

Инерциальные модули на базе МЭМС для построения морских систем ориентации и навигации следующего поколения

Эрик УИТЛИ (Eric WHITLEY)
Стивен КЛАРК (Stephen CLARKE)
Юрий ПОНОМАРЁВ,
к. т. н.
ponomarev@ranet.ru

Вот уже более ста лет для ориентации и навигации морских судов и подводных лодок используются инерциальные датчики. Одним из первых устройств для решения таких задач стал гирокомпас, в 1913 году установленный на субмарине HMS E1 (рис. 1) Королевского военно-морского флота Великобритании. Любопытно, что этот прибор был создан Sperry Gyroscope Co. — компанией, которая до сих пор существует, но уже под именем Atlantic Inertial Systems, и ее совместным предприятием Silicon Sensing Systems. Обе фирмы находятся в Англии, в приморском городе Плимуте, не только имеющем богатую историю, но и знаменитом разработками в области морских технологий.

С тех давних времен гироскопы и акселерометры применяются для решения множества задач морской тематики — для контроля стабильности судна и полезной нагрузки, для управления, для определения местоположения и углов ориентации. Еще несколько десятилетий назад эти огромные прецизионные системы и входящие в них компоненты представляли собой сложнейшие механические устройства, с огромным количеством деталей, подшипников и пружин. Каждая из таких систем являлась уникальным произведением искусства, собрать

которую было под силу только профессиональному часовщику.

В настоящее время, при помощи инерциальных датчиков на базе микроэлектромеханических систем (МЭМС), компания Silicon Sensing создает сравнимые по характеристикам изделия, чья точность с каждым годом становится все выше, а размеры меньше. Единственный вопрос, на который осталось ответить: каков предел точностных параметров, размеров и цен систем на базе МЭМС-технологии и какие задачи выполняют эти системы сегодня и будут выполнять завтра.

Технология МЭМС-гироскопов и акселерометров берет начало из полупроводниковой индустрии. Основным ее преимуществом является возможность изготовления сотен идентичных микроскопических механических структур из одной пластины кремния с помощью технологий фотолитографии и глубокого реактивного ионного травления (DRIE), каждая из этих структур впоследствии станет самостоятельным чувствительным элементом готового датчика. В ходе изготовления на поверхности этих структур посредством напыления формируются тонкопленочные металлические или пьезоэлектрические преобразователи толщиной всего несколько микрон, которые впоследствии используются для возбуждения чувствительного элемента и для съема сигналов с него. После добавления к чувствительному элементу электроники с цепями возбуждения и измерения и размещения всех элементов в корпусе получается одноосный датчик угловой скорости (гироскоп) или акселерометр.

У гироскопа чувствительный элемент представляет собой кольцо, в котором возбуждаются колебания на его резонансной частоте, и при наличии угловой скорости основания возникающие силы Кориолиса приведут к повороту диаграммы вибрации в плоскости кольца на угол, пропорциональный измеряемой угловой скорости.

Принцип работы акселерометра объяснить сравнительно проще. Его конструкцию можно представить как грузик на пружинке — при наличии ускорения основания под-

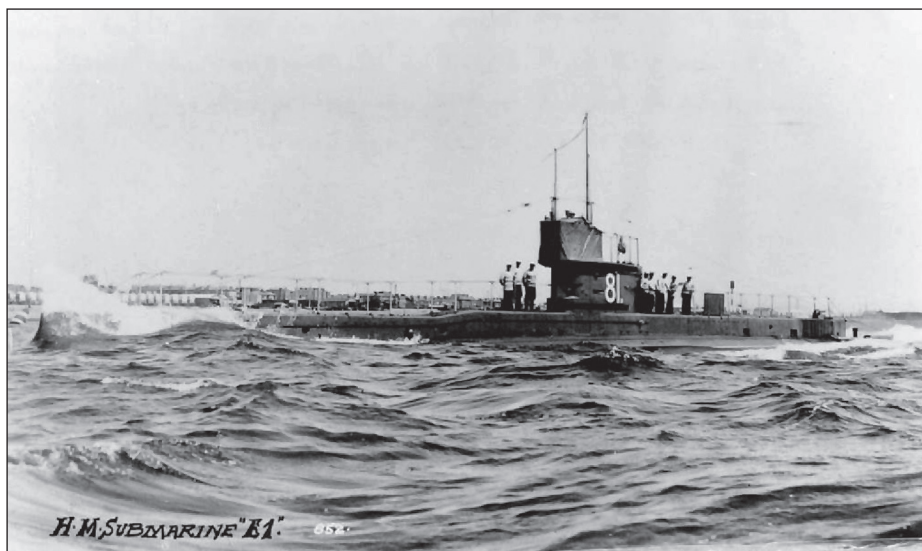


Рис. 1. Субмарина HMS E1 Королевского военно-морского флота Великобритании во время испытаний

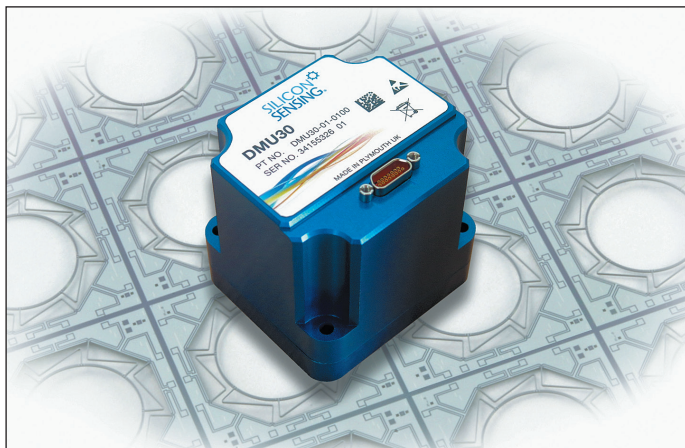


Рис. 2. Высокоточный инерциальный МЭМС-модуль DMU30 компании Silicon Sensing

вижная масса отклоняется, а емкостной датчик положения измеряет это отклонение, величина которого будет пропорциональна измеряемому ускорению.

Если взять три гироскопа и три акселерометра, расположить их по трем ортогональным осям, добавить электронику и соответствующие алгоритмы обработки выходных сигналов и откалибровать получившуюся систему по температуре, то можно получить инерциальный измерительный модуль, конфигурации которого достаточно, чтобы принципиально решить задачи ориентации и навигации какого-либо объекта: определить его положение, скорость, курс, углы крена и дифферента, а также решить задачи стабилизации и управления.

Развитию МЭМС-индустрии во многих странах в первую очередь способствовал рост автомобильной промышленности, позже эстафету перехватила индустрия мобильных устройств и гаджетов. МЭМС-гироскопы и акселерометры можно найти практически повсюду: в системах раскрытия подушек безопасности и смартфонах, системах курсовой устойчивости автомобиля и джойстиках для игровых консолей — все эти применения, требующие недорогих и миниатюрных решений, привели производителей МЭМС-устройств в состояние гонки за уменьшение габаритов, цены и энергопотребления. Ради улучшения этих трех ключевых показателей, столь важных для автомобильной промышленности и потребительской электроники, разработчики шли на многие жертвы, в список которых попали и точностные характеристики, уровень которых остается относительно низким несмотря на ежегодное повышение точности датчиков, ориентированных на массовые рынки. Нестабильность нулевого сигнала, одного из ключевых параметров МЭМС-гироскопа, составляет десятки или сотни градусов в час, в то время как для получения приемлемой точности при определении местоположения и курса подводного аппарата хотя бы на небольшом промежутке времени автономной работы необходимы гироскопы с нестабильностью нулевого сигнала порядка нескольких десятых или сотых градуса в час.

За последние 15 лет МЭМС-индустрия показала огромный рост не только количества производимых изделий с нуля до ста миллионов осей в год, но и разновидностей датчиков по типу и точностям: от простейших копеечных до высокоточных и дорогих, способных почувствовать, например, скорость вращения Земли ($15^\circ/\text{ч}$), позволяя тем самым определить истинное направление на Север. Датчики с такими возможностями пользуются высочайшим спросом, например, у разработчиков внутрискважинного оборудования в нефтегазовой отрасли для определения положения бура либо каротажного зонда глубоко под землей. Другим вариантом применения может служить высокоточный инерциальный модуль на базе МЭМС-датчиков для стабилизации положения судна при наличии резко меняющихся внешних условий.

Компания Silicon Sensing начала свой путь с производства МЭМС-гироскопов для тормозных систем автомобилей, где в первую очередь предъявляются требования по надежности, целостности и особен-

но по цене. Однако позже компания сконцентрировала свои усилия на постоянном повышении точности своих инерциальных датчиков и систем на их базе. Венцом достижений инженеров компании стал современный инерциальный модуль DMU30 (рис. 2), первый в новой линейке продуктов НРИМУ — высокоточных инерциальных модулей на основе МЭМС-датчиков. Эти высококачественные устройства, имеющие конкурентные характеристики и стоимость, способны соперничать с инерциальными модулями на базе электромеханических, лазерных и волоконно-оптических гироскопов. Благодаря своим габаритам, цене и высокой надежности, которые могут быть достигнуты только у МЭМС-устройств, DMU30 открывает новые возможности для разработчиков систем для морских и подводных судов. Другим преимуществом данного модуля является тот факт, что он не подпадает под ограничения ИТАР (Правила международной торговли оружием), поскольку разработан и производится в Великобритании и Японии и изначально ориентирован на применения в морской технике и других промышленных и коммерческих рынках.

В поисках истинного Севера

Любой гироскоп или акселерометр как инструмент для измерения параметров движения характеризуется набором точностных параметров, которые могут быть получены из графика девиации Аллана (рис. 3). Этот график формируется путем длительного замера нулевого сигнала гироскопа или акселерометра и вычисления дисперсии отклонений текущего значения выходного сигнала от предыдущего при различных временах осреднения полученных данных. По построенному графику девиации Аллана можно определить ряд параметров датчика, ключевыми из которых являются нестабильность нулевого сигнала и случайный уход.

Нестабильность нулевого сигнала гироскопов DMU30 составляет около $0,1^\circ/\text{ч}$, а случайный угловой уход менее $0,017^\circ/\sqrt{\text{ч}}$. Аналогичные параметры акселерометров составляют $30 \text{ мкг}/\text{ч}$ и $0,05 \text{ м}/\text{г}/\sqrt{\text{ч}}$. И это только начало, особенно если взглянуть на список уже запланированных работ по улучшению характеристик датчиков и разработке новых.

Инерциальный модуль DMU30 обладает рядом уникальных особенностей, например, по каждой из трех осей расположено по два гироскопа и два акселерометра. Гироскопы абсолютно независимы, и в связи с тем что они имеют различную конструкцию и принцип работы, обладают разными преимуществами по характеристикам. Первая триада — недорогие миниатюрные гироскопы с открытым контуром и датчиками возбуждения и съема пьезоэлектрического типа, вторая триада — высокоточные гироскопы с закрытым контуром, магнитоэлектрическими датчиками возбуждения и индукционными датчиками

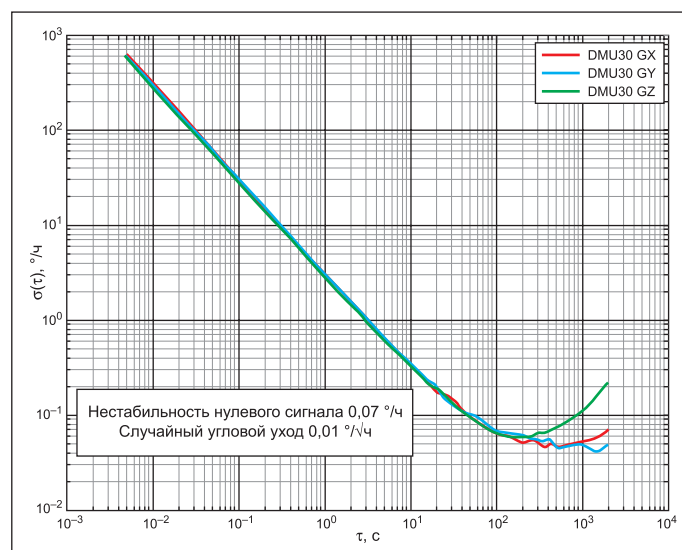


Рис. 3. Графики девиации Аллана для гироскопов инерциального модуля DMU30



Рис. 4. Инерциальный МЭМС-модуль DMU11 компании Silicon Sensing

схема. В качестве акселерометров используются двухосные емкостные акселерометры с открытым контуром, расположенные таким образом, чтобы с каждой из осей инерциального модуля совпадали по две измерительные оси акселерометров. Подобное решение с двумя разными гироскопами по каждой из осей обладает рядом преимуществ. Путем калибровки каждого гироскопа и синтеза выходных сигналов можно получить высокую чувствительность на малых диапазонах измерения до 200°/с и одновременно большой диапазон измерений до 500°/с и выше. В качестве примера следует привести беспилотный подводный аппарат для картографирования, который внезапно сталкивается с каким-либо препятствием. Для подобного объекта, где в штатном режиме все движения судна плавные, с малыми скоростями и ускорениями, ключевым требованием к инерциальным датчикам становится малый шум, что, как правило, означает наличие малого диапазона измерений и малую полосу пропускания. При столкновении судна с препятствием возникают динамичные движения с большими скоростями и ускорениями, которые могут превысить указанные диапазоны датчиков и уйти в насыщение. И в этом случае вторая триада гироскопов модуля DMU30 с большим диапазоном будет продолжать выдавать показания, тем самым предотвращая потерю данных, а соответственно, и накопление ошибок. В случае акселерометров избыточность измерительных осей можно использовать для устранения синфазных ошибок, а значит, и для увеличения точности модуля и снижения шумов. В качестве примера достижимых точностей инерциального модуля DMU30 можно привести его способность определять истинное направление на Север с точностью 0,5° за период времени, равный 10 мин.

Для особо важных применений, где необходима высокая надежность, DMU30 также может стать отличным готовым решением, поскольку имеет избыточность датчиков по всем осям, которые могут быть использованы в качестве резервных. Другая особенность прибора заключается в том, что вторая триада гироскопов имеет очень низкое энергопотребление: менее 2% от потребления первой три-

Таблица. Основные характеристики инерциальных модулей компании Silicon Sensing

Наименование	DMU10-0x без калибровки	DMU10-2x с калибровкой по температуре	DMU11	DMU30
Внешний вид				
Гироскопы				
Диапазон измерений	±300°/с		±300°/с	±200°/с
Изменение МК в температурном диапазоне	±1,5%	±0,1%	±0,1%	±100 ppm
Нелинейность МК	±0,05%	±0,033%	±0,033%	±100 ppm
Дрейф нуля на температурном диапазоне	±1,65°/с	±0,25°/с	±0,25°/с	±20°/ч
Шум (СКЗ в полосе 100 Гц)	0,1°/с		0,1°/с	0,15°/с
Нестабильность нулевого сигнала	<15°/ч		—	<0,2°/ч
Случайный угловой уход (ARW)	<0,4°/√ч		—	<0,02°/√ч
Акселерометры				
Диапазон измерений	±10 g		±10 g	±10 g
Изменение МК в температурном диапазоне	±1%	±0,1%	±0,1%	±100 ppm
Нелинейность МК	±0,5% (±8 g)		±0,5% (±8 g)	±100 ppm (±10 g)
Дрейф нуля на температурном диапазоне	±50 mg	±2,5 mg	±2,5 mg	±1,5 mg
Шум (СКЗ в полосе 100 Гц)	1 mg		1 mg	1 mg
Нестабильность нулевого сигнала	<0,05 mg		—	<0,03 mg
Случайный уход по скорости (VRW)	<0,05 м/с/√ч		—	<0,05 м/с/√ч
Несоосность				
В диапазоне температур	3%	0,35%	1,75%	±0,35%
Датчик температуры				
Диапазон измерений	-40...+100 °C			
Погрешность измерения в рабочем диапазоне	±3 °C			
Эксплуатационные характеристики				
Диапазон рабочих температур	-40...+85 °C			
Время готовности	<0,5 с		<0,5 с	<1 с
Потребляемый ток/мощность	85 mA		85 mA	<3 Вт
Напряжение питания	3,2–5,25 В		3,2–5,25 В	4,75–36 В

Примечание. МК — масштабный коэффициент.

ады высокоточных гироскопов. Это позволит применить новые функции спящего режима и режима малого энергопотребления, когда высокоточные гироскопы выключены, но модуль DMU30 продолжает функционировать и выдавать информацию со второй триады гироскопов и акселерометров. Высокоточные гироскопы снова могут быть включены либо в случае превышения угловой скорости или ускорения заданной пороговой величины, либо по команде от пользователя в зависимости от выбранного режима. Это способствует существенной экономии энергии, что весьма актуально для беспилотных подводных судов, поскольку с каждым годом они становятся все миниатюрней.

Не менее важным преимуществом компании является и то, что производство инерциальных модулей полностью находится в руках Silicon Sensing, начиная от разработки самих гироскопов и акселерометров и заканчивая калибровкой готового инерциального модуля. Для клиентов это означает уверенность в качестве продукта, отсутствие перебоев в поставках и минимальные цены. Помимо этих преимуществ, такой контроль над разработкой и производством позволяет быстро и просто адаптировать продукцию к изменяющимся рыночным условиям и легко внедрять самые последние разработки по акселерометрам и гироскопам в инерци-

альные модули. Примером тому служит последняя новинка компании Silicon Sensing — только что анонсированный инерциальный модуль DMU11 (рис. 4), последователь уже завоевавшего большую популярность в мире инерциального модуля DMU10. Модуль DMU11 имеет схожие характеристики с DMU10, но более компактен и предназначен для массовых применений, где критичны размеры компонентов.

В заключение хотелось бы ответить на вопрос: «Каковы же дальнейшие планы Silicon Sensing?» Если взглянуть на пятилетний план развития компании, то можно обнаружить целый ряд задач по улучшению как МЭМС-гироскопов и акселерометров, так и инерциальных модулей, основной же целью является совершенствование параметров нестабильности нулевого сигнала и случайного дрейфа. Также планируется оснастить инерциальные модули магнитометрами, барометром и приемником сигналов спутниковой навигационной системы. Это позволит выдавать уже скорректированные показания по углам ориентации и информацию о координатах объекта. Таким образом, компания Silicon Sensing делает ставку на увеличение точности своих будущих МЭМС инерциальных модулей и уменьшение габаритов, что позволит расширить области их применения на морских судах и подводных аппаратах (таблица). ■