

Применение МЭМС-технологии В навигации

Появление микроэлектромеханических систем (МЭМС) позволило создать широкий спектр миниатюрных, надежных и недорогих устройств, востребованных практически во всех отраслях промышленности и на потребительском рынке. А по мере совершенствования производственных технологий, повышения качества и характеристик МЭМС-изделия находят все более широкий спрос в оборонной, авиационно-космической, энергетической и других высокотехнологичных отраслях, в частности инерциальной навигации. Применение в инерциальных навигационных системах (ИНС) МЭМС-акселерометров и гироскопов позволяет реализовывать методы инерциальной навигации на новом уровне, когда миниатюрные датчики служат источниками данных о параметрах движения летательных аппаратов, транспортных средств и судов.

В предлагаемой статье пойдет речь об инерциальных датчиках, выполненных с использованием МЭМС-технологий производства компаний Sensonog и Colibrys, как примерах МЭМС-устройств, позволяющих в полной мере использовать преимущества современных технологий в навигационных системах, обеспечивая их уменьшение, удешевление и возможность более широкого внедрения.

Алексей ГОЛОЩАПОВ
gol_a@aviton.spb.ru

Инерциальная навигация

Инерциальная навигация — метод определения координат и параметров движения различных объектов (судов, самолетов и др.) и управления их движением, основанный на свойствах инерции тел. Принцип заключается в измерении движений объекта, характеризующихся изменениями во времени его ускорения, скорости и координат, при помощи датчиков пространственного перемещения. Полученные от датчиков данные используются для решения задач навигации, управления и наведения.

В датчиках, измеряющих пространственное перемещение, используются подвижные массы в качестве чувствительных элементов. Такая масса под действием сил инерции, возникающих при изменении параметров движения объекта, перемещается на определенную величину, которая измеряется и преобразуется в электронный вид.

Датчики пространственного перемещения, называемые инерциальными датчиками, формируют системы инерциальной навигации (наведения), которые обеспечивают автономное измерение ускорений объекта (например, судна или летательного аппарата), определение его скорости, положения в пространстве и расстояния, пройденного им от исходной точки, и, таким образом, выработывают навигационную информацию и данные для управления объектом.

Ускорение — векторный параметр, имеющий как численное значение, так и направление. Таким образом, для получения полной информации об ускорении требуются преобразователи, измеряющие оба эти показателя. В качестве датчиков в системах инерциальной навигации применяются акселерометры и гироскопы. Первые измеряют величину ускорения, вторые предоставляют информацию об угловой скорости, по которой определяется направление.

Акселерометры, измеряя фактическое ускорение летательного аппарата, в то же время подвержены влиянию гравитационного поля Земли. Для реализации алгоритмов компенсации этого влияния необходима опорная система координат, которая обеспечит данными о текущем положении акселерометров. В классических ИНС с гироскопами вращения опорная система координат реализовывалась за счет установки акселерометров и гироскопов на стабилизированной платформе в кардановом подвесе. Такой подход позволяет изолировать датчики от поворотов летательного аппарата, делая пространственное положение акселерометров неизменным относительно земли при движении объекта.

При создании современных ИНС чаще используются так называемые бесплатформенные системы (БИНС) — акселерометры и гироскопы в них жестко связаны с корпусом объекта. Измерения с выходов гироскопов

поступают непосредственно на компьютер, вычисляющий мгновенную ориентацию акселерометров в опорной системе координат и формирующий соответствующие сигналы, компенсирующие влияние гравитации.

Учитывая, что опорная система координат в БИНС реализована на базе программной обработки данных от гироскопов и акселерометров, а также конструкции современных инерциальных датчиков, в таких системах нет вращающихся частей, они существенно проще по конструкции и дешевле в производстве, нежели классические ИНС.

Основное достоинство ИНС — автономность. Работа таких систем не подвержена влиянию погодных условий и электромагнитного излучения, не требует внешних сигналов. Сами ИНС, будучи локальными системами, не требуют для своей работы организации канала обмена данными (например, между летательным аппаратом и землей). Недостатки же ИНС — необходимость их начальной настройки (выставки) и накопление ошибок со временем.

Частным случаем современных БИНС являются системы определения курса и пространственного положения (AHRS, Attitude Heading and Reference System), более известные как курсовертикали. Содержащиеся в них многоосевые датчики выдают данные измерений для определения направления, углового и пространственного положения, поворотов в различных плоскостях самолета или иного



Рис. 1. Курсовертикаль в составе авиационных приборов

объекта, передвигающегося в пространстве. Курсовертикали пришли на смену традиционным механическим гироскопическим пилотажным приборам, обеспечивая несравнимо более высокую надежность и точность. Такие системы включают в себя твердотельные или МЭМС-гироскопы, акселерометры и магнитометры для всех трех осей. Некоторые курсовертикали используют приемники GPS для улучшения долговременной стабильности гироскопов. Фильтр Калмана используется для оптимальной оценки данных измерений.

Инерциальные навигационные системы требуют инициализации, в ходе которой производится настройка системы по местоположению и пространственному положению (ориентация относительно заданной базы, например горизонта). Пространственное положение можно задать, пользуясь акселерометрами для определения направления вертикали и гироскопами для определения вращения Земли (этими векторами определяются оси опорной системы координат). Этот процесс называется выставкой и, как правило, требует, чтобы объект оставался неподвижным в течение некоторого времени, необходимого для определения начального положения.

При выставке инерциальная система координат проходит через процедуру автонастройки, которая позволяет выровнять вертикальную ось локальной системы координат по измеренному ускорению и измерить горизонтальную скорость Земли для определения начального азимута. В случае если начальное положение объекта известно и гироскопы обеспечивают точные измерения, этих данных будет вполне достаточно для навигации.



Рис. 2. Внешний вид курсовертикали

Однако первоначальное положение известно в очень редких случаях, а гироскопы обычно выдают искаженные данные: и гироскопы, и акселерометры подвержены смещению и дрейфу нуля, несоосности, ошибкам ускорения (g -чувствительность), нелинейным эффектам и погрешности масштабного коэффициента. Эти ошибки учитываются при настройке системы. Наибольшая погрешность в курсовертикалях связана со смещением нуля гироскопов.

При работе ИНС ошибки со временем накапливаются в силу того, что система интегрирует все входные данные, включая ошибки. Так, скорость движения вычисляется интегрированием измеряемого акселерометрами ускорения, и постоянная ошибка в этих измерениях приводит к постоянно увеличивающейся ошибке скорости. Ошибки гироскопов обуславливают появление дополнительных искажений в определении направления при измерении ускорения и ускорения свободного падения, а постоянное интегрирование приводит к усугублению этих неточностей.

Без применения алгоритмов фильтрации и отдельных независимых измерений акселерометров и гироскопов результат навигационных вычислений будет отличаться от истинной траектории. Так, коррекция на базе фильтра Калмана обеспечивает калибровку гироскопов в режиме онлайн, передавая значения корректировок в блок вычислений и определяя характеристики текущего смещения гироскопов. Акселерометры обеспечивают выдачу опорной информации о пространственном положении объекта, используя земную гравитацию.

В основном роль акселерометров в курсовертикалях заключается в обеспечении опорной информации о начальном положении и коррекции пространственного положения путем компенсации дрейфа гироскопов во время движения.

В настоящее время существуют различные типы курсовертикалей. Высокоточные системы используют кольцевые лазерные или волоконно-оптические гироскопы. К качеству таких систем предъявляются очень высокие требования, поскольку они используются в режиме автоматического полета и должны быть настолько точными, чтобы предотвратить, например, контакт крыльев крупных самолетов с землей во время взлета или посадки (особенно в тумане и других экстремальных погодных условиях). Для этого типа навигационных систем требуются акселерометры со стабильностью смещения не менее 2 mg при любых условиях, включая диапазон изменения температур, линейность, эффекты второго порядка и несоосность. Курсовертикали более низких классов не требуют такой высокой точности, поскольку используются в качестве вспомогательных систем ориентирования пилотов или как резервные навигационные системы,

в частности, в небольших гражданских самолетах и на некоторых беспилотных летательных аппаратах (БЛА). В этих случаях используются также МЭМС-гироскопы и акселерометры более низкого класса.

Параметры инерциальных датчиков зависят от применения.

Для курсовертикалей высокого и среднего класса обычно используются гироскопы с дрейфом $0,01\text{--}0,1^\circ/\text{ч}$ и акселерометры с диапазоном $10\text{--}15 \text{ g}$.

В приборах более низкого класса применяют гироскопы с дрейфом $1\text{--}10^\circ/\text{ч}$ и акселерометры с диапазоном до 5 g .

Датчики Sensorog и Colibrys для навигации

Инерциальные навигационные системы входят в число самых требовательных к характеристикам датчиков и качеству измерений приложений. Основными параметрами датчиков, критичными для оптимальной работы навигационных систем, являются: стабильность смещения, стабильность масштабного коэффициента, несоосность и ее стабильность, а также чувствительность и компенсация вибрации. Изначальные отклонения большинства этих параметров от их ожидаемого значения могут быть легко откалиброваны и минимизированы обработкой. Тем не менее основными проблемами остаются их повторяемость и стабильность во времени при изменении температуры, при ударах и вибрации. Эти явления могут привести к непредсказуемым дрейфам, которые, в свою очередь, определяют класс гироскопов и акселерометров.

Использование датчиков на базе МЭМС-технологий позволяет сделать ИНС дешевле, меньше, легче и надежнее. Как, например, в описанных выше курсовертикалях, инерциальные данные от таких систем могут использоваться в основных и вспомогательных пилотажных дисплеях, системах управления полетом и стабилизации антенн.

В некоторых случаях подобные системы сопрягаются с внешними GPS-системами, позволяя получить полную информацию о положении и курсе и обеспечивая выполнение операций нахождения географического положения цели и наведения на нее в процессе полета.

Гироскопы и модули Sensorog

Компания Sensorog (Норвегия) работает на рынке кремниевых МЭМС-датчиков с 1985 года. Ею созданы уникальные технологии разработки и изготовления гироскопов и гироскопических модулей на основе МЭМС-технологий. В частности, технология изготовления чувствительного элемента гироскопа Sensorog представляет собой комбинацию монокристаллического кремния и боросиликатного стекла.

Конструкция гироскопов Sensoror

Чувствительный элемент гироскопического датчика изготавливается по собственной технологии Sensoror — ButterflyGyro — по схеме камертонного вибрационного гироскопа и характеризуется применением двойной симметричной инерциальной массы, которая находится в полости низкого давления и выполнена из одного кристалла кремния. Одни и те же электроды служат для возбуждения колебаний инерциальной массы и измерения емкости, соответствующей входному вращению. Площадь чувствительного элемента всего 3,1×2,4 мм.

Инерциальные массы соединены между собой стержнем, имеющим несимметричное поперечное сечение. Такая форма связи обеспечивает вращательные колебания возбуждения инерциальных масс при воздействии перпендикулярных (относительно плоскости

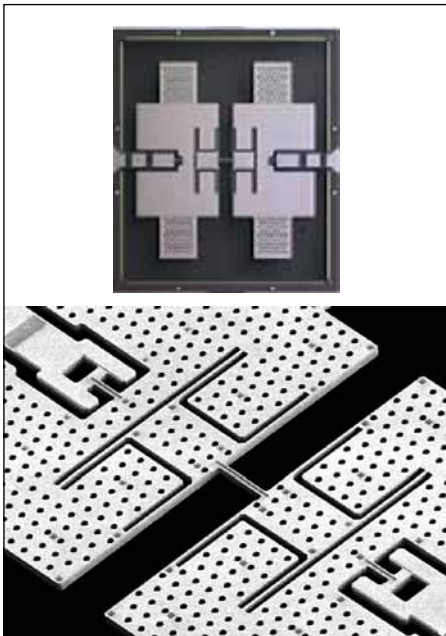


Рис. 3. Чувствительный элемент ButterflyGyro

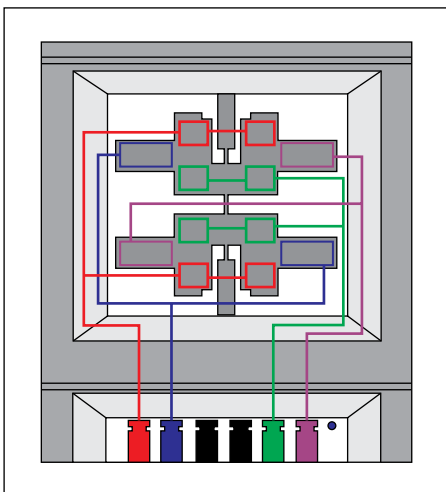


Рис. 4. Распределение электродов чувствительного элемента

Таблица 1. Параметры гироскопов SAR100 и SAR150

Модель	Диапазон, °/с	Формат данных выходного интерфейса	Масштабный коэффициент, °/с/бит	Нестабильность смещения, °/ч	Угловой случайный уход, °/ч	Частота дискретизации, выб./с	Рабочая температура, °С
SAR100	±400	SPI, 12 бит	0,25	72	1,8	2000	-40...+125
	±250		0,25		1,8		
	±100		0,1		1,2		
SAR150	±250		0,25	50	0,8		
	±100		0,1		0,65		

Таблица 2. Параметры компактных гироскопических модулей STIM202 и STIM210

Модель	Диапазон, °/с	Разрешение, °/ч	Масштабный коэффициент, ppm	Нестабильность смещения, °/ч	Угловой случайный уход, °/ч	Частота дискретизации, выб./с	Рабочая температура, °С
STIM202	±400	0,22	±500	0,5	0,2	2000	-40...+85
STIM210					0,15		

масс) электростатических сил, что приводит к появлению сил Кориолиса, вызывающих колебания масс, перпендикулярные оси возбуждения. Наведенные колебания измеряются емкостным принципом. Таким образом, в конструкции чувствительного элемента сочетаются относительная простота изготовления структуры инерциальных масс методом объемной микрообработки кремния и высокая гироскопическая чувствительность.

Симметричная форма инерциальных масс и подключение электродов возбуждения и измерения крест-накрест обеспечивают работу в балансном противофазном режиме вибраций, который как по оси возбуждения, так и по оси измерения делает гироскоп малочувствительным к внешним вибрациям, ограничивая влияние смещения и повышая добротность.

В настоящее время Sensoror выпускает МЭМС-гироскопы SAR100 и SAR150 (табл. 1), высокоточные гироскопические модули STIM202 и STIM210, а также инерциальные измерительные устройства STIM300.

Гироскопические датчики SAR100 и SAR150 представляют собой элементы ButterflyGyro, схему обработки сигналов и датчик температуры, заключенные в герметичном корпусе LCC, способном проти-

востоять ударам до 5000 g без деградации характеристик. Датчики SAR поставляются с различными диапазонами угловых скоростей; выходной сигнал — цифровой SPI-код; встроенная схема обработки реализует функции диагностики и цифровой фильтр нижних частот.

Компактные гироскопические модули STIM202 и STIM210 (табл. 2) разработаны для реализации измерений угловых скоростей по одной, двум или трем ортогональным осям с выдачей данных по стандартному интерфейсу RS-422. Такая конструкция обеспечивает простую интеграцию модулей в различные системы благодаря широким возможностям по настройке параметров и подключению напрямую к компьютеру. Высокие значения характеристик модулей позволяют применять их в различных ИНС и бортовых системах ориентации и стабилизации платформ.

Внутренняя конструкция модулей STIM202 включает в себя демпферы ударных нагрузок и вибраций для реализации измерений в приложениях, подверженным таким воздействиям.

Цифровая обработка данных производится внутри модулей, давая пользователю возможность варьировать конфигурацию устройства, например менять настройки фильтров, частоту выборки, состав выходных данных, выходные форматы.



Рис. 5. Гироскопический датчик SAR150



Рис. 6. Гироскопический модуль STIM210

Инерциальное измерительное устройство STIM300 создано на базе модуля STIM210 для обеспечения такой же компактности и простоты интеграции при существенном расширении объема выдаваемой информации. Каждое устройство этого типа содержит в себе три гироскопа, три акселерометра и три инклинометра в одном корпусе и характеризуется малыми массогабаритными характеристиками и низким энергопотреблением.

Характеристики устройства:

- нестабильность смещения $0,5^\circ/\text{ч}$;
- угловой случайный уход (шум) $0,15^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ — для гироскопов;
- нестабильность смещения 5 g^{-3} — для акселерометров;
- вес 55 г;
- объем 35 см^3 .

Благодаря своим параметрам STIM300 позволяет реализовать приложения, где размеры, вес и энергопотребление являются критическими при обеспечении высоких точностных характеристик и широкого функционала.

Все изделия Sensorog проходят многоэтапную калибровку, которая включает в себя измерения среднеквадратичных отклонений при отсутствии вращения, измерения температурных зависимостей отклонений отдельно для каждой оси. Калибровочные коэффициенты хранятся в памяти микроконтроллера гироскопа и используются при обработке данных.

Акселерометры Colibrys для навигационных систем

Компания Colibrys занимает особую позицию среди производителей МЭМС-акселерометров, специализируясь на изделиях класса hi-end, применяемых в экстремальных условиях, а также критических по безопасности промышленных системах и приборостроении. Акселерометры Colibrys включают в себя высокостабильные инерциальные датчики, датчики наклона и датчики вибрации.

Конструкция акселерометров Colibrys

Конструкция акселерометров, получившая широкое распространение, представляет собой инерциальную массу, которая связывается с корпусом упругим подвесом — пружиной того или иного рода. Именно такой подход реализован в акселерометрах Colibrys. Чувствительный элемент формируется из трех кремниевых пластин, образующих трехслойную вертикальную структуру. Верхняя и нижняя пластины образуют соответствующие крышки элемента, на которых сформированы неподвижные электроды конденсаторов. В средней пластине методом объемной микрообработки кремния изготавливается инерциальная масса с упругим подвесом и формируются боковые стенки элемента. На верхней и нижней поверхности инерциальной массы формируются подвижные электроды конденсаторов. Все три пла-

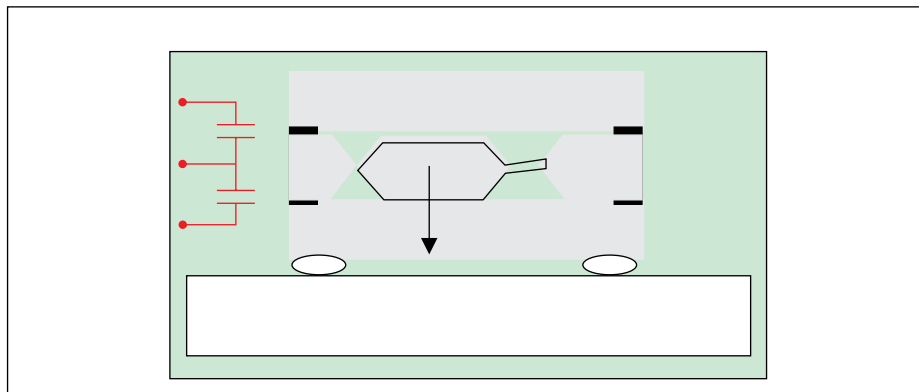


Рис. 7. Схема конструкции чувствительного элемента акселерометра Colibrys

стины свариваются между собой при высокой температуре и низком давлении. Таким образом, создается система из двух емкостей с подвижными электродами, имеющая большее усиление за счет большего изменения емкости при смещении массы, что достигается небольшими зазорами и большой площадью электродов конденсаторов. Кроме того, эта конструкция имеет броуновское движение из-за большой массы.

Принцип действия чувствительного элемента с дифференциальной емкостью основан на механической системе с упругим подвесом инерциальной массы. При нулевом ускорении инерциальная масса находится в центральном положении между двумя параллельными кремниевыми пластинами, а под воздействием ускорения смещается в одну из сторон, изменяя тем самым пропорционально ускорению величины емкости верхнего и нижнего конденсаторов. Большая емкость ($2 \times 35 \text{ пФ}$) обеспечивает достаточную величину выдаваемого сигнала в малошумящую и высокостабильную электронику для надежной обработки сигналов.

Структура чувствительного элемента изготавливается из монокристаллического кремния, имеющего очень низкое остаточное напряжение, тем самым снижаются возможность ее изгиба и влияние на параметры измерений. Структура имеет очень высокую степень симметрии для обеспечения максимально низкого смещения и максимально высокой стабильности характеристик.

Ключевое свойство обеспечения параметров датчика — газовое демпфирование МЭМС-элемента, которое необходимо очень тщательно контролировать не только для того, чтобы получить управляемую полосу пропускания, но и для снижения ошибок коррекции. Эта величина представляет порядок нелинейности и в результате приводит к смещению, когда датчик подвержен синусоидальной или случайной вибрации. Демпфирование особенно критично для инерциальной навигации. Электроника, считывающая полезный сигнал с чувствительного элемента (собственная разработка Colibrys), работает по принципу самоуправ-



Рис. 8. Внутреннее устройство датчика MS8000

новешивающегося емкостного считывания. Схема реализована на базе высокостабильной ASIC с энергопотреблением ниже 390 нА при 5 В . Электронный блок имеет сброс по включению питания и защиту от снижения напряжения для обеспечения надежного выходного сигнала в самых жестких условиях. Акселерометр содержит PIC-микроконтроллер, используемый в процедурах запуска и сброса при снижении напряжения. Для обеспечения температурной компенсации в корпусе акселерометров устанавливаются датчики температуры.

Практически все датчики производства Colibrys автономны, размещаются в керамических корпусах LCC20 (кроме MS7000 — корпус TO8), рассчитаны на работу в диапазоне температур от -55 до $+125 \text{ }^\circ\text{C}$ и имеют стойкость к ударам до 6000 г , при которых технические характеристики датчиков остаются в рамках спецификаций. Для работы датчиков требуется одна питающая цепь с напряжением $2,5\text{--}5,5 \text{ В}$ и током $<0,5 \text{ мА}$ при 5 В . На выходе каждого акселерометра в качестве полезного сигнала — аналоговое напряжение, изменяющееся пропорционально ускорению в диапазоне $0,5\text{--}4,5 \text{ В}$ (при напряжении питания 5 В).

Заключение

Инерциальные навигационные системы позволяют автономно определять местоположение и ориентацию подвижных объектов без внешних источников информации. Применение в таких системах высокотехнологичных датчиков, выполненных

по МЭМС-технологиям при общем повышении надежности, обеспечивает снижение габаритов и веса бортового навигационного оборудования, уменьшает затраты на его разработку и производство, а следовательно, и стоимость таких систем. Кроме того, МЭМС-датчики в ряде случаев позволяют применять оборудование в более жестких условиях эксплуатации, что, в свою очередь, расширяет спектр применений ИНС в различных приложениях, в которых до настоящего времени это было труднореализуемой задачей в силу ограничений как по массо-

габаритным показателям и рабочим характеристикам, так и по экономическим соотношениям.

Инерциальные датчики производства компаний *Sensonog* и *Colibrys* демонстрируют хороший пример воплощения МЭМС-технологий в устройствах класса *hi-end*, способных работать в приложениях с повышенными требованиями к характеристикам в жестких условиях различных рынков, таких как энергетический, оборонный, авиакосмический, промышленный и приборостроительный. ■