

Инерциальные модули компании Xsens: математические алгоритмы совместно с современными МЭМС-технологиями как надежное решение задач ориентации и навигации

Юрий ПОНОМАРЁВ,
к. т. н.
yu.ponomarev@tellur-el.ru
Антон КОМЯКОВ
a.komyakov@tellur-el.ru

Инерциальные датчики и системы на их базе являются ключевым элементом при решении задач управления, стабилизации, навигации и отслеживания движения воздушных, наземных, морских и подземных объектов. Бесплатформенная инерциальная навигационная система, или система ориентации, состоит из инерциального измерительного блока (IMU), предоставляющего первичные данные об угловой скорости и линейном ускорении, и блока обработки информации с датчиков, где происходит интегрирование, преобразование и обработка данных с последующей выдачей информации об углах ориентации, скорости или положении, которые требуются для построения системы управления подвижным объектом.

Решение указанных задач осложняется неидеальностью датчиков и системы в целом, что приводит к возникновению ошибок, имеющих различный характер, в том числе ошибок, вызванных внешними воздействиями — вибрациями из-за двигателей и исполнительных механизмов или из-за взаимодействия с окружающей средой, изменениями температуры, длительными ускорениями и магнитными возмущениями.

Последние достижения в области технологии микроэлектромеханических систем (MEMS) позволяют разработать недорогие (<\$1–100 за ось) и компактные (от $0,02–0,2\text{ см}^3$) акселерометры и гироско-

пы. Ошибки, присущие этим компонентам, существенно затрудняют построение навигационных систем с использованием IMU только на основе MEMS-датчиков для упомянутых применений. Для увеличения точности и надежности оценки отслеживания чрезвычайно важно, чтобы сигналы IMU на основе MEMS комбинировались с измерениями от вспомогательных датчиков, таких как магнитометр, барометрический высотометр и глобальная спутниковая навигационная система (GNSS), а также с моделями движения, специфичными для конкретных подвижных объектов. Компания Xsens, обладающая многолетним опытом разработки

алгоритмов, создала алгоритм слияния датчиков Xsens estimation engine (XEE), который позволяет использовать преимущества различных вспомогательных измерений датчиков и оптимально сочетать их для получения надежных оценок отслеживания.

Инерциальные модули Xsens имеют название MTi и удовлетворяют требованиям, существующим в различных областях применения. На рис. 1 изображена линейка модулей MTi, а в таблице 1 представлен перечень моделей в каждой из линеек с указанием функционала. Основой модуля является инерциальный измерительный блок IMU на основе MEMS-датчиков, объединенный с триадой магнитометров в легком (11 г для OEM-версии) миниатюрном (<math><15\text{ см}^3</math>) корпусе с энергопотреблением 480–650 мВт (для MTi 100-й серии). Конструкция модуля и датчиков в сочетании с алгоритмами обработки сигналов обеспечивает устойчивость к вибрациям в диапазоне как минимум до 400 Гц (для MTi 100-й серии), а также выдачу данных с высокой частотой (2 кГц) и низкой задержкой передачи данных (<math><2\text{ мс}</math>). Серия продуктов MTi разработана с учетом требований, диктуемых существующими применениями.

В рамках каждой серии MTi компания Xsens предлагает несколько вариантов продукции. Каждый вариант предоставляет раз-



Рис. 1. Линейка модулей MTi

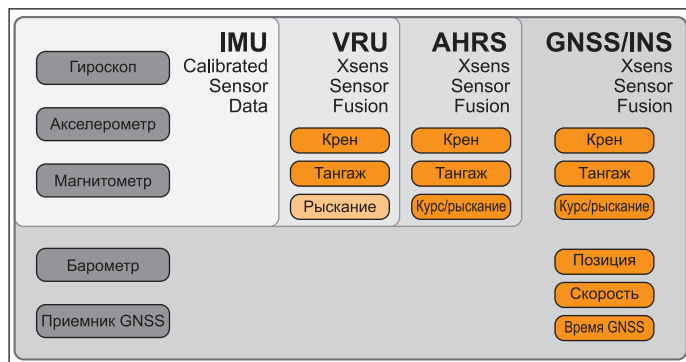


Рис. 2. Пояснение классификации модулей MTi

личные функциональные возможности. На рис. 2 и в таблице 1 пояснена классификация модулей MTi по функционалу.

Блок чувствительных элементов IMU представляет собой инерциальный измерительный блок, который выдает калиброванную информацию о линейных ускорениях, угловых скоростях поворота, данных о величине магнитного поля по трем осям и барометрического давления (для некоторых вариантов модулей). IMU не предоставляет функцию слияния данных от датчиков для получения оценок по углам ориентации, но имеет возможность вывода данных в виде приращений по углам Δq и приращений по скорости Δv.

Гирогоризонт (VRU) позволяет применять алгоритмы, которые используют направление вектора ускорения свободного падения в качестве источника дополнительной информации для расчета и коррекции углов крена и тангажа. По сути, он предоставляет те же данные, что и курсовертикаль (AHRS), за исключением угла рыскания. Оценка угла рыскания в гирогоризонте не имеет привязки к направлению на север, что означает, что угол вычисляется без какой-либо географической/магнитной привязки и коррекции, а лишь за счет интегрирования показаний с гироскопов с возможностью использования функции активной стабилизации по курсу для уменьшения его дрейфа. Для VRU доступен весь функционал IMU.

Курсовертикаль (AHRS) схожа по функционалу с гирогоризонтом и выдает углы крена, тангажа и рыскания с привязкой к направлению на север за счет использования магнитометров. Для AHRS доступен весь функционал VRU и IMU.

Инерциальная навигационная система комплексирована с информацией от спутниковой навигационной системы (GNSS/INS), в том числе с поддержкой кинематики в реальном времени (RTK) для получения сантиметровой точности определения координат. Такие варианты модулей имеют барометр и приемник сигналов GNSS и поправок с базовых станций для увеличения точности методом кинематики в реальном времени (RTK). Они выдают информацию об углах крена, тангажа и рыскания с привязкой к направлению на север, а также информацию о линейном положении объекта и его линейной скорости. Данные модули предоставляют доступ к функционалу IMU, VRU и AHRS.

Каждая из серий модулей MTi отличается друг от друга такими характеристиками, как точность выдаваемой информации об углах ориентации и координатах, габаритами, вариантом исполнения, набором доступных интерфейсов и другими эксплуатационными параметрами. В таблице 2 приведены данные по всем вариантам инерциальных модулей с основными точностными характеристиками, в таблице 3 представлены массовые и геометрические характеристики модулей MTi, в таблицах 4–6 сведены данные о характеристиках гироскопов, акселерометров, барометров, входящих в состав модулей, а также характеристики GNSS-приемников, в таблице 7 приведены эксплуатационные характеристики модулей.

Модули серии MTi 1-series — это самые маленькие (12,1×12,1 мм), легкие (<1 г) и наиболее экономичные варианты модулей Xsens в форм-факторе для поверхностного монтажа (SMD), совместимые

Таблица 1. Перечень моделей в каждой из линеек модулей MTi с указанием функционала

Модель	MTi 1-series	MTi 600-series	MTi 10-series	MTi 100-series
IMU	MTi-1 IMU	MTi-610 IMU	MTi-10 IMU	MTi-100 IMU
VRU	MTi-2 VRU	MTi-620 VRU	MTi-20 VRU	MTi-200 VRU
AHRS	MTi-3 AHRS	MTi-630 AHRS MTi-630R AHRS	MTi-30 AHRS	MTi-300 AHRS
GNSS/INS	MTi-7 GNSS/INS	MTi-670 GNSS/INS MTi-670G GNSS/INS	—	MTi-G-710 GNSS/INS
GNSS/INS (RTK)	—	MTi-680 RTK GNSS/INS MTi-680G RTK GNSS/INS	—	—

со стандартом JEDEC PLCC-28 и выпускаемые крупными партиями для серийного потребления в большом объеме.

Модули серии MTi 600-series с классом пылевлагозащиты IP51 спроектированы как экономичный и простой в интеграции OEM-компонент с малой массой и габаритами. Модуль можно устанавливать двумя способами: либо кверху ногами непосредственно к ответному разъему на печатной плате, либо установить отдельно, присоединив шлейфом к ответному разъему на печатной плате. Варианты модулей MTi-630R, MTi-670G и MTi-680G с классом пылевлагозащиты IP68 имеют прочный алюминиевый корпус, а модели MTi-670G и MTi-680G оснащены встроенным приемником GNSS. Еще одна особенность всей серии MTi 600-series — наличие интерфейса CAN.

Модули серии MTi 10-series представляют собой вариант инерциального модуля по доступной цене. Они оснащены прочными корпусами из анодированного алюминия и прочными и надежными разъемами push-pull. Серию MTi-10 легко узнать по алюминиевому серебристому основанию.











Модули серии MTi 100-series — топовый вариант модулей MTi в прочных алюминиевых корпусах, точность которых превосходит обычные модули на базе MEMS-датчиков благодаря использованию высокоточных гироскопов и уникального оптимизационного фильтра, чьи возможности выходят за рамки стандартных расширенных реализаций фильтра Калмана. Кроме того, производится более точная заводская калибровка, с высокой воспроизводимостью и надежностью. MTi 100-й серии можно узнать по темно-серому или черному основанию и небольшим отверстиям для барометра на боковой стороне корпуса. MTi-G-710 оснащен дополнительным разъемом SMA для подключения антенны GNSS.

Таблица 2. Основные точностные характеристики модулей MTi

Модуль	Крен/Тангаж		Курс	Алгоритмы обработки	Координаты и скорость
	статическая	динамическая			
MTi 1-series (1-я серия)					
MTi-1 IMU	—	—	—	—	—
MTi-2 VRU	0,5°	0,8°	AHS	XKF	—
MTi-3 AHRS	0,5°	0,8°	2°	XKF	—
MTi-7 GNSS/INS	0,5°	0,5°	1,5°	XKF	1 м; 0,05 м/с
MTi 600-series (600-я серия)					
MTi-610 IMU	—	—	—	—	—
MTi-620 VRU	0,2°	0,25°	AHS	XKF	—
MTi-630 AHRS	0,2°	0,25°	1°	XKF	—
MTi-630R AHRS	0,2°	0,25°	1°	XKF	—
MTi-670 GNSS/INS	0,2°	0,25°	0,8°	XKF	1 м; 0,05 м/с
MTi-670G GNSS/INS	0,2°	0,25°	0,8°	XKF	1 м; 0,05 м/с
MTi-680 RTK-GNSS/INS	0,2°	0,25°	0,5°	XKF	1 см; 0,05 м/с
MTi-680G RTK-GNSS/INS	0,2°	0,25°	0,5°	XKF	1 см; 0,05 м/с
MTi 10-series (10-я серия)					
MTi-30 AHRS	0,2°	0,5°	1°	XKF	—
MTi 100-series (100-я серия)					
MTi-100 IMU	—	—	—	—	—
MTi-200 VRU	0,2°	0,3°	AHS	XEE	—
MTi-300 AHRS	0,2°	0,3°	1°	XEE	—
MTi-G-710 GNSS/INS	0,2°	0,3°	0,8°	XEE	1 м; 0,05 м/с

Примечание. AHS — Active Heading Stabilization (активная стабилизация по курсу).

Таблица 3. Массовые и геометрические характеристики модулей MTi

MTi 1-series	MTi 600-series		MTi 10/100-series		MTi-G-710	
Без корпуса, OEM	Пластиковый корпус, OEM	MTi-6xxR, Корпусированный	MTi-6xxG, Корпусированный	Корпусированный	OEM	Корпусированный
						
12,1×12,1×2,55 мм	31,5×28×13 мм	56,5×40,9×24,75 мм, 75 г	56,5×40,9×36,75 мм, 98 г	57×42×23,5 мм, 52 г	37×33×12 мм, 11 г	57×42×23,5 мм, 55 г
под пайку	16-контактный разъем	12-контактный разъем	12-контактный разъем, 4-контактный разъем	9-контактный разъем	16-контактный разъем	9-контактный разъем
Отладочный набор	Отладочный набор		Отладочный набор			
						
Состав*: модуль MTi на отладочной плате, приемник и антенна, USB-кабель, ПО	Состав*: модуль MTi, отладочная плата, приемник и антенна, кабель с USB-переходником, шлейф, ПО		Состав*: модуль MTi, антенна, USB-кабель CA-USB-MTi, ПО			

Примечание. *Состав отладочного набора определяется типом модуля.

Таблица 4. Технические характеристики гироскопов и акселерометров, входящих в состав модулей MTi

Характеристики	MTi 1-series		MTi 600-series		MTi 10-series		MTi 100-series	
	Гироскопы	Акселерометры	Гироскопы	Акселерометры	Гироскопы	Акселерометры	Гироскопы	Акселерометры
Диапазон измерений*	2000 °/с	160 м/с ²	2000 °/с	100 м/с ²	450 °/с	200 м/с ²	450 °/с	200 м/с ²
Смещение нуля	—	—	—	—	0,2 °/с	0,05 м/с ²	0,2 °/с	0,05 м/с ²
Стабильность нуля в запуске	10 °/ч	30 мкг	8 °/ч	10 мкг	18 °/ч	15 мкг	10 °/ч	15 мкг
Полоса пропускания (3 дБ)	230 Гц	230 Гц	520 Гц	500 Гц	415 Гц	375 Гц	415 Гц	375 Гц
Плотность шума	0,003 °/с/√Гц	70 мкг/√Гц	0,007 °/с/√Гц	60 мкг/√Гц	0,03 °/с/√Гц	60 мкг/√Гц	0,01 °/с/√Гц	60 мкг/√Гц
Погрешность от g (с калибровкой)	0,001 °/с/g	—	0,001 °/с/g	—	0,006 °/с/g	—	0,003 °/с/g	—
Неортогональность	0,05°	0,05°	0,05°	0,05°	0,05°	0,05°	0,05°	0,05°
Нелинейность (от полного диапазона)	0,1%	0,5%	0,1%	0,1%	0,03%	0,1%	0,01%	0,1%

Примечание. *Возможны нестандартные диапазоны, по запросу.

Все серии модулей MTi поставляются с отладочным программным обеспечением MT Software Suite, которое содержит специально разработанный и простой в применении графический пользовательский интерфейс, а также драйверы для различных операционных систем и позволяет быстро начать работу с модулем. Помимо этого, ПО предлагает множество других полезных инструментов, примеры исходного кода и документацию.

В завершение описания модулей Xsens хотелось бы немного подробнее коснуться областей применения этих устройств (рис. 3–6), так как их количество растет с каждым годом.

Таблица 5. Технические характеристики магнитометров и барометров, входящих в состав модулей MTi

Характеристики	MTi 1-series	MTi 600-series		MTi 10-series	MTi 100-series	
	Магнитометр	Магнитометр	Барометр	Магнитометр	Магнитометр	Барометр
Диапазон измерений	±8 Гс	±8 Гс	300–1100 гПа	±8 Гс	±8 Гс	300–1100 гПа
Шум (с. к. з.)	0,5 мГс	1 мГс	1,2 Па	0,5 мГс	0,5 мГс	3,6 Па
Нелинейность (от полного диапазона)	0,2%	0,2%	—	0,2%	0,2%	—
Разрешающая способность	0,25 мГс	0,25 мГс	5 Па	0,25 мГс	0,25 мГс	8 см (на уровне моря, +15 °С)

В настоящее время проводится много исследований и разработок в сфере автономных наземных транспортных средств и систем помощи водителю. Причем список применений обширен: начиная от автономных

грузовиков и легковых автомобилей и поездов до мобильных роботов и автоматизированных систем для 3D-съемки. Особо следует выделить решения для складских помещений и логистики, в которых взят курс

Таблица 6. Технические характеристики GNSS-приемников, входящих в состав модулей MTi

	MTi-G-710 GNSS	MTi-680(G) RTK-GNSS /INS MTi-670(G) GNSS /INS
Тип приемника	72 channel, GPS/QZSS L1 C/A, GLONASS L10F, BeiDou B1, SBAS L1 C/A: WAAS, EGNOS, MSAS	184 channel, GPS L1C/A L2C, GLO L10F L20F, GAL E1B/C E5b, BDS B1I B2I, QZSS L1C/A L2C
Датум	WGS84	WGS84
Частота обновления	4 Гц	4 Гц
Погрешность определения координат в горизонте	Autonomous: 2,5 м CEP SBAS: 2 CEP	PVT: 1,5 м CEP RTK: 1 см CEP
Погрешность по скорости	0,05 м/с	0,05 м/с
Время готовности (холодный старт)	26 с	24 с

на максимальную автоматизацию и переход к «Индустрии 4.0», где отслеживание движения играет важную роль. Уже сейчас здесь используется робототехника, автономные транспортные средства, сенсорные технологии и «Интернет вещей» (IoT). Устройства, предлагаемые компанией Xsens, могут быть использованы в любой из этих областей, поскольку удовлетворяют всем специфическим требованиям при решении задач ориентации и навигации для объектов вне и внутри помещения, а также под землей. Например, гиригоризонт (VRU) обеспечивает вывод данных по крену, тангажу и курсу без привязки к магнитному полю Земли, что делает его оптимальным решением для использования в условиях с высокими магнитными возмущениями в закрытых помещениях и подземных складах. Или, например, модули MTi 600-й серии, поддерживающие интерфейс CAN, а также оснащенные приемником GNSS, что делает их незаменимыми для использования в автомобильных системах.

Классическими вариантами являются авиационные и морские применения. Авиационные применения включают системы управления беспилотными дронами, например для обследования территории или перемещения грузов, а также системы стабилизации камер, в том числе для киноиндустрии. В морских применениях базовыми являются задачи, связанные с управлением движением морских судов и беспилотных дронов, причем на территории портов это становится особо сложной задачей из-за необходимости учитывать большое количество различных факторов, включая сильно изменяющееся движение воды и воздуха. Перечень задач для морских применений, где требуется получать данные об углах ориентации и координатах объекта, весьма обширен и не ограничивается указанными примерами: сюда можно отнести и управление автономными подводными аппаратами, и решение задачи поддержания положения судна в условиях течения, и задачу стабилизации углового положения платформы для камер

Таблица 7. Эксплуатационные характеристики модулей MTi

Характеристики	MTi 1-series	MTi 600-series	MTi 600-series (6xxR/G)	MTi 10-series	MTi 100-series
Напряжение питания	2,19–3,6 В	4,5–24 В		4,5–34 В или 3,3 В	
Потребляемая мощность	<100 мВт (при 3 В)	<1 Вт (тип.)		550 мВт (тип., при 5 В)	660 мВт (тип., при 5 В)
Класс защиты IP	IP00	IP51	IP68	IP67 (для корпусированной версии)	
Диапазон рабочих температур	–40...+85 °C				
Вибрация и удары	–	–	–	–	MIL-STD-202-201A/204C/214A
Материал корпуса	анодированный алюминий				
Частота выдачи информации	до 800 Гц	1 кГц, 400 Гц SDI	2 кГц, 400 Гц SDI	до 2 кГц	
Запаздывание	–	–	–	< 2 мс	
Интерфейсы	I ² C/SPI/UART	CAN/RS232/UART	CAN/RS232	RS232/RS422/RS485/UART/USB	
Опции синхронизации	Syncln, SyncOut, Clock sync				
Протоколы	XBus, NMEAin	XBus, ASCII (NMEA), CAN	XBus, ASCII (NMEA), CAN	XBus или ASCII (NMEA)	

или антенн, и определение направления течения на поверхности и на глубине, и картографирование морского дна с высокой степенью детализации, и системы наблюдения в порту и на судах. Для всех указанных задач надежность и точность имеют первостепенное значение, но помимо этого, как правило, существуют требования по низкому энергопотреблению, высокоскоростной обработке и выдаче информации, малой массе и габаритам. Надежное аппаратное и программное обеспечение модулей MTi наряду с фильтрами, обеспечивающими защиту от магнитных искажений, и широкий выбор вариантов модулей по эксплуатационным характеристикам делают решения от Xsens более чем подходящими для указанных применений. В дополнение к упомянутым применениям, где могут эксплуатироваться инерциальные модули компании Xsens, следует упомянуть такие сферы, как сельское и лесное хозяйство, автомобильные испытания, добыча полезных ископаемых, цифровое картографирование и геодезия.

Благодаря богатому функционалу различных серий модулей MTi, их точностным и эксплуатационным характеристикам, решения компании Xsens перекрывают большое количество требований в той или иной области применения. А наличие удобного программного обеспечения и квалифицированная техническая поддержка позволяют инженерам-разработчикам получить надежное решение с минимальными затратами времени и ресурсов на интеграцию модулей MTi в разрабатываемую систему.

Литература

1. Vydhyathan A., Bellusci G. The Next Generation Xsens Motion Trackers for Industrial Applications. Xsens White Paper, 2018.
2. Пономарёв Ю. А. Инерциальные модули компании Xsens: объединение последних достижений науки в миниатюрном формате // Компоненты и технологии 2017. № 7.
3. IEEE Standard for inertial systems terminology, IEEEStd 1559-2009. 2009.
4. www.base.xsens.com/s/?language=en_US
5. www.xsens.com



Рис. 3. Вариант применения модулей Xsens в беспилотной сельскохозяйственной технике



Рис. 4. Вариант применения модулей Xsens в беспилотных летательных аппаратах



Рис. 5. Вариант применения модулей Xsens в морской тематике

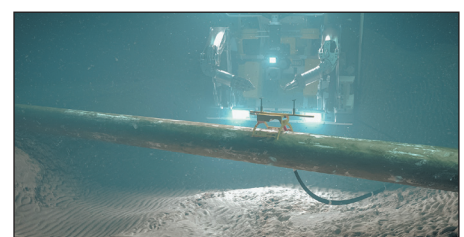


Рис. 6. Вариант применения модулей Xsens для подводных аппаратов