

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУЧАСНОГО ПРЕЦИЗІЙНОГО ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 621.45.017

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ НА MEMS-ДАТЧИКАХ

Кузнецов А. В., Павловский А. М.

*Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”,
г. Киев, Украина
E-mail: a_pav@ukr.net*

Для повышения точности инерциальных измерительных модулей используемых для определения ориентации объектов применяют различные алгоритмы коррекции данных. Одним из наиболее распространенных алгоритмов повышения точности является использование фильтра Калмана. Однако данный подход имеет ряд недостатков, основными из которых есть относительная сложность реализации, необходимость мощного вычислительного ядра, а также высокая частота опроса чувствительных элементов. Такие недостатки особо критичны при использовании на современных беспилотных летательных аппаратах общего назначения.

В статье рассматривается возможность использования алгоритма Себастьяна Мажвика вместо фильтра Калмана. Для решения поставленной задачи и проведения экспериментов был создан макет инерциального измерительного модуля.

Результаты экспериментов подтвердили необходимость использования алгоритма Себастьяна Мажвика на беспилотных летательных аппаратах при использовании вычислительных ядер малой и средней производительности.

***Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, инерциальный измерительный модуль, комплементарный фильтр, фильтр Калмана, Себастьян Мажвик.*

Введение и постановка задачи

Инерциальный измерительный модуль (ИИМ) бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) выполняет задачу определения угловых скоростей и линейных ускорений подвижного объекта в связанной системе координат. В результате алгоритмической обработки сигналов, вырабатываемых ИИМ, формируются сигналы БИНС, в которых содержится информация о параметрах ориентации и навигационных параметрах подвижного объекта. Применительно к беспилотным летательным аппаратам (БЛА) такими параметрами являются углы курса, крена, тангажа, скорость и пройденный путь.

Точность выработки навигационных параметров зависит, в первую очередь, от точности датчиков угловой скорости (ДУС), акселерометров и, в случае их установки, датчиков магнитного курса (феррозонды, магнитометры), что является минимально необходимым набором чувствительных элементов для определения положения объекта в пространстве. Вследствие присущих им погрешностей, а также погрешностей вызванных цифровой обработкой получаемых сигналов (интегрирования т.д.) которые выполняются вычислительным ядром, происходит накапливание ошибок при определении параметров ориентации [1].

Поэтому для повышения точностных характеристик ИИМ зачастую прибегают к использованию вспомогательной избыточной информации от дополнительных инерциальных датчиков или спутниковых навигационных систем, а также к применению различных алгоритмов коррекции данных. Использование фильтра Калмана является одним из самых распространенных методов коррекции, однако существуют и другие современные алгоритмы, например, Себастьяна Мажвика [2]. Приведенные алгоритмы относятся к классу комплементарных фильтров. Однако их использование основано на итерационной обработке выборок результатов, получаемых от чувствительных элементов, что в некоторых случаях приводит к значительной нагрузке на вычислительное ядро БЛА. Таким образом, цель данной статьи заключается в возможности использования современных алгоритмов повышения точности на основе комплементарного фильтра, при этом оптимизировав нагрузку на вычислительное ядро БЛА.

Разработка инерциального измерительного модуля

Как было сказано ранее, одним из наиболее распространенных методов коррекции выходного сигнала является фильтр Калмана. Это последовательный рекурсивный алгоритм, использующий принятую модель динамической системы для получения оценки, которая может быть существенно скорректирована в результате анализа каждой новой выборки измерений во временной последовательности. Фильтр Калмана является эффективным алгоритмом, который позволяет восстановить недостающую информацию посредством имеющихся неточных (зашумленных) измерений [3]. Однако, в связи с его сложностью, обработка информации требует значительных вычислительных ресурсов. Подробное описание работы фильтра Калмана изложено в работах [4] и [5].

В качестве основного вычислительного ядра на современных БЛА выступает микроконтроллер (МК), за счет все больше возрастающего потока информации, необходимой для эффективного функционирования летательного аппарата (видеосъемка, передача информации, телеметрии, управления), нагрузка на МК увеличивается. Это приводит к необходимости замены ядра на более производительное или оптимизации обработки потоков информации. Первый вариант влечет значительное повышение стоимости аппарата, повышение энергопотребления, а иногда полное изменение конструкции. При выборе второго варианта нередко жертвуют качеством информации, в том числе и об ориентации объекта, что приводит к аварийным ситуациям.

Для получения достоверной информации об углах ориентации, а также снижения нагрузки на МК, в трудах [2, 6 - 7] предлагается использовать алгоритм Себастьяна Мажвика. Основным достоинством представленного алгоритма является простота его настройки, которая производится единственным параметром, отвечающим за весовую оценку информации от навигационных датчиков ИИМ БЛА. Таким образом, на каждой итерации вычисляется значение параметра настройки, которое сообщает о достоверности информации, получаемой от чувствительных элементов.

Для проведення испытаний и получения реальных характеристик работы алгоритма Себастьяна Мажвика был разработан ИИМ на базе MEMS-датчиков. Условно, данный процесс можно разделить на два этапа: разработка аппаратно-программной части и калибровка устройства.

Задача первого этапа заключалась в разработке архитектуры будущего ИИМ, на основании которой происходило создание принципиальной электрической схемы, трассировка печатной платы, напайка компонентов и написание программы для вычислительного ядра.

Процесс калибровки позволил определить такие параметры моделей выходных сигналов ЧЭ как масштабный коэффициент, коэффициент перекрестной связи, смещение нуля. Полученные параметры интегрируются в программный код для пересчета величин и компенсации первичных погрешностей датчиков. Разработанный макет ИИМ (общий вид - на рис. 1) представляет собой блок чувствительных элементов (ЧЭ) в состав которого входит трехосный акселерометр-гироскоп MPU-6050 компании InvenSense Inc., а также трехосный магниторезистивный датчик HMC5883L Honeywell для определения магнитного курса. Обработка выходных сигналов ЧЭ, фильтрация и другие интерфейсные функции реализованы на микроконтроллере (МК) семейства AVR ATMEGA328. Считывание данных осуществляется через радиомодуль Bluetooth или аппаратный UART-интерфейс МК, что расширяет его функциональные возможности.

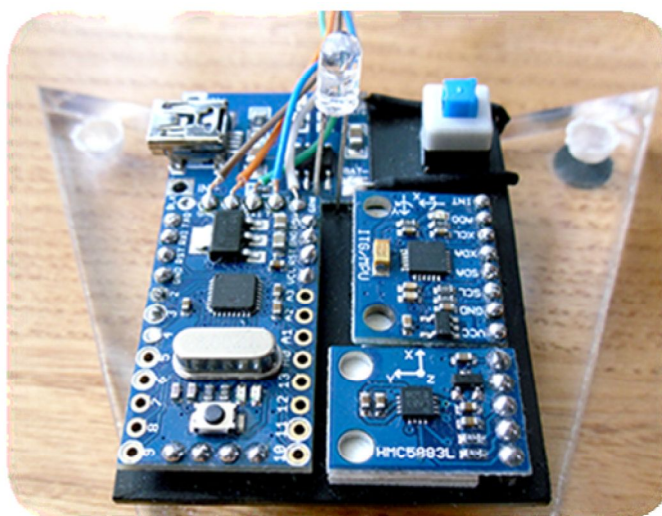


Рис. 1. Инерциальный измерительный модуль на MEMS-датчиках

Результаты исследований

Целью проводимых испытаний было сравнение погрешностей при определении углов ориентации для алгоритма Калмана и Себастьяна Мажвика, сравнение времени расчета алгоритмов коррекции типовыми современными МК, а также сравнение влияния алгоритмов на время опроса датчиков. Для достижения поставленной задачи математические модели фильтров Калмана и Себастьяна Мажвика представлены в работах [2, 4] были адаптированы и запрограммированы в МК ИИМ.

На рис. 3 - рис. 5 представлені результати испытаний ИММ для сравнения погрешностей углов курса крена и тангажа после 20 запусков при разных условиях.

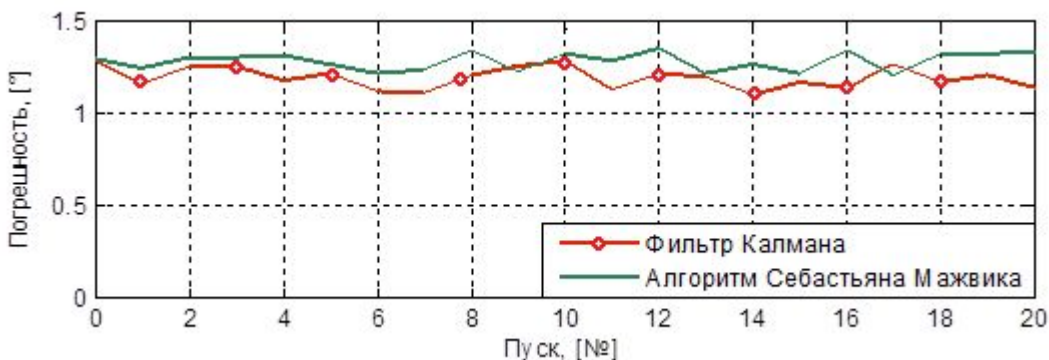


Рис. 3. Погрешность вычисления курса для разных алгоритмов

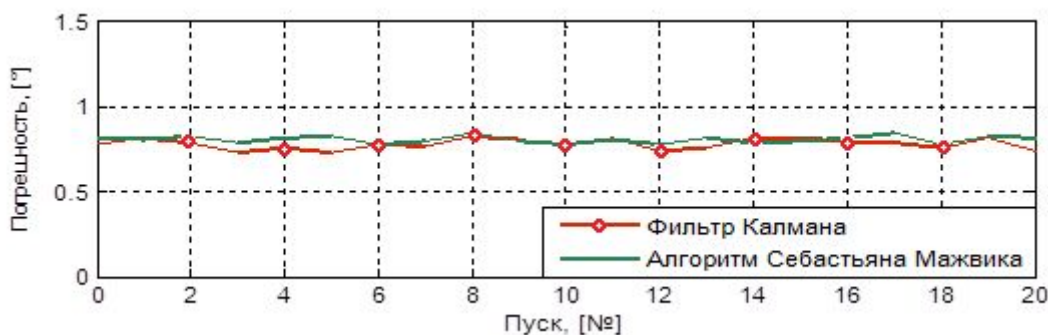


Рис. 4. Погрешность вычисления крена для разных алгоритмов

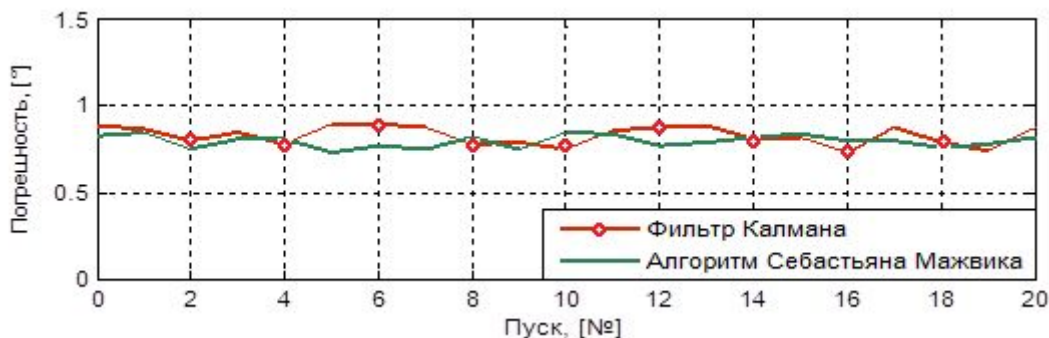


Рис. 5. Погрешность вычисления тангажа для разных алгоритмов

Наибольшая погрешность соответствует определению курса и соответствует значению 1.31° при использовании алгоритма Себастьяна Мажвика, для алгоритма Калмана максимальная погрешность составляет 1.24° . Таким образом, алгоритм Себастьяна Мажвика показал меньшую точность (погрешность вычисления угла больше на 5.3%). Для углов крена и тангажа отличия погрешностей составили 1.9% и 2.4% соответственно. Необходимо отметить, что результаты получены при частоте опроса датчиков в 100 Гц, что является важным критерием, а его влияние на точность вычислений приведены далее.

Такие характеристики МК, как архитектура, частота и разрядность, непосредственно влияют на быстродействие вычислений, а следовательно, и на частоту дискретизации. Воспользовавшись программным обеспечением Time Processing [8], было оценено приблизительное время выполнения каждого из рассматриваемых алгоритмов (для угла крена) для основных семейств МК. Полученные результаты приведены в табл.1.

Таблица 1. Время расчета угла крена для современных микроконтроллеров

Семейство	Ядро	Разрядность, бит	Быстродействие	Среднее время расчета, мс	
				Фильтр Калмана	Себастьяна Мажвика
AVR	ATmega328	8	20 MIPS 20 MHz	5.2037 – 5.7907	3.2018 – 3.3489
	32-BIT AVR	32	99 MIPS 66 MHz	2.2030 – 2.4980	1.7121 – 2.0145
ARM	STM32F103	32	120 MIPS 73 MHz	4.1007 – 4.6812	4.1007 – 4.6812
	ARM9	32	220 MIPS 200 MHz	1.6059 – 1.8981	0.9868 – 1.1245
	Cortex-A9	32	3500 MIPS 2,5 GHz	0.9900 – 1.1924	0.7899 – 0.9874
MSP430	MSP430 6 s	16	30 MIPS 25MHz	5.0112 – 5.1215	3.5812 – 4.1111

В соответствии с представленными в таблице данными был сделан вывод, что среднее время определения одного угла ориентации не превышает 6 мс для большинства современных МК. Алгоритм Себастьяна Мажвика в среднем рассчитывается на 44% быстрее по сравнению с алгоритмом Калмана. Необходимо заметить, что полученное время расчета удовлетворяет большинство современных БЛА общего назначения, однако с учетом общей нагрузки на вычислительные мощности МК это может привести к уменьшению частоты дискретизации (опроса датчиков), что, в свою очередь, негативно влияет на точность расчета параметров ориентации. Ниже приведены графики (рис. 6 – рис.7), отображающие погрешности измерения углов ориентации при влиянии различных частот дискретизации.

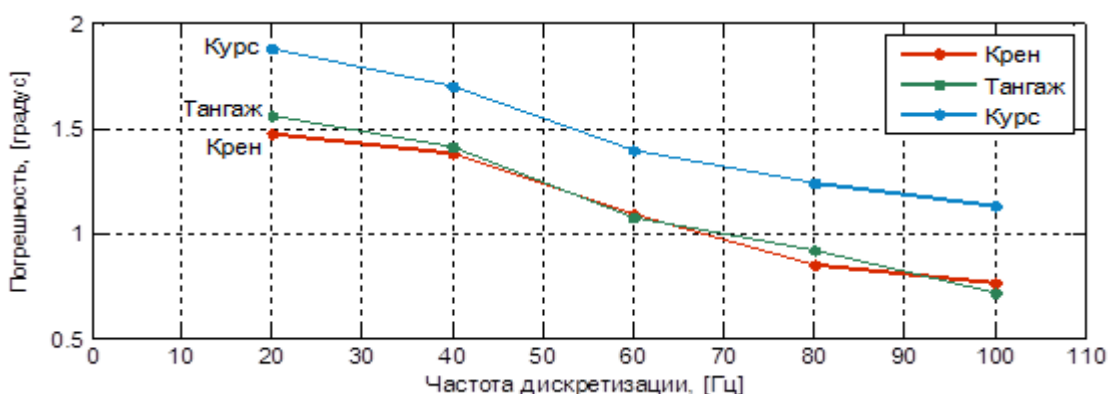


Рис. 6. Погрешность определения углов ориентации при разных частотах дискретизации (фильтр Калмана)

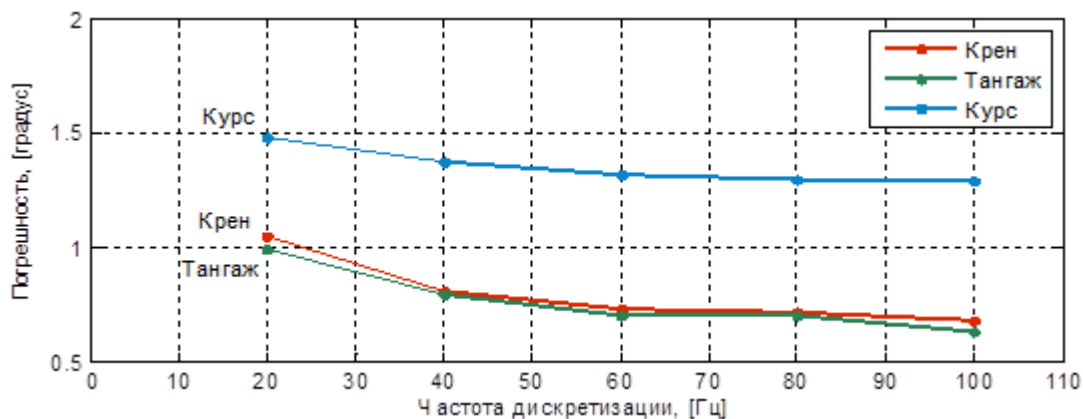


Рис. 7. Погрешність визначення кутів орієнтації при різних частотах дискретизації (алгоритм Себастьяна Мажвика)

В результаті було встановлено, що при частотах дискретизації менше 100 Гц (виключительно для даного МК і інтерфейса зв'язи) точність визначення кутів орієнтації з використанням фільтра Калмана значительно нижче, результатів, отриманих з допомогою алгоритму Себастьяна Мажвика. Погрешність вирахування фільтром Калмана в середньому на 36% більше порівняно з алгоритмом Себастьяна Мажвика. Крім того, при використанні алгоритму Себастьяна Мажвика погрешність при частотах від 40 Гц до 100 Гц практично не змінюється, що робить цей алгоритм необхідним при використанні на МК низької і середньої продуктивності, або в умовах підвищеної обробки інформації.

Висновки

Для підвищення точності визначення кутів орієнтації для ІІН БЛА було запропоновано замінити фільтр Калмана алгоритмом Себастьяна Мажвика. Для проведення експериментів був створений ІІМ на MEMS-датчиках, управляємий МК ATMEGA328.

При загрузці вичислювального ядра великим числом операцій, частота опроса датчиків може суттєво знизитися.

При зменшенні частоти дискретизації (в діапазоні від 20 Гц до 100 Гц) точність вирахування кутів орієнтації з використанням фільтра Калмана різко падає, середня погрешність вирахувань на 36% перевищує результати, отримані при використанні алгоритму Себастьяна Мажвика. Однак, алгоритм Себастьяна Мажвика при частоті дискретизації 100 Гц і вище, показав меншу точність (погрешність на 5.3% більше) порівняно з фільтром Калмана.

При використанні алгоритму Себастьяна Мажвика для розрахування кутів орієнтації потребується менше часу. Це пояснюється відсутністю рекурсивності в алгоритмах на базі комплементарного фільтра. Різниця в швидкості розрахування досягає 44% для низькопродуктивних вичислювальних ядер. Таким чином, проведені експерименти підтвердили необхідність

использования алгоритма Себастьяна Мажвика на ИИМ беспилотных летательных аппаратов при использовании вычислительных ядер малой и средней производительности. Такой подход расширит функциональные возможности инерциальных измерительных модулей, повысит точность расчета углов ориентации, а также понизит вероятность возникновения аварийных ситуаций в случае использования на беспилотных летательных аппаратах.

Литература

1. Алалуев Р. В. Измерительный модуль микросистемной бесплатформенной инерциальной навигационной системы / Р. В. Алалуев, Ю. В. Иванов, В. В. Матвеев, В. А. Орлов, В. Я. Распопов // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – № 9. – С. 61 – 64.
2. Madgwick S. O. H. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays / S. O. H. Madgwick [Электронный ресурс]. Режим доступа : http://www.x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf.
3. Иванов Д. С. Использование одноосного гироскопа для определения ориентации макета в лабораторных условиях / Д. С. Иванов, М. Ю. Овчинников ; Ин-т приклад. математики им. М. В. Келдыша РАН // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша ; № 11. – М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2008. – 32 с.
4. Сеницын И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева : учеб пособие / И. Н. Сеницын. – М. : Логос, 2006. – 640 с.: ил.
5. Higgins W. T. A Comparison of Complementary and Kalman Filtering / W. T. Higgins // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – Arizona, 1975. – Vol. AES-11, № 3. – P. 321–325.
6. Hyung Gi Min. Complementary Filter Design for Angle Estimation using MEMS Accelerometer and Gyroscope [Электронный ресурс]. Режим доступа : https://www.academia.edu/6261055/Complementary_Filter_Design_for_Angle_Estimation_using_MEMS_Accelerometer_and_Gyroscope.
7. Новацький А. О. Комплементарний фільтр для квадрокоптера з компенсацією температурного дрейфу нуля датчика кутової швидкості / А. О. Новацький, П. Є. Коломійцев, П. О. Сапсай // Молодий вчений. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – № 5. – С. 15 – 18.
8. Check application processing times [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.cic.gc.ca/english/information/times/index.asp> - 11.03.2013.

*Надійшла до редакції
27 вересня 2015 року*

© Кузнецов О. В., Павловський О. М., 2015