

Инерциальная система на основе сигнального процессора АО «ПКК Миландр» и микроэлектромеханических датчиков

П. Непрокин¹

УДК 621.38 | ВАК 05.27.01

Инерциальные приборы на основе гироскопов и акселерометров широко используются с начала 20 века. Появление первых серийных приборов связано с развитием судостроения на основе металлических конструкций, а повсеместное распространение авиации способствовало дальнейшему совершенствованию и широкому применению инерциальной навигации. В России это направление развивалось в основном благодаря запросам военной промышленности, а затем и космической. Последние несколько десятилетий благодаря миниатюризации инерциальных систем их применение расширилось, они стали основой развития любительской и коммерческой беспилотной авиации. MEMS-датчики применяются в автомобилестроении, мобильной связи, промышленности, медицине, робототехнике и т. д. Компания АО «ПКК Миландр» ведет работы в области создания миниатюрных инерциальных датчиков.

В АО «ПКК Миландр» разработан миниатюрный инерциальный навигационный модуль, предназначенный для применения в различных областях: беспилотных летательных аппаратах, автомобилях, космической технике, вооружении, телевидении, кинематографии и др. В том числе он используется в собственной разработке системы активной помощи водителю с функциями адаптивного круиз-контроля и автоматического экстренного торможения (система ADAS).

Миниатюрный инерциальный навигационный модуль, разработанный в АО «ПКК Миландр», имеет в своем составе:

- 12 микроэлектромеханических датчиков угловых скоростей; в каждой из осей X, Y и Z по четыре датчика;
- 6 микроэлектромеханических двухстепенных акселерометров; по два датчика для каждой из осей X, Y и Z;
- миниатюрный бародатчик;
- миниатюрный трехосевой магнетометр.

Модуль является многофункциональным навигационным устройством.

В общем случае задачами навигации являются:

- определение координат материальной точки, соответствующей центру масс объекта, на котором устанавливается измерительная система;
- определение угловой ориентации приборного трехгранника, связанного со строительными осями

объекта, на котором устанавливается измерительная система, относительно инерциального пространства.

Новый модуль создавался как прямая замена модуля ADIS16480 (Analog Devices) в части схемы подключения, питания, цифрового взаимодействия и габаритно-присоединительных размеров. То же касается и состава информации, выдаваемой модулем компании «Миландр».

Информация, выдаваемая модулем в обычном режиме:

- угловая скорость по каждой из трех осей [градус в секунду, гр/с];
- кажущееся ускорение по каждой из трех осей [м/с²];
- приращение угла за такт счета по каждой из трех осей [градус];
- средняя кажущаяся скорость за такт счета по каждой из трех осей [м/с];
- магнитная индукция по каждой из трех осей [Гаусс, Гс];
- атмосферное давление [Бар];
- рассчитанные на основании этих данных углы истинного курса, тангажа и крена [градус];
- соответствующий этим углам кватернион.

Иначе говоря, инерциальный навигационный модуль выдает так называемые «сырые» данные датчиков, а также на основании этих данных считает углы относительно горизонта (тангаж и крен) и относительно северного направления меридиана (истинный курс).

Обычный режим работы навигационного модуля в классической терминологии можно назвать – *гиروинерциальная курсовертикаль*.

¹ АО «Миландр», отдел разработки универсальных электронных модулей, ведущий инженер, neprokin.p@milandr.ru.

В режиме *бесплатформенной инерциальной навигационной системы* (БИНС) дополнительно к информации, выдаваемой в режиме курсоверткали, выдается следующая информация:

- текущие географические координаты объекта (широта, долгота и высота над референц-эллипсоидом) в заданной системе координат – СК-42, ПЗ-90.11 или WGS-84;
- вектор скорости объекта относительно Земли в проекциях на северную, восточную и вертикальную оси.

В модуле компании Analog Devices режим БИНС отсутствует.

Исходная полоса сигнала датчиков угловой скорости (ДУС) – 160 Гц, а акселерометров – 220 Гц. При некоторых применениях возможно паразитное воздействие вибрации в полосе этих частот, в этом случае разработанный модуль позволяет пользователю максимально избавиться от воздействия вибрации с помощью дополнительной обработки «сырой» информации. Вся информация от ДУС и акселерометров может выдаваться обработанной с помощью цифрового фильтра нижних частот с настраиваемой частотой среза от 50 до 20 Гц.

Для того чтобы модуль работал в режиме БИНС, необходимо при включении выдать в него начальные координаты относительно Земли: широта, долгота и высота над референц-эллипсоидом. Этот момент является началом интегрирования показаний акселерометров и счисления координат. Знание текущих координат позволяет включить в алгоритм курсоверткали учет вращения Земли. Таким образом, в отличие от ADIS16480, наш инерциальный навигационный модуль (ИНМ) может работать не только в режиме курсоверткали, но и как полноценная инерциальная навигационная система. Курсоверткаль обеспечивает счисление ориентации, точность которой непосредственно влияет на точность счисления координат, часто характеристикой точности инерциальных систем для самолетов является погрешность в виде ухода координат «миль в час».

Следует также отметить еще одну особенность ИНМ – для каждой оси ДУС и акселерометра используется сразу несколько датчиков, конструктивно установленных особым образом, что позволяет значительно уменьшить следующие виды ошибок:

- начальное смещение нуля акселерометра;
- начальное смещение нуля ДУС;
- нелинейность масштабного коэффициента акселерометра;
- нелинейность масштабного коэффициента ДУС;
- дрейф угловой скорости ДУС;
- дрейф ускорения акселерометров;
- немоделируемые температурные погрешности;



Рис. 1. Инерциальный навигационный модуль

- вибрационные погрешности ДУС (когда возникает ошибка в канале измерения угловой скорости при воздействии линейного ускорения).

С учетом того, что разработанная система является по сути своей дискретной, то ей может быть присущ ряд погрешностей, связанных с этим. Назовем некоторые из них, описанные в современной научной отечественной литературе и периодике:

- погрешности, связанные с запаздыванием между измерительными трактами каждого ДУС и по отношению к акселерометрам;
- ошибки, связанные с разнесением центра осей чувствительности акселерометров при маневрировании объекта типа «качка» или «разворот»;
- «вычислительный дрейф», возникающий при конических движениях инерциального блока с частотами, сопоставимыми по порядку величины с тактовой частотой счета навигационного алгоритма.

Часть из таких погрешностей, возникающих при работе инерциальных систем на подвижных объектах (автомобиль с двигателем внутреннего сгорания, самолет с реактивным двигателем или винтомоторный самолет, беспилотный коптер), можно устранить или значительно снизить путем максимального повышения частоты счисления навигационного алгоритма.

Для реализации такого подхода цифровой вычислитель ИНМ разработан на основе 32-разрядного высокопроизводительного процессора цифровой обработки сигналов K1967BN044 (тактовая частота до 200 МГц). При этом максимальная частота расчета угла составляет до 1000 Гц. Такое быстродействие должно покрыть все предположительные эволюции или воздействия вибраций.

При разработке модуля было проведено моделирование его работы в условиях разного рода вибраций, моделирующих работу некоторых видов транспорта.

При этом характерными являются следующие модели вибрационного воздействия:

- двигатель внутреннего сгорания в обычном автомобиле, частота работы которого от 1000 до 5000 об/мин, то есть частота вибрации ~15...85 Гц;
- вращение подъемного винта БПЛА диаметром до 1,5 м с частотой не более 4500 об/мин, то есть частота вибрации ~0...75 Гц;
- вращение винта самолета с частотой не более 2500 об/мин, то есть частота вибрации не более 45 Гц;
- вращение лопаток турбины реактивного двигателя с частотой 30000...100000 об/мин, то есть частота вибрации ~500...1500 Гц.

Для различных моделей транспорта были выбраны типовые параметры воздействия в математической модели, которые приведены в табл. 1.

Движение объекта моделировалось траекторией типа «коробочка» (замкнутый квадрат) с тремя разворотами на 90° по курсу на траектории, со скоростями 25 и 200 м/с. Длительность движения на каждом из четырех прямолинейных участков траектории составляла 10 мин.

При этом моделирование решения алгоритма навигационной задачи для сравнения проводилось с частотами 50, 200, 500, 1000, 2000 и 5000 Гц. Помимо этого, при моделировании менялись параметры ошибок ДУС и акселерометров, такие как «неноль» и амплитуда шума, а также разрядность АЦП, пределы измерения и др. Результаты прогнозов сравнивались с идеальной моделью движения в конце траектории как разница по координатам в трех проекциях – широта, долгота и высота над референц-эллипсоидом. При увеличении частоты счисления навигационного алгоритма от 50 до 1000...2000 Гц ошибка счисления координат значительно сокращалась, дальнейшее увеличение до 5000 Гц эффекта не выявляло. Другими словами, моделирование показало эффективность повышения частоты счисления навигационного алгоритма как такового. Также наиболее значительное влияние в обеспечении точности показали такие параметры, как разрядность АЦП и полосу полезного сигнала. С учетом реального размаха шума

Таблица 1. Типовые параметры воздействия в математической модели для различных моделей транспорта

Тип модели транспорта	Частота, Гц	Амплитуда, гр/с
Автомобиль с ДВС	10	5
Коптерный БПЛА	50	4
Самолет с винтомоторной парой	500	3
Работа реактивного двигателя	1 000	2

сигналов ДУС и акселерометров, а также диапазонов изменения сигналов, достаточной является разрядность АЦП в пределах 16...20 бит.

Всем известны присущие MEMS-датчикам достаточно большие ошибки в части уходов угла и температурной зависимости, поэтому для повышения точностных характеристик модулей, созданных на их основе, приходится прибегать к дополнительным мерам (кроме калибровки масштабных коэффициентов, компенсации углов неортогональности между осями и относительно узлов крепления модуля и т. д.), таким как комплексирование информации от датчиков, построенных на других физических принципах. В ИНМ применен ряд алгоритмов комплексирования навигационной информации: кроме инклинометрической фильтрации (на основе данных акселерометров коррекция углов горизонта тангажа и крена) используются гиромагнитная и бароинерциальная фильтрация.

Комплексирование (на основе алгоритмов субоптимальной фильтрации) с датчиком магнитного поля Земли позволяет при начальной выставке курсовых вертикали определять истинный курс (при учете магнитного склонения). При дальнейшем счислении углов комплексирование с магнитометром позволяет списывать накапливающуюся ошибку ДУС, зависящую от температуры и ошибки оценки дрейфов, так как ошибка магнетометра не накапливается со временем, а остается в определенных пределах. Данные знания и использование их при комплексировании позволяют сохранять ошибку счисления истинного курса в определенных пределах практически до бесконечности. Значения данной ошибки зависят от условий применения в части вибрации и возмущенности окружающего магнитного поля (наличие/отсутствие рядом больших протекающих электрических токов и крупных железосодержащих конструкций).

Комплексирование (также на основе алгоритмов субоптимальной фильтрации) с бародатчиком позволяет с неплохой точностью поддерживать знание о высоте объекта над референц-эллипсоидом Земли, что очень важно для любого летательного аппарата. Как известно, вертикальный канал любой инерциальной системы достаточно сильно «уходит» без информационной поддержки от другого датчика. Стоит отметить некоторые недостатки бародатчика:

- он дает погрешность от 1 до 4 м для объектов типа коптер или вертолет при взлете и посадке из-за воздушного разрежения от вращения винта;
- бародатчик не может учитывать подстилающий рельеф Земли;
- бародатчик дает погрешность при погодных изменениях атмосферного давления.

Однако, с учетом отличных массо-габаритных показателей, бародатчик является весьма эффективным средством для поддержания знаний о высоте над референц-эллипсоидом Земли и вертикальной скорости. При этом ошибка бародатчика не накапливается (некое сходство



Компания «МИЛАНДР» предлагает зарядное устройство постоянного тока стандарта CHAdeMO

Быстрое мобильное зарядное устройство для электромобиля MCS-1T22-A



Высокая мощность зарядки

Мощность зарядки до 22,5 кВт. Несмотря на такую мощность, не требует модернизации сетевой инфраструктуры.



Простота использования

Просто подключить к электромобилю. Благодаря наличию дисплея легко выбрать нужный режим.



Применяемость

Подходит для самых популярных электромобилей в России: Nissan Leaf, Mitsubishi i-MiEV и др.



Высокая скорость зарядки

Зарядное устройство позволяет зарядить аккумулятор электромобиля средней емкости до уровня 80% менее чем за час.



Мобильность

Благодаря массе 30 кг зарядное устройство может переноситься одним человеком. Быстрая зарядка доступна в любом месте, в любое время.



Прочность

Спроектировано, чтобы выдержать ежедневное использование.



Питание осуществляется от трёхфазной сети переменного тока. Управление работой устройства выполняет 32-разрядный микроконтроллер производства АО «ПКК Миландр»

Среднее время полной зарядки автомобильного аккумулятора 22 кВт*ч



ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА

+7 (495) 221-13-55
forum.milandr.ru
support@milandr.ru

SUPPORT.MILANDR.RU



milandr.ru /



milandrgroup /



milandr_official /



АО ПКК Миландр /

+7 (495) 981-54-33 / rea@milandr.ru / WWW.MILANDR.RU



с магнетометром) с течением времени, в отличие от интеграла от акселерометра.

Использование алгоритма акселерометрического инклинометра для корректировки данных углов тангажа и крена на участках относительно невозмущенного движения также (наряду с гиромагнитной коррекцией) позволяет списывать накапливающуюся ошибку ДУС, зависящую от температуры и ошибки оценки дрейфов, так как здесь используется в качестве «костыля» коррекции сила тяжести, которая с течением времени остается относительной константой для текущей координаты. Данные знания и использование их при комплексировании позволяют сохранять ошибку счисления углов горизонта в определенных пределах практически до бесконечности. Значения данной ошибки зависят от условий применения в части вибрации. Плюс, конечно, стоит отметить, что в отдельных реальных применениях существуют вибрационные условия, где этот метод не будет работать.

Кроме математического моделирования были проведены лабораторные и полевые сравнительные испытания (с блоком ADIS16480) разработанного ИНМ: на поворотном столе, на автомобиле и квадрокоптерах. В нашем ИНМ-модуле все навигационные параметры записывались на устанавливаемую перед включением microSD-карту, модуль работал в режиме курсовертикали без информационной поддержки координатами. При испытаниях

на поворотном столе и автомобиле одновременно с ИНМ включался ADIS16480, после испытаний результаты сравнивались. На поворотном ручном столе в характерных точках просто сравнивались углы с эталоном, как ИНМ, так и ADIS16480. Углы совпадали (и у ADIS16480, и у ИНМ) с эталоном с точностью задачи угла стола (КПА-5), равной ± 6 угловых минут. При испытаниях на автомобиле включения проходили так же, как и при математическом моделировании – по траектории «коробочка», то есть в начале и в конце угловое положение совпадало (с визуальной точностью). Анализ телеметрических записей показал также совпадение с эталоном по углам курса, тангажа и крена и у ИНМ, и у ADIS16480 с той же точностью.

При испытаниях на квадрокоптере включения производились также одновременно с модулем фирмы Analog Devices, при этом ADIS16480 был в составе системы навигации, в которой по его данным строился другой БИНС. При этом оценивалась работа не только курсовертикали, но и работа бароинерциального фильтра, а также сравнивались текущие географические координаты и скорости с данными приемника спутникового навигационного сигнала ГЛОНАСС (эти координаты являлись эталоном). Причем, следует отметить здесь работу бародатчика – 14-дюймовые подъемные винты квадрокоптера оказывали минимальное воздействие на наш модуль, и его информацию о высоте и вертикальной скорости вполне можно было использовать для автоматической посадки в системах управления. Траектория полета была также типа «коробочка», с временем полета до 10 мин, точка взлета и посадки совпадали с точностью до 2...3 м.

Во всех полетах БИНС «ПКК Миландр» давал более точные координаты на текущий момент времени относительно эталона, чем БИНС, построенный по данным ADIS16480. В среднем ошибка БИНС «ПКК Миландр» не превышала 1500...2000 м по любой из трех координат за время 4 мин, тогда как у БИНС на основе данных ADIS16480 это время составляло примерно 3 мин. Возможно улучшение этих показателей нашего модуля, если применять при калибровке модернизированные методы, использующие более точное оборудование.

В планах дальнейших испытаний – трюковой квадрокоптер (имеет возможность создавать угловые воздействия до 600 гр/с) и самолет Як-12.

Таким образом, сегодня АО «ПКК «Миландр» предлагает на замену организациям, применяющим в своих разработках приборы ADIS16480 (фирмы Analog Devices), новый разработанный модуль, принимая во внимание, что ADIS16480 запрещен к продаже на территории РФ, так как находится под санкциями, наложенными правительством США.

В заключение следует сказать, что в нашей разработке применены оригинальные алгоритмы навигации, которые были апробированы на нескольких летающих платформах. ●

ООО «Руднев-Шиляев»

- разработка измерительных систем по техническому заданию Заказчика.
- помощь в составлении технического задания Заказчика.
- производство измерительных систем.
- разработка и производство приборов.
- разработка программно-аппаратного обеспечения по ТЗ Заказчика.
- сертификация измерительных систем и приборов.

Инструментальные решения задач заказчика!

125130, г. Москва, ул. Клары Цеткин, д. 33 корп. 35
www.rudshel.ru, e-mail: adc@rudshel.ru
тел./факс: (495) 787-6367, 787-6368

20–23 ОКТЯБРЯ 2020
МОСКВА, ВДНХ, ПАВИЛЬОН № 55, 57



SAY **FUTURE**
M O S C O W

WWW.SAY-FUTURE.RU

WWW.INTERPOLITEX.RU