 5.81).

Чтение из регистра возвращает значение заданного режима работы, которым руководствовался модуль в ходе ближайшего завершившегося такта расчетов.

Значение по умолчанию — 2.

5.19 Текущий режим работы модуля

Регистр SYS_MODE_CURR доступен для чтения и хранит текущий режим работы модуля.

Таблица 5.81 SYS_MODE_CURR (Страница 1, адрес 0x36)

Биты	Описание
[15:0]	Код текущего режима работы модуля: 16-битное целое число без знака

Возможные значения:

- 0 — инициализация курсовертикали;
- 1 — режим «курсовертикаль»;
- 2 — режим «БИНС».

Значение по умолчанию — 0.

5.20 Конфигурация модуля

Регистр EKF_CNFG содержит слово конфигурации модуля, определяющее некоторые аспекты его функционирования. В следующей таблице описано содержимое битов регистра EKF_CNFG.

Таблица 5.82 EKF_CNFG (Страница 3, адрес 0x50)

Биты	Описание
[15:13]	<p>Код метода коррекции угла и оценки дрейфа в канале рыскания</p> <p>«0»* — инициализация и дальнейшая коррекция угла рыскания по данным из внешнего источника, передаваемым по шине SPI</p> <p>«1»** — инициализация угла рыскания по данным магнитного компаса, без дальнейшей коррекции по компасу как угла, так и дрейфа, с проведением после запуска системы начальной оценки дрейфа в канале рыскания, основанной на предположении о неподвижности модуля — значение по умолчанию</p> <p>«2» — инициализация и дальнейшая коррекция и угла, и дрейфа по данным компаса</p> <p>«3»*** — коррекция угла и дрейфа по данным о северной и восточной скоростях, принимаемых с GPS либо по SPI</p>
12	Резерв
11	<p>Разрешение использовать критерий неподвижности****</p> <p>«0» — запрещено — значение по умолчанию</p> <p>«1» — разрешено</p> <p>Определяет, можно ли обнулять расчетные скорости, если совокупность показаний акселерометров дает основания полагать, что модуль неподвижен («сработал критерий неподвижности»).</p>
10	<p>Применение фабричной коррекции, компенсирующей влияние линейных ускорений на показания ДУС</p> <p>«0» — запрещено</p> <p>«1» — разрешено — значение по умолчанию</p>
9	Резерв
8	<p>Использование оценок дрейфов ДУС, вырабатываемых инерциальными фильтрами, для коррекции данных ДУС при выполнении расчетов</p> <p>«0» — не использовать оценки дрейфов</p>

	«1» — использовать оценки дрейфов — значение по умолчанию
7	Использование инерциальных фильтров для коррекции углов ориентации «0» — не использовать фильтры «1» — использовать фильтры — значение по умолчанию
6	Использование данных о высоте из регистров HABS_EXT_LOW/HABS_EXT_OUT «0» — не использовать — значение по умолчанию «1» — использовать Определяет, следует ли для коррекции высоты использовать данные о высоте, получаемые через SPI-регистры HABS_EXT_LOW/HABS_EXT_OUT («1»), или оценку высоты, вырабатываемую по данным встроенного бародатчика («0»).
5	Разрешение фильтрации GPS/SPI координат на основании данных о северной и восточной GPS/SPI скоростях***** «0» — запрещено «1» — разрешено — значение по умолчанию
4	Выбор формата выдачи данных об ориентации модуля «0» — углы крена/рыскания /тангажа и составляющие кватерниона ориентации — значение по умолчанию «1» — элементы матрицы ориентации
3	Выбор систем координат для выдачи данных инерциальных датчиков «0» — ускорения продольное/боковое/вертикальное, угловые скорости крена/рыскания /тангажа «1» — и ускорения, и угловые скорости в ССК — значение по умолчанию
[2:1]	Резерв
0	Управление составляющей от воздействия силы тяжести в данных акселерометров «0» — выдавать данные акселерометров «как есть» (т.е. полные кажущиеся ускорения, включающие составляющую от воздействия силы тяжести) — значение по умолчанию «1» — вычитать из данных акселерометров составляющую, обусловленную воздействием силы тяжести

* Примечание 1: при выборе метода №0 до запуска курсовертикали, ее запуск не произойдет до тех пор, пока в регистр YAW_EXT (Таблица 5.78) не будет записано хотя бы

одно значение угла рыскания. Запись первого значения в регистр YAW_EXT рекомендуется выполнять после того, как выполнена запись значения в регистр EKF_CNFG, поскольку при смене метода коррекции угла рыскания подсистема курсовертикали сбрасывает и признак приема данных по шине SPI. Это необходимо потому, что в общем случае данные об угле рыскания, принятые по SPI в неопределенный момент в прошлом, к моменту переключения на режим коррекции по ним могут значительно устареть.

** Примечание 2: при выборе метода №1 ожидается, что после подачи питания модуль будет находиться в неподвижном положении как минимум на протяжении 15 с., в противном случае оценка дрейфа в канале рыскания либо не будет выработана вообще (если время неподвижности составит менее 2,5 с.), либо окажется существенно неточной. Оптимальное время составляет 100...200 секунд, в зависимости от разницы температуры внутри блока по сравнению с окружающим воздухом. Факт начала движения определяется либо возмущением акселерометров, превышающим заданный порог, либо в ответ на запрос чтения регистра EKF_CNFG возвращается то значение слова конфигурации, какое имелось на момент завершения ближайшего в прошлом такта расчетов.

*** Примечание 3: при выборе метода №3 данные от иных источников коррекции угла рыскания (компас, внешнее значение угла рыскания по SPI) игнорируются. В ходе работы модуля оценка угла рыскания по данным GPS/SPI ведется непрерывно начиная с 1-го приема по GPS/SPI данных о скоростях, независимо от того, выбран или нет метод №3 коррекции, но применяется полученная оценка только при условии, что выбран метод №3, и выработанная оценка признана достоверной. Условия снятия достоверности оценки:

- запрос оценки угла ранее 2-го приема данных от GPS/SPI;
- хотя бы однократное превышение, за время между предыдущим и текущим приемом данных, угловой скоростью в канале рыскания абсолютной величины 5,0 гр/с, по данным инерциальных расчетов;
- изменение, за время с предыдущего приема данных, угла рыскания на абсолютную величину более 2,0 гр, по данным инерциальных расчетов;
- значение евклидовой нормы земной скорости меньше 4 м/с.

Инициализация курсовертикали с выбранным методом №3 оценки угла рыскания невозможна в силу противоречия между требованием (со стороны курсовертикали) неподвижности модуля на это время, и требованием (со стороны данной подсистемы оценки угла рыскания) заметной земной скорости. Если метод №3 выбран до начала инициализации курсовертикали, ее инициализация никогда не завершится.

**** Примечание 4: даже если обнуление скоростей разрешено и сработал критерий неподвижности, этот факт не используется до тех пор, пока не пройдет более 1 секунды с момента приема данных о координатах и скоростях от внешнего источника (напрямую от приемника GPS или через регистры SPI). Пока такие данные поступают регулярно с паузами, меньшими либо равными 1 секунде, считается, что система располагает актуальными данными из внешнего источника, и они используются для

выработки комплексированного значения скоростей; срабатывание критерия неподвижности при этом игнорируется.

***** Примечание 5: при переключении приемника GPS на новое созвездие возможны значительные скачкообразные изменения координат. При этом скорости по данным GPS остаются в рациональных пределах. Если флаг разрешения фильтрации установлен в «0», то «внешние» (GPS/SPI) данные о координатах используются для коррекции счисления координат в модуле независимо от характера изменения таких «внешних» координат. Если флаг установлен в «1», то при обнаружении скачкообразного изменения «внешних» координат, не соответствующего текущим «внешним» (GPS/SPI) значениям скоростей, для коррекции счисляемых модулем координат используются не «внешние» данные о координатах, а их экстраполированные значения, вычисленные на основе «внешних» же данных о скоростях.

В данной версии программного обеспечения запись в биты [4:0] не влияет на соответствующие параметры работы модуля, результативной является только запись в биты [15:5]. Значение по умолчанию — 0x25A8.

5.21 Калибровка ДУС

Калибровочные регистры для ДУС позволяют выполнять коррекцию масштабных коэффициентов и дрейфов (ненулей) ДУС. Вычисления при этом ведутся по следующей формуле:

$$\begin{bmatrix} \Omega_{XC} \\ \Omega_{YC} \\ \Omega_{ZC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + S_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 1 + S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 + S_{33} \end{bmatrix} \times \left[\begin{bmatrix} \Omega_X \\ \Omega_Y \\ \Omega_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\Omega_X \\ \Delta\Omega_Y \\ \Delta\Omega_Z \end{bmatrix} \right],$$

где:

$[\Omega_X \ \Omega_Y \ \Omega_Z]^T$ — вектор измерений ДУС;

$[\Delta\Omega_X \ \Delta\Omega_Y \ \Delta\Omega_Z]^T$ — вектор корректирующих значений для дрейфов ДУС, представляющий собой вектор оцененных пользователем дрейфов ДУС, взятых с обратным знаком;

S_{NN} — элементы матрицы компенсации масштабных коэффициентов. Диагональные элементы этой матрицы передаются в регистры и возвращаются из них за вычетом единицы, прочие элементы равны 0 и недоступны для изменения пользователем;

$[\Omega_{XC} \ \Omega_{YC} \ \Omega_{ZC}]^T$ — вектор откорректированных измерений ДУС, используется в вычислениях модуля и выдается при опросе регистров x_GYRO_xxx.

5.21.1 Компенсация дрейфов

Регистры с именами формата xG_BIAS_HIGH содержат старшие полуслова (16 бит) вектора корректирующих значений дрейфов ДУС ($\Delta\Omega_X$, $\Delta\Omega_Y$, $\Delta\Omega_Z$). При обработке данных из этих регистров необходимо интерпретировать их как 16-битные знаковые числа, записанные в дополнительном коде. Таблица 5.86 дает примеры хранения данных в регистрах xG_BIAS_HIGH.

Таблица 5.83 XG_BIAS_HIGH (Страница 2, адрес 0x12)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компенсации дрейфа (ненуля) ДУС по оси X ССК. Дополнительный код, диапазон значений: $-655,36..+655,34^{\circ}/с$, $0^{\circ}/с = 0x0000$, ЦМР = $0,02^{\circ}/с$

Таблица 5.84 YG_BIAS_HIGH (Страница 2, адрес 0x16)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компенсации дрейфа (ненуля) ДУС по оси Y ССК. Дополнительный код, диапазон значений: $-655,36..+655,34^{\circ}/с$, $0^{\circ}/с = 0x0000$, ЦМР = $0,02^{\circ}/с$

Таблица 5.85 ZG_BIAS_HIGH (Страница 2, адрес 0x1A)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компенсации дрейфа (ненуля) ДУС по оси Z ССК. Дополнительный код, диапазон значений: $-655,36..+655,34^{\circ}/с$, $0^{\circ}/с = 0x0000$, ЦМР = $0,02^{\circ}/с$

Таблица 5.86 Примеры формата хранения данных в регистрах xG_BIAS_HIGH

Величина коррекции дрейфа ДУС	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
$+655,34^{\circ}/с$	+32767	0x7FFF	0111 1111 1111 1111
$+0,2^{\circ}/с$	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
$+0,1^{\circ}/с$	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
$0^{\circ}/с$	0	0	0000 0000 0000 0000
$-0,02^{\circ}/с$	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
$-0,04^{\circ}/с$	-2	0xFFFFE	1111 1111 1111 1110
$-655,36^{\circ}/с$	-32768	0x8000	1000 0000 0000 0000

В регистрах xG_BIAS_LOW цена старшего разряда равна $0,01^{\circ}/с$, для всех последующих бит цена каждого равна $\frac{1}{2}$ цены предыдущего.

Таблица 5.87 XG_BIAS_LOW (Страница 2, адрес 0x10)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компенсации дрейфа (ненуля) ДУС по оси X ССК: биты дополнительной разрешающей способности

Таблица 5.88 YG_BIAS_LOW (Страница 2, адрес 0x14)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компенсации дрейфа (ненуля) ДУС по оси Y ССК: биты дополнительной разрешающей способности

Таблица 5.89 ZG_BIAS_LOW (Страница 2, адрес 0x18)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компенсации дрейфа (ненуля) ДУС по оси Z ССК: биты дополнительной разрешающей способности

Элементы вектора корректирующих значений относятся к числу как считываемых, так и записываемых данных. Для применения вектора корректирующих значений в вычислениях необходимо, чтобы в алгоритм компенсации попадал согласованный набор из всех трех элементов вектора. Для того, чтобы обеспечить полноту вектора, порядок записи элементов вектора должен удовлетворять следующему требованию: в последовательности транзакций, записывающих элементы вектора в модуль, последней транзакцией должна идти запись в самый старший из регистров, ZG_BIAS_HIGH (Таблица 5.85).

При этом не контролируются ни порядок, ни факт записи остальных пяти регистров; оба аспекта остаются на усмотрение пользователя. Передаваемые в регистры xG_BIAS_ххх данные сохраняются в уникальной для каждого из регистров ячейке промежуточного буфера. Если данные в какой-то из регистров не были записаны, в соответствующей ячейке промежуточного буфера сохраняется предыдущее значение. Если запись в ячейку буфера не производилась ни разу, в ней хранится значение по умолчанию: ноль. При этом по окончании выполнения запроса на запись в регистр ZG_BIAS_HIGH все имеющиеся в промежуточном буфере данные собираются в единый блок и передаются в алгоритм расчета, который принимает этот блок к использованию в ближайшем следующем цикле расчетов.

Чтение из регистров возвращает те значения элементов вектора корректирующих значений, какие использовались в ходе ближайшего в прошлом такта расчетов.

По умолчанию элементы вектора имеют нулевое значение.

5.21.2 Коррекция масштабных коэффициентов

Регистры с именами формата x_GYRO_SCALE содержат элементы корректирующей матрицы для масштабных коэффициентов ДУС (S_{11} , S_{22} , S_{33}). При обработке данных из этих регистров необходимо интерпретировать их как 16-битные знаковые числа, записанные в дополнительном коде. Таблица 5.93 Таблица 5.118 дает примеры хранения данных в регистрах x_GYRO_SCALE.

Таблица 5.90 X_GYRO_SCALE (Страница 2, адрес 0x04)

Биты	Описание
[15:0]	Элемент (1,1) матрицы компенсации масштабных коэффициентов ДУС (компенсация для ДУС по оси X ССК). Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.91 Y_GYRO_SCALE (Страница 2, адрес 0x06)

Биты	Описание
[15:0]	Элемент (2,2) матрицы компенсации масштабных коэффициентов ДУС (компенсация для ДУС по оси Y ССК). Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.92 Z_GYRO_SCALE (Страница 2, адрес 0x08)

Биты	Описание
[15:0]	Элемент (3,3) матрицы компенсации масштабных коэффициентов ДУС (компенсация для ДУС по оси Z ССК). Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.93 Примеры формата хранения данных в регистрах x_GYRO_SCALE

Величина элемента S_{xx}	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
$+1-1/2^{15}$	+32767	0x7FFF	0111 1111 1111 1111
$+2/2^{15}$	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
$+1/2^{15}$	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0	0	0	0000 0000 0000 0000
$-1/2^{15}$	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
$-2/2^{15}$	-2	0xFFFFE	1111 1111 1111 1110
-1	-32768	0x8000	1000 0000 0000 0000

Элементы матрицы компенсации масштабных коэффициентов ДУС относятся к числу как считываемых, так и записываемых данных. Для применения в матрицы компенсации в вычислениях необходимо, чтобы в алгоритм компенсации попадал согласованный набор из всех девяти элементов матрицы. Для того, чтобы обеспечить полноту матрицы, порядок записи ее элементов должен удовлетворять следующему требованию: в последовательности транзакций, записывающих элементы матрицы в модуль, последней транзакцией должна идти запись в самый старший из регистров, Z_GYRO_SCALE (Таблица 5.92).

При этом не контролируются ни порядок, ни факт записи остальных двух регистров; оба аспекта остаются на усмотрение пользователя. Передаваемые в регистры `x_GYRO_SCALE` данные сохраняются в уникальной для каждого из регистров ячейке промежуточного буфера. Если данные в какой-то из регистров не были записаны, в соответствующей ячейке промежуточного буфера сохраняется предыдущее значение. Если запись в ячейку буфера не производилась ни разу, в ней хранится значение по умолчанию: ноль. При этом по окончании выполнения запроса на запись в регистр `Z_GYRO_SCALE` все имеющиеся в промежуточном буфере данные собираются в единый блок и передаются в алгоритм расчета, который принимает этот блок к использованию в ближайшем следующем цикле расчетов.

Чтение из регистров возвращает те значения элементов матрицы компенсации, какие использовались в ходе ближайшего в прошлом такта расчетов.

По умолчанию матрица является единичной. С учетом формата хранения матрицы, при котором диагональные значения хранятся за вычетом 1 из каждого из них, все регистры `x_GYRO_SCALE` по умолчанию содержат число 0.

5.22 Калибровка акселерометров

Калибровочные регистры для акселерометров позволяют выполнять коррекцию масштабных коэффициентов и ненулей акселерометров. Вычисления при этом ведутся по следующей формуле:

$$\begin{bmatrix} a_{XC} \\ a_{YC} \\ a_{ZC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + S_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 1 + S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 + S_{33} \end{bmatrix} \times \left[\begin{bmatrix} a_X \\ a_Y \\ a_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta a_X \\ \Delta a_Y \\ \Delta a_Z \end{bmatrix} \right],$$

где:

$[a_X \ a \ a_Z]^T$ — вектор измерений акселерометров;

$[\Delta a_X \ \Delta a_Y \ \Delta a_Z]^T$ — вектор корректирующих значений для ненулей акселерометров, представляющий собой вектор оцененных пользователем ненулей акселерометров, взятых с обратным знаком;

S_{NN} — элементы матрицы компенсации масштабных коэффициентов. Диагональные элементы этой матрицы передаются в регистры и возвращаются из них за вычетом единицы, прочие элементы равны 0 и недоступны для изменения пользователем;

$[a_{XC} \ a_{YC} \ a_{ZC}]^T$ — вектор откорректированных измерений акселерометров, используется в вычислениях модуля и выдается при опросе регистров `x_ACCL_xxx`.

5.22.1 Компенсация ненулей

Регистры с именами формата `xA_BIAS_HIGH` содержат старшие полуслова (16 бит) вектора корректирующих значений ненулей акселерометров (Δa_X , Δa_Y , Δa_Z). При обработке данных из этих регистров необходимо интерпретировать их как 16-битные

знаковые числа, записанные в дополнительном коде. Таблица 5.97 дает примеры хранения данных в регистрах xA_BIAS_HIGH.

Таблица 5.94 xA_BIAS_HIGH (Страница 2, адрес 0x1E)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компенсации ненуля акселерометра по оси X ССК. Дополнительный код, диапазон значений: $-26,2144..+26,2136 g$, $0 g = 0x0000$, ЦМР = 0,8 мг

Таблица 5.95 yA_BIAS_HIGH (Страница 2, адрес 0x22)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компенсации ненуля акселерометра по оси Y ССК. Дополнительный код, диапазон значений: $-26,2144..+26,2136 g$, $0 g = 0x0000$, ЦМР = 0,8 мг

Таблица 5.96 zA_BIAS_HIGH (Страница 2, адрес 0x26)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компенсации ненуля акселерометра по оси Z ССК. Дополнительный код, диапазон значений: $-26,2144..+26,2136 g$, $0 g = 0x0000$, ЦМР = 0,8 мг

Таблица 5.97 Примеры формата хранения данных в регистрах xA_BIAS_HIGH

Величина коррекции дрейфа ДУС	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
+26,2136 g	+32767	0x7FFF	0111 1111 1111 1111
+1,6 мг	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
+0,8 мг	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0 g	0	0	0000 0000 0000 0000
-0,8 мг	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
-1,6 мг	-2	0xFFFFE	1111 1111 1111 1110
-26,2144 g	-32768	0x8000	1000 0000 0000 0000

В регистрах xA_BIAS_LOW цена старшего разряда равна 0,4 мг, для всех последующих бит цена каждого равна ½ цены предыдущего.

Таблица 5.98 XA_BIAS_LOW (Страница 2, адрес 0x1C)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компенсации ненуля акселерометра по оси X ССК: биты дополнительной разрешающей способности

Таблица 5.99 YA_BIAS_LOW (Страница 2, адрес 0x20)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компенсации ненуля акселерометра по оси Y ССК: биты дополнительной разрешающей способности

Таблица 5.100 ZA_BIAS_LOW (Страница 2, адрес 0x24)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компенсации ненуля акселерометра по оси Z ССК: биты дополнительной разрешающей способности

Элементы вектора корректирующих значений относятся к числу как считываемых, так и записываемых данных. Для применения вектора корректирующих значений в вычислениях необходимо, чтобы в алгоритм компенсации попадал согласованный набор из всех трех элементов вектора. Для того, чтобы обеспечить полноту вектора, порядок записи элементов вектора должен удовлетворять следующему требованию: в последовательности транзакций, записывающих элементы вектора в модуль, последней транзакцией должна идти запись в самый старший из регистров, ZA_BIAS_HIGH (Таблица 5.96).

При этом не контролируются ни порядок, ни факт записи остальных пяти регистров; оба аспекта остаются на усмотрение пользователя. Передаваемые в регистры xA_BIAS_xxx данные сохраняются в уникальной для каждого из регистров ячейке промежуточного буфера. Если данные в какой-то из регистров не были записаны, в соответствующей ячейке промежуточного буфера сохраняется предыдущее значение. Если запись в ячейку буфера не производилась ни разу, в ней хранится значение по умолчанию: ноль. При этом по окончании выполнения запроса на запись в регистр ZA_BIAS_HIGH все имеющиеся в промежуточном буфере данные собираются в единый блок и передаются в алгоритм расчета, который принимает этот блок к использованию в ближайшем следующем цикле расчетов.

Чтение из регистров возвращает те значения элементов вектора корректирующих значений, какие использовались в ходе ближайшего в прошлом такта расчетов.

По умолчанию элементы вектора имеют нулевое значение.

5.22.2 Коррекция масштабных коэффициентов

Регистры с именами формата `x_ACCL_SCALE` содержат элементы корректирующей матрицы для масштабных коэффициентов акселерометров (S_{11} , S_{22} , S_{33}). При обработке данных из этих регистров необходимо интерпретировать их как 16-битные знаковые числа, записанные в дополнительном коде. Таблица 5.104 Таблица 5.118 дает примеры хранения данных в регистрах `x_ACCL_SCALE`.

Таблица 5.101 X_ACCL_SCALE (Страница 2, адрес 0x0A)

Биты	Описание
[15:0]	Элемент (1,1) матрицы компенсации масштабных коэффициентов акселерометров (компенсация для акселерометра по оси X ССК). Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.102 Y_ACCL_SCALE (Страница 2, адрес 0x0C)

Биты	Описание
[15:0]	Элемент (2,2) матрицы компенсации масштабных коэффициентов акселерометров (компенсация для акселерометра по оси Y ССК). Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.103 Z_ACCL_SCALE (Страница 2, адрес 0x0E)

Биты	Описание
[15:0]	Элемент (3,3) матрицы компенсации масштабных коэффициентов акселерометров (компенсация для акселерометра по оси Z ССК). Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.104 Примеры формата хранения данных в регистрах x_ACCL_SCALE

Величина элемента S_{xx}	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
$+1-1/2^{15}$	+32767	0x7FFF	0111 1111 1111 1111
$+2/2^{15}$	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
$+1/2^{15}$	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0	0	0	0000 0000 0000 0000
$-1/2^{15}$	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
$-2/2^{15}$	-2	0xFFFFE	1111 1111 1111 1110
-1	-32768	0x8000	1000 0000 0000 0000

Элементы матрицы компенсации масштабных коэффициентов акселерометров относятся к числу как считываемых, так и записываемых данных. Для применения в матрицы компенсации в вычислениях необходимо, чтобы в алгоритм компенсации попадал согласованный набор из всех девяти элементов матрицы. Для того, чтобы обеспечить полноту матрицы, порядок записи ее элементов должен удовлетворять следующему требованию: в последовательности транзакций, записывающих элементы матрицы в модуль, последней транзакцией должна идти запись в самый старший из регистров, Z_ACCL_SCALE (Таблица 5.103Таблица 5.92).

При этом не контролируются ни порядок, ни факт записи остальных двух регистров; оба аспекта остаются на усмотрение пользователя. Передаваемые в регистры x_ACCL_SCALE данные сохраняются в уникальной для каждого из регистров ячейке промежуточного буфера. Если данные в какой-то из регистров не были записаны, в соответствующей ячейке промежуточного буфера сохраняется предыдущее значение. Если запись в ячейку буфера не производилась ни разу, в ней хранится значение по умолчанию: ноль. При этом по окончании выполнения запроса на запись в регистр Z_ACCL_SCALE все имеющиеся в промежуточном буфере данные собираются в единый блок и передаются в алгоритм расчета, который принимает этот блок к использованию в ближайшем следующем цикле расчетов.

Чтение из регистров возвращает те значения элементов матрицы компенсации, какие использовались в ходе ближайшего в прошлом такта расчетов.

По умолчанию матрица является единичной. С учетом формата хранения матрицы, при котором диагональные значения хранятся за вычетом 1 из каждого из них, все регистры x_ACCL_SCALE по умолчанию содержат число 0.

5.23 Калибровка магнитометра

Калибровочные регистры для магнитометра позволяют выполнять коррекцию как hard-iron, так и soft-iron искажений. Вычисления при этом ведутся по следующей формуле:

$$\begin{bmatrix} M_{XC} \\ M_{YC} \\ M_{ZC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & 1 + S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & 1 + S_{33} \end{bmatrix} \times \left[\begin{bmatrix} M_X \\ M_Y \\ M_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_X \\ H_Y \\ H_Z \end{bmatrix} \right],$$

где:

$[M_X \ M_Y \ M_Z]^T$ — вектор измерений магнитометров;

$[H_X \ H_Y \ H_Z]^T$ — вектор корректирующих значений для hard-iron искажений, в условиях невозмущенного магнитного поля представляющий собой вектор ненулей магнитометров, взятых с обратным знаком;

S_{ab} — элементы матрицы компенсации soft-iron искажений, диагональные элементы этой матрицы передаются в регистры и возвращаются из них за вычетом единицы;

$[M_{XC} \ M_{YC} \ M_{ZC}]^T$ — вектор откорректированных измерений магнитометров, используется при вычислении магнитного курса и выдается при опросе регистров x_MAGN_OUT.

5.23.1 Компенсация hard-iron искажений

Регистры с именами формата HARD_IRON_x содержат элементы вектора корректирующих значений для hard-iron искажений (H_x , H_y , H_z). При обработке данных из этих регистров необходимо интерпретировать их как 16-битные знаковые числа, записанные в дополнительном коде. Таблица 5.108 дает примеры хранения данных в регистрах HARD_IRON_x.

Таблица 5.105 HARD_IRON_X (Страница 2, адрес 0x28)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компенсации ненуля (hard-iron искажений) магнитометра по оси X ССК. Дополнительный код, диапазон значений: $-3,2768..+3,2767$ Гаусс, 0 Гаусс = 0x0000, ЦМР = 0,1 мГаусс

Таблица 5.106 HARD_IRON_Y (Страница 2, адрес 0x2A)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компенсации ненуля (hard-iron искажений) магнитометра по оси Y ССК. Дополнительный код, диапазон значений: $-3,2768..+3,2767$ Гаусс, 0 Гаусс = 0x0000, ЦМР = 0,1 мГаусс

Таблица 5.107 HARD_IRON_Z (Страница 2, адрес 0x2C)

Биты	Описание
[15:0]	Величина компенсации ненуля (hard-iron искажений) магнитометра по оси Z ССК. Дополнительный код, диапазон значений: $-3,2768..+3,2767$ Гаусс, 0 Гаусс = 0x0000, ЦМР = 0,1 мГаусс

Таблица 5.108 Примеры формата хранения данных в регистрах HARD_IRON_x

Напряженность магнитного поля	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
+3,2767 Гаусс	+32767	0x7FFF	0111 1111 1111 1111
+0,2 мГаусс	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
+0,1 мГаусс	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0 Гаусс	0	0	0000 0000 0000 0000
-0,1 мГаусс	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
-0,2 мГаусс	-2	0xFFFFE	1111 1111 1111 1110
-3,2768 Гаусс	-32768	0x8000	1000 0000 0000 0000

Элементы вектора корректирующих значений относятся к числу как считываемых, так и записываемых данных. Для применения вектора корректирующих значений в вычислениях необходимо, чтобы в алгоритм компенсации попадал согласованный набор из всех трех элементов вектора. Для того, чтобы обеспечить полноту вектора, порядок записи элементов вектора должен удовлетворять следующему требованию: в последовательности транзакций, записывающих элементы вектора в модуль, последней транзакцией должна идти запись в самый старший из регистров, HARD_IRON_Z (Таблица 5.107).

При этом не контролируются ни порядок, ни факт записи двух остальных регистров; оба аспекта остаются на усмотрение пользователя. Передаваемые в регистры HARD_IRON_x данные сохраняются в уникальной для каждого из регистров ячейке промежуточного буфера. Если данные в какой-то из регистров не были записаны, в соответствующей ячейке промежуточного буфера сохраняется предыдущее значение. Если запись в ячейку буфера не производилась ни разу, в ней хранится значение по умолчанию: ноль. При этом по окончании выполнения запроса на запись в регистр HARD_IRON_Z все имеющиеся в промежуточном буфере данные собираются в единый блок и передаются в алгоритм расчета, который принимает этот блок к использованию в ближайшем следующем цикле расчетов.

Чтение из регистров возвращает те значения элементов вектора корректирующих значений, какие использовались в ходе ближайшего в прошлом такта расчетов.

По умолчанию элементы вектора имеют нулевое значение.

5.23.2 Коррекция soft-iron искажений

Регистры с именами формата SOFT_IRON_Sxx содержат элементы корректирующей матрицы для soft-iron искажений ($S_{11}..S_{33}$). При обработке данных из этих регистров необходимо интерпретировать их как 16-битные знаковые числа, записанные в дополнительном коде. Таблица 5.118 дает примеры хранения данных в регистрах SOFT_IRON_Sxx.

Таблица 5.109 SOFT_IRON_S11 (Страница 2, адрес 0x2E)

Биты	Описание
[15:0]	Элемент (1,1) матрицы компенсации soft-iron искажений магнитометра. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.110 SOFT_IRON_S12 (Страница 2, адрес 0x30)

Биты	Описание
[15:0]	Элемент (1,2) матрицы компенсации soft-iron искажений магнитометра. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.111 SOFT_IRON_S13 (Страница 2, адрес 0x32)

Биты	Описание
[15:0]	Элемент (1,3) матрицы компенсации soft-iron искажений магнитометра. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.112 SOFT_IRON_S21 (Страница 2, адрес 0x34)

Биты	Описание
[15:0]	Элемент (2,1) матрицы компенсации soft-iron искажений магнитометра. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.113 SOFT_IRON_S22 (Страница 2, адрес 0x36)

Биты	Описание
[15:0]	Элемент (2,2) матрицы компенсации soft-iron искажений магнитометра. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.114 SOFT_IRON_S23 (Страница 2, адрес 0x38)

Биты	Описание
[15:0]	Элемент (2,3) матрицы компенсации soft-iron искажений магнитометра. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.115 SOFT_IRON_S31 (Страница 2, адрес 0x3A)

Биты	Описание
[15:0]	Элемент (3,1) матрицы компенсации soft-iron искажений магнитометра. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.116 SOFT_IRON_S32 (Страница 2, адрес 0x3C)

Биты	Описание
[15:0]	Элемент (3,2) матрицы компенсации soft-iron искажений магнитометра. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.117 SOFT_IRON_S33 (Страница 2, адрес 0x3E)

Биты	Описание
[15:0]	Элемент (3,3) матрицы компенсации soft-iron искажений магнитометра. Дополнительный код, диапазон значений: $-1..1-2^{-15}$, 0 = 0x0000, ЦМР = 2^{-15}

Таблица 5.118 Примеры формата хранения данных в регистрах SOFT_IRON_Sxx

Величина элемента S _{xx}	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
$+1-1/2^{15}$	+32767	0x7FFF	0111 1111 1111 1111
$+2/2^{15}$	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
$+1/2^{15}$	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0	0	0	0000 0000 0000 0000
$-1/2^{15}$	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
$-2/2^{15}$	-2	0xFFFFE	1111 1111 1111 1110
-1	-32768	0x8000	1000 0000 0000 0000

Элементы матрицы компенсации soft-iron искажений относятся к числу как считываемых, так и записываемых данных. Для применения в матрицы компенсации в вычислениях необходимо, чтобы в алгоритм компенсации попадал согласованный набор из всех девяти элементов матрицы. Для того, чтобы обеспечить полноту матрицы, порядок записи ее элементов должен удовлетворять следующему требованию: в последовательности транзакций, записывающих элементы матрицы в модуль, последней транзакцией должна идти запись в самый старший из регистров, SOFT_IRON_S33 (Таблица 5.117).

При этом не контролируются ни порядок, ни факт записи остальных восьми регистров; оба аспекта остаются на усмотрение пользователя. Передаваемые в регистры

SOFT_IRON_Sxx данные сохраняются в уникальной для каждого из регистров ячейке промежуточного буфера. Если данные в какой-то из регистров не были записаны, в соответствующей ячейке промежуточного буфера сохраняется предыдущее значение. Если запись в ячейку буфера не производилась ни разу, в ней хранится значение по умолчанию: ноль. При этом по окончании выполнения запроса на запись в регистр SOFT_IRON_S33 все имеющиеся в промежуточном буфере данные собираются в единый блок и передаются в алгоритм расчета, который принимает этот блок к использованию в ближайшем следующем цикле расчетов.

Чтение из регистров возвращает те значения элементов матрицы компенсации, какие использовались в ходе ближайшего в прошлом такта расчетов.

По умолчанию матрица является единичной. С учетом формата хранения матрицы, при котором диагональные значения хранятся за вычетом 1 из каждого из них, все регистры SOFT_IRON_Sxx по умолчанию содержат число 0.

5.24 Магнитное склонение

Регистр DECLN_ANGL содержит величину магнитного склонения, используемую в расчетах величины магнитного курса. При обработке данных из этого регистра необходимо интерпретировать их как 16-битные знаковые числа, записанные в дополнительном коде. Таблица 5.120 дает примеры хранения данных в регистре DECLN_ANGL.

Таблица 5.119 DECLN_ANGL (Страница 3, адрес 0x54)

Биты	Описание
[15:0]	Величина магнитного склонения. Дополнительный код, диапазон значений: $-180^{\circ}..+180 \cdot (1-2^{-15})^{\circ}$, $0^{\circ} = 0x0000$, ЦМР = $(180 \cdot 2^{-15})^{\circ}$. Можно также интерпретировать это число как радианы, в этом случае диапазон $-\pi..+\pi \cdot (1-2^{-15})$, ЦМР = $\pi \cdot 2^{-15}$ рад.

Таблица 5.120 Примеры формата хранения данных в регистре DECLN_ANGL

Угол рыскания, °	Десятичная запись	Шестнадцатеричная запись	Двоичная запись
$+180 \cdot (1-2^{-15})$	+32767	0x7FFF	0111 1111 1111 1111
$+360/2^{15}$	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
$+180/2^{15}$	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0	0	0	0000 0000 0000 0000
$-180/2^{15}$	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
$-360/2^{15}$	-2	0xFFFFE	1111 1111 1111 1110
-180	-32768	0x8000	1000 0000 0000 0000

Значение по умолчанию: 12° — приблизительная величина магнитного склонения для Московской области (в шестнадцатеричной записи 0x0888).

5.25 Счетчик обновлений данных в программном буфере SPI

Регистр SPI_UPD_CNT содержит счетчик, который служит индикатором начала и окончания процедуры обновления программного буфера выходных данных регистров SPI (см. п. «4.4.2 Аспекты записи и чтения регистров SPI»). При обработке данных из этого регистра необходимо интерпретировать их как 16-битные беззнаковые числа. Таблица 5.121 дает примеры хранения данных в регистрах x_MAGN_OUT и MAGN_NORM_OUT.

Таблица 5.121 SPI_UPD_CNT (Страница 0, адрес 0x76)

Биты	Описание
[15:0]	Удвоенный номер цикла обновления программного буфера выходных данных регистров SPI: 16-битное целое число без знака

Счетчик увеличивается на 1 перед началом процедуры обновления программного буфера выходных значений регистров SPI, и еще раз увеличивается на 1 по завершении этой процедуры. Таким образом, нечетное значение счетчика сигнализирует о том, что идет обновление программного буфера, и попытки чтения прочих регистров могут возвращать несогласованный результат: часть данных будет относиться к предыдущему циклу расчетом модуля, часть — к только что завершившемуся.

При достижении значения 65535₁₀, следующим инкрементом счетчик обнуляется, и счет начинается заново.

Значение по умолчанию — 0.

5.26 Команды управления

Регистр GLOB_CMD представляет собой битовое поле, биты которого отвечают за запуск той или иной операции с модулем. Чтобы запустить необходимую операцию, нужно записать значение «1» в соответствующий бит регистра. Таблица 5.122 описывает значения битов.

Таблица 5.122 GLOB_CMD (Страница 3, адрес 0x02)

Биты	Описание
[15:8]	Резерв
7	Программный перезапуск
[6:5]	Резерв

Биты	Описание
4	Ошибка при записи пользовательских настроек во флэш-память модуля
3	Запись пользовательских настроек во флэш-память модуля
[2:0]	Резерв

Значение по умолчанию — 0.

Чтобы инициировать программный перезапуск модуля, переключитесь на страницу №3 регистров (пошлите на шину SPI значение 0x8003), и затем запишите «1» в бит №7 регистра GLOB_CMD (пошлите на шину SPI последовательно значения 0x8280 и 0x8300). Эта функция является программной альтернативой выдаче низкого уровня на ножку Soft_reset блока (рис. 3.1, контакт 8). Перезапуск удаляет накопленные данные, сбрасывает все калибровочные значения к величинам, записанным во флэш-памяти устройства, и заново запускает сбор данных с датчиков и алгоритмы расчетов курсовертикали/БИНС.

Для записи калибровочных значений, переданных пользователем, во флэш-память модуля, нужно записать «1» в бит №2 регистра GLOB_CMD. Принятая команда буферизуется, и поступает на исполнение в начале ближайшего следующего цикла расчетов модуля. Чтобы контролировать процесс записи, необходимо после выдачи команды на запись циклически опрашивать регистр GLOB_CMD. Бит №3 этого регистра гарантированно примет значение «1» после фактического начала процедуры записи, и сохранит это значение на протяжении как минимум одного такта расчетов модуля, даже если процесс записи закончится раньше. Кроме того, в момент начала процедуры записи бит №4 установится в значение «0», индицируя априорное отсутствие ошибок записи. В конце такта расчетов, ближайшего за окончанием записи, значение бита №3 поменяется на «0». Такая смена значения бита №3 (с «1» на «0») означает, что команда была исполнена.

Если в ходе попытки записи произойдет ошибка, бит №4 регистра GLOB_CMD примет значение «1». Если запись окончится успешно, бит №4 примет значение «0». Полученное значение сохранится в этом бите до получения следующей команды на запись данных во флэш-память.

В силу особенностей аппаратной организации доступа к флэш-памяти, на время записи данных в нее опрос первичных датчиков оказывается невозможен. Поэтому в этот период на вход алгоритмов вычислений вместо фактических данных с датчиков поступает копия последних данных, принятых с датчиков до запуска процедуры записи. В силу этого, если процесс записи оказался достаточно долгим, чтобы повлиять на точность расчетов, рекомендуется по завершении записи перезапустить модуль.

Перечень параметров, записываемых во флэш-память в качестве пользовательских настроек:

- величина магнитного склонения (см. раздел «5.24 Магнитное склонение»);

- матрица коррекции soft-iron для магнитометра (см. раздел «5.23.2 Коррекция soft-iron искажений»);
- вектор коррекции hard-iron для компаса для магнитометра (см. раздел «5.23.1 Компенсация hard-iron искажений»);
- матрица компенсации масштабного коэффициента и неортогональности для акселерометров
- вектор компенсации ненулей для акселерометров
- матрица компенсации масштабного коэффициента и неортогональности для ДУСов
- вектор компенсации ненулей для ДУСов

5.27 Регистр FNCTIO_CTRL: управление функцией линии GPS_T_PULSE

Регистр FNCTIO_CTRL управляет режимом внешней синхронизации модуля. По умолчанию тактирование как операции снятия данных с датчиков, так и функции усреднения данных и, следовательно, функции основных навигационных расчетов модуля осуществляется синхронно от внутреннего таймера. Однако при необходимости можно переключить модуль на выполнение операций усреднения и расчетов навигации по сигналу внешней синхронизации.

Сигнал внешней синхронизации может приниматься только по одному из контактов разъема модуля: GPS_T_PULSE. По умолчанию этот контакт выполняет функцию приемника сигнала метки времени GPS, но в случае активации режима внешней синхронизации он перестает использоваться в этом качестве. Прием метки времени становится невозможен; учитывайте этот факт при настройке режима работы с GPS.

Таблица 5.123 FNCTIO_CTRL (Страница 3, адрес 0x06)

Биты	Описание
[15:8]	Резерв
7	Активация режима внешней синхронизации по линии GPS_T_PULSE
[6:0]	Резерв

Значение по умолчанию — 0.

Значение «0» бита №7 задает для линии GPS_T_PULSE модуля функцию «приемник сигнала метки времени GPS».

Запись «1» в бит №7 регистра активирует режим внешней синхронизации модуля и задает для линии GPS_T_PULSE модуля функцию «приемник внешнего синхросигнала». При этом непосредственно процедура снятия данных продолжает тактироваться от внутреннего таймера, и фактическая частота съема данных с инерциальных датчиков модуля остается равной 5 кГц. Однако передача данных на усреднение не производится

до тех пор, пока не будет обнаружен очередной передний фронт сигнала по линии GPS_T_PULSE.

При обнаружении на этой линии переднего фронта сигнала запускается очередной цикл исполнения процедуры усреднения данных, и в нее передается наиболее «свежий» набор данных с инерциальных датчиков. В отсутствие очередного фронта сигнала внешней синхронизации, по мере появления новых наборов данных, более ранние наборы в буфере на передачу отбрасываются, заменяясь вновь полученными.

Длительность высокого уровня сигнала внешней синхронизации должна составлять не менее 5 мкс.

Не рекомендуется задавать сигналу внешней синхронизации частоту выше 2500 Гц: появление каждого фронта сигнала вызывает в модуле аппаратное прерывание, и при высокой частоте сигнала синхронизации процессор модуля может оказаться существенно загружен обработкой этих прерываний, что будет препятствовать нормальному ходу выполнения основных расчетов навигационной задачи.

5.28 Обнаружение отказов

В целях улучшения характеристик и повышения отказоустойчивости модуля в целом его система датчиков имеет избыточность, которая позволяет, в том числе, обнаруживать некоторые виды отказов, обрабатывать их без существенного ухудшения точности работы и сообщать пользователю об этих событиях.

5.28.1 Логика определения отказов

Отказ заводской калибровки

Непосредственно после включения и начальной инициализации из энергонезависимой памяти считываются данные заводской калибровки датчиков. Если какие-либо данные не удалось считать или их контрольная сумма неверна, то для соответствующих датчиков устанавливается признак отказа «Повреждены или недоступны данные заводской калибровки». Такие датчики не участвуют в дальнейшей работе модуля, этот признак отказа является постоянным (т.е. не снимается) в текущем включении/запуске.

Отказ по итогам встроенного самоконтроля

После подачи питания или программного перезапуска модуля на акселерометры и ДУС подаются внутрисхемные калибровочные физические воздействия. Отклик датчиков на эти воздействия должен находиться в заданных пределах. При выходе отклика за эти пределы соответствующим датчикам устанавливается признак «Отказ по итогам встроенного самоконтроля». Такие датчики не участвуют в дальнейшей работе модуля, этот признак отказа также является постоянным в текущем включении/запуске.

«Заморозка» показаний

Показания акселерометров, ДУС, магнитометров и бародатчика в ходе циклов усреднения (при децимации) контролируются на «замораживание»: если на протяжении заданного количества циклов опроса показания того или иного датчика остаются совершенно неизменными (что невозможно для исправного датчика, имеющего ненулевой собственный шум), то соответствующему датчику устанавливается признак «Отказ по критерию «заморозки» показаний». Этот признак снимается, как только будет получено первое отличающееся показание. Пока признак активен, датчик не используется в работе модуля. Для акселерометров и ДУС пороговое значение для констатации «заморозки» установлено в 25 циклов усреднения (5 мс при тактировании от внутреннего таймера; в режиме внешней синхронизации — 25 периодов внешнего синхросигнала). Для магнитометров — 10 мс, для бародатчика — 250 мс.

Отказ по отклонению от медианного значения

Также в конце цикла усреднения, после того как получены средние значения для каждого из датчиков, те из акселерометров, ДУС и термометров, которые не имеют иных отказов, используются для оценки исправности по критерию отклонения от медианного значения в группе. Группы для оценки формируются следующим образом:

- для акселерометров: группа составляется из всех исправных датчиков в данной оси — итого 3 группы, по одной на каждую ось X, Y, Z;
- для ДУС: группа составляется из всех исправных датчиков в данной оси — итого 3 группы, по одной на каждую ось X, Y, Z;
- группа составляется из всех исправных термометров, как «аналоговых», так и «цифрового».

Медианное значение в группе вычисляется следующим образом:

- для группы из 4 элементов — как среднее арифметическое двух центральных элементов после сортировки элементов группы по возрастанию;
- для группы из 3 элементов — берется значение центрального элемента после сортировки элементов группы по возрастанию;
- для группы из 2 элементов — как среднее арифметическое элементов группы.

В случае единственного элемента в группе оценка отклонения от медианы не выполняется.

Показания каждого датчика в группе сравниваются с медианным значением, и если отклонение от него в ту или иную сторону превышает заданный порог, то соответствующему датчику устанавливается признак «Отказ по критерию отклонения от медианы». Данные такого датчика не используются в текущем цикле расчетов. Этот признак устанавливается или снимается в конце каждого цикла усреднения.

Для акселерометров и ДУС, в завершении цикла усреднения, при выполнении усреднения по соответствующей группе датчиков, показания отказавшего датчика заменяются медианным значением в группе.

При использовании термометров в целях выполнения температурной компенсации данных акселерометров, ДУС и магнитометров показания отказавшего термометра заменяются медианным значением в группе.

5.28.2 Учет отказов датчиков в логике работы модуля

Любой одиночный отказ любого из акселерометров, ДУС и магнитометров следует считать предотказной ситуацией.

Модуль не предпринимает никаких специальных действий в случае обнаружения того или иного отказа — в частности, не прекращает использование данных бародатчика и магнитометров для оценки, соответственно, высоты и угла рыскания. Анализ отказной ситуации и принятие решения о переходе на иную конфигурацию работы модуля оставляется на усмотрение пользователя.

5.28.3 Обобщенные признаки отказов

Регистры ACCL_FAIL_SUMM (Таблица 5.124), GYRO_FAIL_SUMM (Таблица 5.125), MISC_FAIL_SUMM (Таблица 5.126) и OTHER_FAIL_SUMM (Таблица 5.127) хранят обобщенные признаки отказов датчиков и элементов модуля: только наличие или отсутствие факта обнаружения отказа, без уточнения причин.

Значение «0» некоторого бита означает исправность соответствующего датчика (отсутствие отказа подсистемы), значение «1» — неисправность датчика (наличие отказа).

Таблица 5.124 ACCL_FAIL_SUMM (Страница 0, адрес 0x40)

Биты	Описание
[15:12]	Резерв
11	Отказ акселерометра №4 по оси Z
10	Отказ акселерометра №3 по оси Z
9	Отказ акселерометра №2 по оси Z
8	Отказ акселерометра №1 по оси Z
7	Отказ акселерометра №4 по оси Y
6	Отказ акселерометра №3 по оси Y
5	Отказ акселерометра №2 по оси Y
4	Отказ акселерометра №1 по оси Y
3	Отказ акселерометра №4 по оси X

Биты	Описание
2	Отказ акселерометра №3 по оси X
1	Отказ акселерометра №2 по оси X
0	Отказ акселерометра №1 по оси X

Таблица 5.125 GYRO_FAIL_SUMM (Страница 0, адрес 0x42)

Биты	Описание
[15:12]	Резерв
11	Отказ ДУС №4 по оси Z
10	Отказ ДУС №3 по оси Z
9	Отказ ДУС №2 по оси Z
8	Отказ ДУС №1 по оси Z
7	Отказ ДУС №4 по оси Y
6	Отказ ДУС №3 по оси Y
5	Отказ ДУС №2 по оси Y
4	Отказ ДУС №1 по оси Y
3	Отказ ДУС №4 по оси X
2	Отказ ДУС №3 по оси X
1	Отказ ДУС №2 по оси X
0	Отказ ДУС №1 по оси X

Таблица 5.126 MISC_FAIL_SUMM (Страница 0, адрес 0x44)

Биты	Описание
[15:8]	Резерв
7	Отказ магнитометра по оси Z
6	Отказ магнитометра по оси Y

Биты	Описание
5	Отказ магнитометра по оси X
4	Отказ бародатчика
3	Отказ «цифрового» термометра
2	Отказ «аналогового» термометра №3
1	Отказ «аналогового» термометра №2
0	Отказ «аналогового» термометра №1

Таблица 5.127 OTHER_FAIL_SUMM (Страница 0, адрес 0x46)

Биты	Описание
[15:1]	Резерв
0	Ошибка чтения заводского номера модуля

5.28.4 Детализированные признаки отказов

Регистры с названиями вида ACCL_FAIL_схх, где с — имя оси, хх — номера датчиков в этой оси, хранят слова признаков отказа соответствующих акселерометров.

Регистры с названиями вида GYRO_FAIL_схх, где с — имя оси, хх — номера датчиков в этой оси, хранят слова признаков отказа соответствующих ДУСов.

Регистр MAGN_FAIL_XY хранит слова признаков отказа магнитометров по осям X и Y, MAGN_Z_BARO_FAIL — слова признаков отказа магнитометра по оси Z и бародатчика, TEMP_FAIL_12 — слова признаков отказа «аналоговых» термометров №1 и №2, TEMP_FAIL_3DIG — слова признаков отказа «аналогового» термометров №3 и «цифрового» термометра.

Расшифровка значений битов слов признаков приведена после таблиц.

Таблица 5.128 ACCL_FAIL_X12 (Страница 0, адрес 0x32)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа акселерометра №2 по оси X
[7:0]	Слово признаков отказа акселерометра №1 по оси X

Таблица 5.129 ACCL_FAIL_X34 (Страница 0, адрес 0x34)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа акселерометра №4 по оси X
[7:0]	Слово признаков отказа акселерометра №3 по оси X

Таблица 5.130 ACCL_FAIL_Y12 (Страница 0, адрес 0x36)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа акселерометра №2 по оси Y
[7:0]	Слово признаков отказа акселерометра №1 по оси Y

Таблица 5.131 ACCL_FAIL_Y34 (Страница 0, адрес 0x38)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа акселерометра №4 по оси Y
[7:0]	Слово признаков отказа акселерометра №3 по оси Y

Таблица 5.132 ACCL_FAIL_Z12 (Страница 0, адрес 0x3A)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа акселерометра №2 по оси Z
[7:0]	Слово признаков отказа акселерометра №1 по оси Z

Таблица 5.133 ACCL_FAIL_Z34 (Страница 0, адрес 0x3C)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа акселерометра №4 по оси Z
[7:0]	Слово признаков отказа акселерометра №3 по оси Z

Таблица 5.134 GYRO_FAIL_X12 (Страница 0, адрес 0x48)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа ДУС №2 по оси X

Биты	Описание
[7:0]	Слово признаков отказа ДУС №1 по оси X

Таблица 5.135 GYRO_FAIL_X34 (Страница 0, адрес 0x4A)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа ДУС №4 по оси X
[7:0]	Слово признаков отказа ДУС №3 по оси X

Таблица 5.136 GYRO_FAIL_Y12 (Страница 0, адрес 0x4C)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа ДУС №2 по оси Y
[7:0]	Слово признаков отказа ДУС №1 по оси Y

Таблица 5.137 GYRO_FAIL_Y34 (Страница 0, адрес 0x4E)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа ДУС №4 по оси Y
[7:0]	Слово признаков отказа ДУС №3 по оси Y

Таблица 5.138 GYRO_FAIL_Z12 (Страница 0, адрес 0x50)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа ДУС №2 по оси Z
[7:0]	Слово признаков отказа ДУС №1 по оси Z

Таблица 5.139 GYRO_FAIL_Z34 (Страница 0, адрес 0x52)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа ДУС №4 по оси Z
[7:0]	Слово признаков отказа ДУС №3 по оси Z

Таблица 5.140 MAGN_FAIL_XY (Страница 0, адрес 0x54)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа магнитометра по оси Y
[7:0]	Слово признаков отказа магнитометра по оси X

Таблица 5.141 MAGN_Z_BARO_FAIL (Страница 0, адрес 0x56)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа бародатчика
[7:0]	Слово признаков отказа магнитометра по оси Z

Таблица 5.142 TEMP_FAIL_12 (Страница 0, адрес 0x58)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа «аналогового» термометра №2
[7:0]	Слово признаков отказа «аналогового» термометра №1

Таблица 5.143 TEMP_FAIL_3DIG (Страница 0, адрес 0x5A)

Биты	Описание
[15:8]	Слово признаков отказа «цифрового» термометра
[7:0]	Слово признаков отказа «аналогового» термометра №3

Слово признаков отказа имеет длину 8 бит, каждый из этих бит хранит признак наличия («1») или отсутствия («0») того или иного специфического отказа. Расшифровка значений бит слова признаков отказа дана в таблице ниже.

Таблица 5.144 Структура слова признаков отказа датчика

Биты	Описание
[7:4]	Резерв

Биты	Описание
3	«Отказ по критерию отклонения от медианы»: отклонение показаний данного датчика от медианного значения в группе датчиков превысило в ту или иную сторону заданный порог отклонения
2	«Отказ по критерию «заморозки» показаний»: показания датчика сохранялись неизменными в течение времени большего, чем предельно допустимое
1	«Отказ по итогам встроенного самоконтроля»: обнаружен отказ датчика по итогам встроенного самоконтроля после подачи питания или перезапуска модуля
0	«Повреждены или недоступны данные заводской калибровки»: данные заводской калибровки не удалось считать или их контрольная сумма неверна

6 Функции цифровых линий ввода-вывода

В данной версии ПО каждая из линий ввода-вывода имеет фиксированную функцию и настроена на работу в режиме вывода.

6.1 DIO1

Линия индицирует состояние обработки запроса, принятого по шине SPI. В таблице ниже показано соответствие состояний сигнала этапам обработки запроса.

Таблица 6.1 DIO1: состояние обработки запроса, принятого по шине SPI

Состояние линии	Описание
Низкий уровень (лог. «0»)	Данные готовы к выдаче
Передний фронт (переход от низкого уровня к высокому)	Вызван обработчик прерывания по завершению транзакции SPI, начата обработка принятых по SPI данных
Высокий уровень (лог. «1»)	Идет обработка данных, принятых по SPI
Задний фронт (переход от высокого уровня к низкому)	Запрос обработан, данные помещены в аппаратный выходной регистр контроллера SPI

После подачи питания на модуль, до приема первого запроса по SPI, сигнал имеет высокий уровень, ввиду этого в начале обработки первого запроса передний фронт сигнала DIO1 не выдается. Все дальнейшие изменения сигнала соответствуют описанию в таблице.

В силу программно-аппаратных ограничений вызов обработчика прерывания и выдача переднего фронта сигнала DIO1 происходит с некоторой задержкой по отношению к моменту фактического завершения транзакции SPI.

6.2 DIO2

Линия индицирует готовность программного буфера регистров SPI к чтению. В таблице ниже показано соответствие состояний сигнала этапам обновления программного буфера. Обновление буфера выполняется в каждом такте расчетов модуля.

Таблица 6.2 DIO2: состояние программного буфера регистров SPI

Состояние линии	Описание
Низкий уровень (лог. «0»)	Данные регистров SPI находятся в согласованном для чтения состоянии
Передний фронт (переход от низкого уровня к высокому)	Начато обновление данных в программном буфере регистров SPI. Попытки чтения данных через SPI в это время могут возвращать несогласованные наборы данных.
Высокий уровень (лог. «1»)	Идет обновление данных в программном буфере регистров SPI. Попытки чтения данных через SPI в это время могут возвращать несогласованные наборы данных.
Задний фронт (переход от высокого уровня к низкому)	Завершено обновление программного буфера регистров SPI, данные находятся в согласованном для чтения состоянии

После подачи питания на модуль, до выполнения первого такта обработки данных инерциальных датчиков, который начинается по завершении калибровки калькулятора загрузки процессора (см. раздел 4.2 «Логика запуска и работы модуля»), сигнал имеет высокий уровень. Ввиду этого в начале первого обновления данных в программном буфере регистров SPI передний фронт сигнала DIO2 не выдается. Все дальнейшие изменения сигнала соответствуют описанию в таблице.

6.3 DIO3

Линия индицирует активность процесса записи данных на SD-карту.

Таблица 6.3 DIO3: активность процесса записи данных на SD-карту

Состояние линии	Описание
Низкий уровень (лог. «0»)	-
Передний фронт (переход от низкого уровня к высокому)	На SD-карту записан очередной блок данных размером 0x4000 байт (16 кБ)
Высокий уровень (лог. «1»)	-
Задний фронт (переход от высокого уровня к низкому)	На SD-карту записан очередной блок данных размером 0x4000 байт (16 кБ)

После подачи питания на модуль, до записи первого блока данных на SD-карту, сигнал имеет высокий уровень.

Уровень сигнала меняется циклически в соответствии с ходом записи данных на SD-карту. Длительное сохранение уровня сигнала в верхнем или нижнем положении может означать возникновение проблемы с записью данных.

Скорость записи данных зависит от частоты решения модулем навигационной задачи, и для значения по умолчанию (200 Гц) составляет порядка 430 кБ/сек, что соответствует 27 полупериодам изменения сигнала DIO3 за секунду.

7 Телеметрия на внешней SD-карте

7.1 Общие сведения

Навигационный модуль способен записывать телеметрические данные на внешнюю карту флэш-памяти формата SD. Поддерживается работа только с файловой системой FAT32.

Для оптимизации скорости записи и нагрузки на процессор рекомендуется при форматировании SD-карты задавать размер кластера равным 4096 или 8192 байта.

7.2 Порядок формирования файлов

Как будет описано дальше, в файле .tt время переменных хранится в формате 32-битного числа с плавающей точкой по стандарту IEEE-754 (тип *float* в терминологии C/C++). Число двоичных разрядов мантииссы в этом формате составляет 24, что означает, что при достижении системным временем значения большего или равного 8192 с. (т.е. когда целая часть времени занимает 14 разрядов мантииссы и более) на представление дробной части секунд остается 10 и менее разрядов, то есть точность представления времени окажется не более 2^{-10} с. или ~ 1 мс. При частотах расчетов в модуле 1 кГц и более такая точность является недопустимо малой для обеспечения корректного взаимного положения точек данных во времени. Необходимая точность составляет не менее чем 2^{-11}

(т.е. $\sim 0,5$ мс), что оставляет на представление целой части секунд 13 разрядов мантиссы и, следовательно, ограничивает верхний предел целой части времени значением 8191 с.

В силу этого, а также для того, чтобы обеспечить в дальнейших версиях ПО модуля возможность циклической записи файлов телеметрии, файлы телеметрии обрезаются по границе каждых 8000 с. системного времени. При этом время переменных в каждом из файлов начинается с 0, но одновременно с этим:

- в телеметрии присутствует переменная `time`, представляющая собой высокоточное системное время в формате `double` (64-битное число с плавающей точкой в формате IEEE-754), постоянно увеличивающееся сквозь все файлы телеметрии в данном включении, и дающее возможность привязать данные в файле ко времени с момента включения модуля;
- имя файла теперь содержит, как свою часть, величину системного времени, в которое начинаются данные в этом файле, для удобства выбора нужного файла из набора файлов, имеющих на SD-карте, и понимания того, с какого системного времени начинаются данные в каждом из файлов.

Имя файла формируется по следующему шаблону: `dataXXXXXX[-NNNNN].tt`, где `XXXXXX` - системное время начала файла, секунд, предваряемое нулями для 6-символьного представления, `NNNNN` - необязательная цифровая часть, добавляемая, если файл с именем `dataXXXXXX.tt` уже существует на SD-карте.

Таким образом, если при включении модуля на SD-карте еще не было файлов, на ней будет сначала создан файл с именем `data000000.tt`. В этом файле будут храниться данные, собранные за интервал времени [0..8000) с. с начала работы. Затем, через 8000 секунд с начала работы, запись в этот файл прекратится и будет создан следующий файл, `data008000.tt`, в котором будут храниться данные, собранные за интервал времени [8000..16000) с. с начала работы. Однако при дальнейшем анализе этого файла времена точек данных в нем будут лежать в диапазоне [0..8000), и определить, что эти данные относятся к диапазону системного времени [8000..16000) с. можно будет только по имени файла и по величине переменной `time` в нем, которая хранит высокоточное системное время. Еще через 8000 секунд запись продолжится в третий файл, `data016000.tt`, с данными из диапазона системного времени [16000..24000) с., и так далее. Это, как уже сказано, делается из необходимости поддерживать точность представления времени во всём файле не хуже 2^{-11} с.

Если затем модуль будет перезапущен без выемки SD-карты из разъема и очистки ее от имеющихся файлов, то первым файлом, созданным при включении, станет файл с именем `data000000-2.tt`, поскольку файл `data000000.tt` уже существует на SD-карте. Таким образом, фактически необязательная часть `-NNNNN` имени файла показывает, к какому включению модуля в серии включений без изъятия SD-карты относится данный файл. Затем будут созданы файлы `data008000-2.tt` и `data016000-2.tt`. Однако если запись продолжится дальше, чем за 24000 с., то в рассматриваемой ситуации следующим будет создан файл с именем `data024000.tt`, без постфикса `-2`, так как файл с именем `data024000.tt` отсутствует на SD-карте на момент создания очередного файла в серии.

При еще одном включении в тех же условиях первым будет создан файл `data000000-3.tt`, и так далее.

7.3 Структура файла .tt

Файл состоит из заголовка, описывающего телеметрические переменные, существующие в файле, и собственно данных этих переменных:

Заголовок	Данные
-----------	--------

7.3.1 Структура заголовка

FID	HDR_LEN	N штук VAR_DESCR
-----	---------	------------------

Здесь:

- FID — идентификатор tt-файла: последовательность из 4 байт с кодами 0x54, 0x4D, 0x32, 0x5F, она же текстовая строка «`TM2_`»;
- HDR_LEN — 32-битное целое число без знака, равное $N * 53 + 4$, то есть общей длине всех описаний переменных плюс длина самого поля HDR_LEN;
- N — количество описаний переменных, длиной 53 байта каждое. Определить количество описаний в заголовке в ходе анализа файла можно по формуле $N = (HDR_LEN - 4) / 53$;
- VAR_DESCR — структура размером 53 байта, хранящая описание одной из телеметрических переменных.

Формат структуры-описания переменной, VAR_DESCR:

Имя поля	ID	View	Type	Lsb	Size	DIM0	DIM1	DIM2	DIM3	DIM4	Name
Размер поля, байт	2	1	1	8	1	2	2	2	2	2	30

Здесь:

- ID — уникальный идентификатор переменной, 16-битное целое число без знака, не равное 0x0000h и 0xFFFF;
- View — код рекомендованного вида отображения данного параметра: 0 — двоичное, 1 — десятичное, 2 — шестнадцатеричное;
- Type — тип переменной, или тип элемента для переменной-массива: 0 — целое число без знака, 1 — целое число со знаком, в дополнительном коде, 2 — число в формате с плавающей точкой (IEEE-754);

- Lsb — цена младшего разряда для целочисленных переменных, 64-битное число с плавающей точкой (*double* в терминологии C/C++);
- Size — размер переменной, или размер элемента для переменной-массива, байт. Возможные значения: 8, 16, 32, 64;
- DIM0...DIM4 — размерности переменной-массива по соответствующим измерениям, от самого глубоко вложенного до самого внешнего; в текущей версии телеметрии все эти числа всегда равны 1, то есть все ТМ переменные являются скалярами — нет ни векторов, ни матриц, ни объектов более высоких порядков;
- Name — имя параметра, строка предельным размером 30 байт: байт №0 её содержит длину строки в байтах, в остальных максимум 29 байтах — символы имени.

7.3.2 Порядок хранения данных

Значения переменных в файле хранятся в однотипных структурах: пакетах. В одном пакете сохраняются данные одной переменной. Структура пакета:

Имя поля	Size	ID	Time	данные
Размер поля, байт	2	2	4	N

Здесь:

- Size — размер пакета, байт. 16-битное целое число без знака. Не может быть меньше 9, т.к. пакет не может содержать менее 1 байта данных. Размер данных: $N_{\text{МЕСТНОЕ}} = \text{Size} - 8$ байт;
- ID — уникальный идентификатор переменной/массива, соответствующий одному из ID, описанных в заголовке файла. Позволяет устанавливать соответствия между данным пакетом и описателем переменной в заголовке файла;
- Time — время в секундах (метка времени данного пакета). 32-битное число с плавающей точкой IEEE (*float* в терминологии C/C++);
- Данные — N байт данных переменной с идентификатором ID. Величина N может быть проверена также по формуле $N_{\text{ОЖИДАЕМОЕ}} = \text{Size} * \text{DIM0} * \text{DIM1} * \text{DIM2} * \text{DIM3} * \text{DIM4}$, где параметры Size, DIM0..DIM4 взяты из описания соответствующей переменной в заголовке файла, и это число должно быть равно числу $N_{\text{МЕСТНОЕ}}$.

ВНИМАНИЕ: последовательность хранения пакетов в файле от более ранних к более поздним не гарантируется, ввиду специфики работы механизмов подготовки и сбора данных на запись!