

УДК 519.688:681.586.2

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ КОМПАКТНОГО ВЫСОКОТОЧНОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ НА БАЗЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Хмарский П. А., Наумов А. О.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлены особенности разработки компактного высокоточного инерциального измерительного модуля на базе микроэлектромеханических систем. Показано, что МЭМС-технологии позволяют создавать миниатюрные, энергоэффективные и надежные навигационные модули, но с ограничениями по точности. Рассмотрены этапы проектирования: постановка требований, математическое моделирование, анализ параметров датчиков, выбор элементной базы.

Ключевые слова: инерциальный измерительный модуль, микроэлектромеханические системы, проектирование, точность измерений.

DESIGN OF A COMPACT HIGH-PRECISION MEMS-BASED INERTIAL MEASUREMENT UNIT

Khmarski P., Naumov A.

*Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The features of development of a compact high-precision inertial measurement unit based on microelectromechanical systems (MEMS) are presented. It is shown that MEMS-technologies allow to create miniaturised, energy-efficient and reliable navigation modules, but with accuracy limitations. The stages of design are considered: setting requirements, mathematical modelling, analysis of sensor parameters, element base.

Key words: inertial measurement unit; microelectromechanical systems; design; measurement accuracy.

*Адрес для переписки: Хмарский П.А., 16, ул. Академическая, 220072, Минск, Республика Беларусь
e-mail: pierre2009@mail.ru*

Введение. Инерциальные измерительные модули (Inertial measurement unit – IMU) являются ключевым компонентом современных навигационных систем, играя важную роль в робототехнике, беспилотных транспортных средствах, системах виртуальной и дополненной реальности, а также в медицине. В последние годы наблюдается значительный прогресс в области микроэлектромеханических систем (МЭМС), что открыло новые возможности для создания малогабаритных и высокоточных IMU-сенсоров [1, 2].

МЭМС-технологии позволяют интегрировать механические элементы, датчики, актуаторы и электронику на одном кремниевом чипе, используя микропроизводственные процессы. Это обеспечивает ряд преимуществ: миниатюризация (МЭМС-датчики могут быть значительно меньше традиционных механических аналогов); низкое энергопотребление (критично для портативных и автономных устройств); высокая надежность (отсутствие движущихся макрочастей); массовое производство (снижает стоимость).

Однако МЭМС-датчики также имеют свои ограничения, в частности, связанные с точностью и стабильностью измерений. Основные проблемы включают: дрейф нуля (bias instability); случайное блуждание (random walk); чувствительность датчиков к температуре и механическим воздействиям.

В данном докладе рассмотрены особенности разработки компактного высокоточного IMU на базе МЭМС-технологий, способного преодолеть эти ограничения и конкурировать с лучшими мировыми образцами по точности и надежности измерений.

Методология. Ключевым фактором при проектировании IMU-сенсора является постановка задачи, в которой должно быть указано:

1. Целевые характеристики: требуемый диапазон и точность измерения ускорений, угловых скоростей и ориентации; допустимые габариты и массу датчика; требования к энергопотреблению;
2. Условия эксплуатации: диапазон рабочих температур и влажности; воздействие вибраций, ударов и других механических нагрузок;
3. Технологические требования: использование МЭМС-технологий для обеспечения миниатюризации и серийности; применение современной элементной базы и конструктивных решений;
4. Требования к интерфейсам: тип и параметры цифрового/аналогового интерфейса для подключения к системам-потребителям; возможность интеграции в различные приложения;
5. Временные и стоимостные ограничения: сроки разработки и изготовления опытных образцов; целевая себестоимость производства датчика.

После постановки задачи в проектирование IMU-сенсора на основе МЭМС-технологий рекомендуется включать следующие этапы:

1. Разработку математической модели инерциальной системы на основе МЭМС-датчиков;
2. Исследование и оптимизацию алгоритмов калибровки датчиков, обработки и объединения данных для определения угловой ориентации (sensor fusion);
3. Анализ влияния различных параметров МЭМС-датчиков на точность измерений;

4. Обоснование выбора элементной базы;
5. Формирование общих требований к испытаниям МЭМС IMU-сенсоров.

Математическое моделирование. должно обеспечивать:

возможность имитации произвольного вращения IMU с возможностью настройки частоты дискретизации;

имитацию работы физических датчиков (акселерометр, гироскоп, магнитометр), входящих в состав IMU, на основе реальных характеристик из созданной базы данных.

После реализации математических моделей целесообразно разработать и провести исследование алгоритмов **sensor fusion**. Задача **sensor fusion** заключается в интегрировании и объединении данных от различных датчиков IMU-сенсора с целью получения более точной, достоверной и комплексной информации об измеряемых параметрах (в первую очередь углов ориентации). Рекомендуется рассматривать следующие широко используемые алгоритмы **sensor fusion** [2]: комплиментарный фильтр; AHRS-фильтр Калмана; AHRS-фильтр Мэдживика; AHRS-фильтр Махони. Выбор конкретного алгоритма **sensor fusion** для интеграции данных от различных датчиков в составе IMU-сенсора зависит от следующих ключевых факторов:

1. Количество и типы датчиков: число и характеристики акселерометров, гироскопов, магнитометров и др.; различная точность, частота обновления, шумовые свойства датчиков;

2. Требования к точности и динамике: необходимая точность определения ориентации, линейных/угловых скоростей; требования к быстродействию и реакции на динамические изменения;

3. Условия эксплуатации: наличие возмущающих факторов (магнитные поля, вибрации и т.п.); особенности среды применения (наземные, воздушные, подводные системы);

4. Вычислительные ограничения: доступная вычислительная мощность бортовых процессоров; требования к энергопотреблению и занимаемым ресурсам;

5. Требования к ошибкам и устойчивости: допустимые уровни ошибок оценки ориентации, положения, скоростей; устойчивость к сбоям отдельных датчиков.

Для каждого алгоритма **sensor fusion** целесообразно выполнить: анализ работы с параметрами по умолчанию; оптимизация параметров с использо-

ванием различных оптимизаторов; исследование эффективности при различных входных данных.

Исследование алгоритмов калибровки. При разработке алгоритмов калибровки датчиков, входящих в состав компактного высокоточного IMU-сенсора, следует обратить внимание на следующие ключевые аспекты: компенсация смещений и нелинейностей; температурная компенсация; устранение взаимных влияний; учет погрешностей ориентации; адаптивность и обучаемость; вычислительная эффективность.

Комплексный учет данных аспектов при разработке алгоритмов калибровки позволит обеспечить высокую точность и стабильность показаний компактного IMU-сенсора.

Анализ влияния параметров датчиков. Целесообразно детально исследовать влияние различных параметров датчиков на точность определения ориентации. Проводимый анализ должен включать: оценку влияния спектральной плотности шума; исследование влияния различных составляющих смещения (bias); анализ влияния перекоса осей и нестабильности смещения; оценку влияния разрешения и диапазона измерений

При выборе элементной базы особое внимание уделялось МЭМС-компонентам, обеспечивающим оптимальное сочетание точности, стабильности и энергоэффективности.

Заключение. Инерциальные измерительные модули на базе МЭМС-технологий являются важным компонентом современных навигационных систем в широком спектре применений. МЭМС-технологии обеспечивают преимущества по миниатюризации, энергоэффективности и надежности, но имеют ограничения по точности и стабильности МЭМС-датчиков. Проектирование высокоточного компактного IMU требует четкой постановки технических требований и комплексного подхода, включающего математическое моделирование, калибровку и анализ влияния параметров датчиков. Особое внимание должно быть уделено выбору оптимальных МЭМС-компонентов по точности, стабильности и энергоэффективности.

Литература

1. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2009. – 280 с.
2. Grewal, M. S. Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration / M. S. Grewal, A. P. Anrews, C. G. Bartone. – Wiley, 2020. – 568 p.