

Продолжение. Начало в № 3`2010

Ключевые сегменты рынка МЭМС-компонентов. Инерциальные системы — от low-end до high-end сегментов

В статье рассказывается об акселерометрах, гироскопах, IMU и других инерциальных модулях в МЭМС-исполнении, в большом ассортименте предлагаемых сегодня многими производителями для различных сегментов рынка — от low-end до high-end. Наблюдается не только более полный охват рынков, сегментов, применений. Ярко выраженным для многих из инерциальных компонентов является повышение уровня системной интеграции. Об этом в контексте обзора важнейших обновлений линеек компонентов и модулей инерциальных измерений от их ведущих производителей — далее в статье.

Светлана СЫСОЕВА
info@sysoeva.com

Понятие инерциальной системы

Согласно самой общей классификации выделяются следующие уровни интеграции датчиков инерции:

- Автономный акселерометр — датчик для измерения ускорения (линейного или углового, обычно линейного) как индивидуальное устройство.
- Автономный гироскоп — датчик для измерения угловой скорости.
- Инерциальные кластеры — модули, объединяющие на общем носителе или в одном корпусе модуля два или несколько однотипных или разнотипных измерительных устройств, то есть два или более акселерометров (кластеры акселерометров) или два или более гироскопов (гироскопов (кластеров акселерометров и гироскопов, в частности, блоки IMU)).
- Мультисенсорные инерциальные модули — модули, комбинирующие инерциальные датчики между собой или инерциальные датчики с другими типами датчиков, например, акселерометр(ы) и гироскоп(ы) с датчиками температуры и магнитометрами (в частности, блоки IMU).
- Блок инерциальных измерений (IMU-кластер), объединяющий в общем случае по три взаимно ортогональных акселерометра и гироскопа или трехосевой акселерометр и трехосевой гироскоп. (В некоторых случаях они доукомплектовываются трехосевым магнитометром, а также датчиком температуры. Название IMU может применяться для блоков с 4–6 степенями свободы.)

- AHRS (Attitude Heading and Reference System), или система определения расположения и курса относительно земных осей — IMU, дополненная электроникой и магнитометрами, на аппаратном и программном уровне выполняет основные функции, определенные в названии, то есть предоставляет информацию об ориентации объекта в пространстве.

- INS (Inertial Navigation System) — инерциальная навигационная система, объединяющая IMU, которые дополняются GPS-ресивером, другими датчиками, электроникой со специальным программным обеспечением, которая поставляет навигационную информацию и данные о положении.

Если рассматривать технологии МЭМС, то все перечисленные уровни интеграции соответствуют понятию инерциальной системы, поскольку современные МЭМС-устройства представляют собой высоко интегрированные компоненты, созданные с применением зрелых технологических процессов производства [1–4].

Системность МЭМС-датчиков инерции вытекает из самого понятия МЭМС (микроэлектромеханические системы) и поддерживается тем, что производитель МЭМС-датчика объединяет сенсорную часть с ASIC и обеспечивает всю цепочку получения качественного (калиброванного, скомпенсированного, высоко разрешающего и т.д.) сенсорного сигнала.

Объединение вместе с датчиком всех схем, включая оптимизированное питание, обработку сигнала, интерфейс (выходной электрический и входной пользовательский), коммуникацию, программируемость, избыточность, объединение и слияние сенсорных

данных нескольких датчиков, сетевые коммуникации — все это различные проявления системного подхода к сенсорной интеграции. Поэтому даже автономный инерционный МЭМС-компонент на основе одного измерительного устройства является, по сути, инерциальной системой.

Производство МЭМС нацелено на удовлетворение потребностей следующих сегментов рынка:

- массовых, то есть требующих низкой цены устройств на фоне массовых объемов их производства — потребительских, автомобильных, медицинских устройств;
- рынков специального назначения, относящихся к high-end сегментам — военного, аэрокосмического, для мониторинга сейсмических условий и др.

Очевидно возникновение и расширение круга применений на так называемых маргинальных, или пограничных рынках, занимающих по требованиям к уровню исполнения устройств и соотношению «объемы производства/рабочие характеристики» промежуточное положение между high-end и low-end сегментами (например, промышленные, медицинские устройства, коммерческая авиационная техника).

Как следует из представленного в [2] обзора, ведущим сейчас является потребительский сегмент электронных устройств. Для соговых телефонов и других подобных устройств различные производители предлагают МЭМС-компоненты с расширенной функциональностью, включая пользовательский интерфейс, отличающиеся малыми размерами (до 4 мм², с толщиной менее 1 мм), низким энергопотреблением и низкой ценой — \$1–3 или меньше.

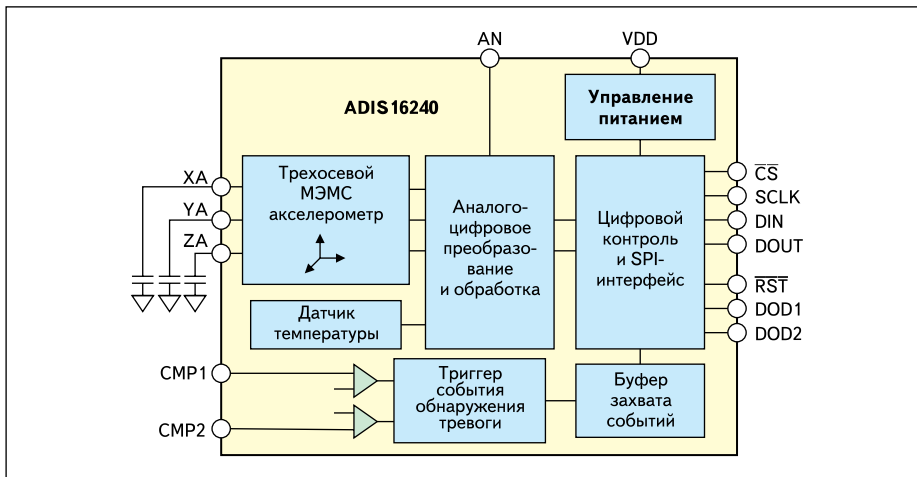


Рис. 1. Встраиваемый детектор удара ADIS16240 Analog Devices — одно из решений более высокого уровня интеграции МЭМС-акселерометров в промышленные системы

Данный рынок уже достаточно насыщен новыми предложениями автономных компонентов. И можно предвидеть, что его дальнейшая эволюция состоит в повышении уровня интеграции функциональных признаков, включая интеграцию с другими типами датчиков, и все это также на фоне снижения размеров, энергопотребления и цены устройств.

Многие производители МЭМС сейчас стремятся допустить применение своих МЭМС-датчиков инерции в новых, более комплексных системах, что проявляется в добавлении новых функций и возможностей.

Для многих из компаний, производителей МЭМС, следующий шаг состоит в системной интеграции МЭМС на еще более высоком уровне или в привязке и оптимизации функций, ранее выполняемых блоками управления, непосредственно к измерительной части, а также использовании новых материалов и наноразмерных устройств.

Очевидно увеличение доли предложений кластерных и мультисенсорных инерциальных систем, включая IMU, над автономными компонентами.

IMU, которые являются основными измерительными блоками систем INS и AHRS, являются самым известным примером системной и функциональной интеграции датчиков инерции. В настоящее время МЭМС IMU выходят на high-end сегменты, охватывают также рынки с жесткими и особыми условиями эксплуатации.

Понятие IMU на массовые рынки пришло с high-end сегментов. В производстве high-end блоков инерциальных измерений долгое время доминировали технологии волоконно-оптических (FOG) или кольцевых лазерных (RLG) гироскопов, а применение МЭМС было ограничено требованиями высоких рабочих характеристик и надежности. Но сейчас ситуация изменилась: достижения в рабочих характеристиках дали толчок для экспансии МЭМС-технологий на high-end рынки.

Новые применения для МЭМС IMU и сенсорных кластеров возникают не только на рынке устройств с высокими рабочими характеристиками, они востребованы на рынках потребительских устройств, где требования к характеристикам значительно ниже. Навигация, стабилизация платформ, автоматизированное управление транспортом представляют собой следующие востребованные применения IMU. Возникает потребность в сенсорных кластерах с 4 или 5 степенями свободы, например, в игровых или портативных устройствах или медицинских приборах/инструментах.

Обо всем этом — далее в статье.

Акселерометры. Новые промышленные системы и устройства с высокими рабочими характеристиками

Функциональная интеграция промышленных акселерометров

Новые предложения акселерометров являются свидетельством того, что уровень технологий развит настолько, что допускает их более широкое, чем только в потребительской электронике, применение — там, где ранее оно не было возможным или не предполагалось, а уровень функциональной интеграции позволяет классифицировать данные устройства даже не как датчики, а как системы.

Так, компания Analog Devices, которая долгое время фокусировала свои возможности на разработке акселерометров для подушек безопасности, в 2009 году использовала свои достижения в измерении высоких ускорений, добавив к своей линейке МЭМС-датчиков iSensor другие сенсорные продукты, созданные специально для осуществления различных функций в промышленных системах детектирования удара и вибрации.

Датчики инерции для данных применений основаны на акселерометрах.

Одно из устройств — ADIS16240 (рис. 1) — получило название от производителя мало-мощного программируемого датчика и рекордера удара. Поскольку промышленные применения требуют высокого уровня интеграции, созданное устройство, рассчитанное на встраивание, комбинирует акселерометр и сложную схему захвата и обработки сигнала в мультикристалльном корпусе.

Детектор удара характеризуется возможностью трехосевого детектирования в диапазоне $\pm 19g$, включает АЦП вместе с записывающим средством, которое сохраняет не только событие превышения порога, но и законченный профиль механических переходных процессов, которые можно загрузить для детального анализа. Интегральный буфер удерживает как данные, предшествующие событию, так и происшедшие после него, а также временные диаграммы, температуру и напряжение.

Устройство характеризуется SPI-интерфейсом, через который возможно осуществлять его программирование. SPI-интерфейс обеспечивает доступ к сенсорным данным и настройку конфигурационных регистров, которые контролируют рабочие параметры: коррекцию дрейфа смещения, скорость дискретизации, спящий режим, обнаружение пиков и захват событий.

Программируемый рекордер событий допускает два триггерных режима. Так называемый внутренний режим (internal mode) непрерывно выполняет мониторинг данных выборки и переключает захват, основываясь на определенном пользователем пороге. Внешний режим (external mode) использует два компараторных входа и порог, определенный пользователем для переключения захватов. Эта функция обеспечивает также управление пользовательскими конфигурациями для определения длины захвата, данных, предшествующих событию переключения, и запаса данных. Каждое событие запасается с информационным колонтитулом, который захватывает данные о температуре, мощности и времени. Различные признаки управления мощностью, включая спящий режим и функцию пробуждения, допускают оптимизацию мощности в условиях специфических механических системных требований.

Потребление тока ADIS16240 — менее 1 мА в режиме выборки и 100 мкА в спящем режиме, полезная частотная полоса составляет 1,6 кГц (X, Y) и 550 Гц по оси Z. Устойчивость к ударам — выше 4000g. Датчик поставляется в корпусе 12×12 мм BGA, его цена — \$26,58 в количестве свыше 1000 шт.

Таким образом, данное устройство представляет собой даже не датчик, а систему захвата событий ударов, предназначенную для комплексной динамической оценки и оптимизации динамических характеристик системы.

Analog также ввела в 2009 году ADIS16220 — цифровой датчик вибрации, разработанный, как и ADIS16240, для использования в систе-

мах мониторинга промышленных условий. Посредством данного устройства можно детектировать сбой в механической системе, отслеживая изменение, например, спектрального содержания или амплитуды вибрационной сигнатуры. Устройство основано на high-g акселерометре с динамическим диапазоном $\pm 70g$, резонансная частота составляет 22 кГц. Датчик имеет цифровой SPI-интерфейс и захватывает 1024 сэмпла по каждому из 3 входов, на скорости дискретизации 100,2 kSPS (kilosamples per second, килосэмпл/с). Программируемые признаки включают выборку и удержание пика, триггерный источник/режим инициации, пороговые уровни, внутреннюю фильтрацию и управление мощностью. Можно также конфигурировать захват данных для инициации пользователем, таймером, событием. Цена устройства составляет \$53 в количестве свыше 1000 шт. LGA-корпус имеет размеры 9,2×9,2×3,9 мм. Рабочая температура — $-40...+125$ °C. Все это допускает эффективное использование ADIS16220 в промышленных применениях, включая контроль безопасности, встроенный мониторинг вибрации и условий.

Дальнейшее направление деятельности ADI — повышение уровня функциональной интеграции, добавление средств ЦОС. Но рассмотрение продукции Analog Devices на этом не закончено, в обширной линейке датчиков инерции компании представлены также гироскопы, IMU, в том числе модули, скомбинированные с магнитометрами.

Но до них дойдет очередь после рассмотрения еще многих примеров новых акселерометров и гироскопов как автономных компонентов системного уровня с высокими рабочими характеристиками и IMU.

Повышение рабочих характеристик акселерометров

На рынке high-end МЭМС-акселерометров позиционированы, например, компании Tronics, Colibrys, Atlantic Inertial Systems, Gladiator Technologies и другие.

Примером дальнейшей работы в данном направлении является новый акселерометр Colibrys RS9003.A (рис. 2), который отличается высокой стабильностью порядка мкг



Рис. 2. МЭМС-акселерометр Colibrys RS9003.A с высокой стабильностью смещения — новый инклинометр для буровых применений и геофизических исследований

в полном диапазоне $\pm 3g$. Сейчас он уже доступен для заказа.

RS9003 представляет собой датчик, сконструированный для измерений наклона, буровых измерений (Measurement Whilst Drilling, MWD), при геофизических исследованиях в скважинах. Все эти применения характеризуются необходимостью обеспечивать прецизионные измерения в жестких условиях, критичных к безопасности. Следующее применение, для которого рекомендован этот датчик, — стабилизация больших платформ, где располагаются радары, антенны, наблюдательные камеры и т. д.

Датчик имеет стабильность смещения лучше, чем 600 мкг, и стабильность чувствительности менее, чем 500 ppm. Данный уровень характеристик прежде не был достижим для кремниевых МЭМС. Но сейчас высокий уровень исполнения можно получить и с кремниевой технологией. Чувствительный элемент МЭМС-акселерометра с целью повышения характеристик реализован на основе технологии IRIS, обладающей достаточной надежностью и теми ключевыми преимуществами МЭМС, о которых уже много говорилось [2]: размер, вес, цена, энергопотребление.

Речь идет о реальном замещении электро-механических датчиков типа Honeywell QFlex в военном, аэрокосмическом и промышленном рынках, для которых RS9003 предназначен как один из встраиваемых компонентов.

Интерфейс RS9003 осуществляется с электроникой, работающей в замкнутом цикле. Датчик предлагается в стандартном керамическом корпусе LCC размерами 20,8,9×8,9 мм. Малый фут-принт этого датчика является для системных дизайнеров возможностью реализовать высокоточные характеристики в минимальном системном пространстве.

В 2010 году Colibrys анонсировала новый МЭМС-акселерометр для Attitude Heading and Reference Systems (AHRS). MS9005 представляет собой МЭМС-акселерометр, рассчитанный на измерение диапазона $\pm 5g$ и предназначенный дополнить существующее семейство датчиков диапазонов $\pm 2g$ и $\pm 10g$, рассчитанных также на AHRS-применения: Colibrys MS9002, MS9010, RS9010.

MS9005 предлагает оптимальный уровень характеристик в применениях, которые работают в окружении со средним уровнем вибрации и удара, но там, где важны высокая стабильность смещения и чувствительности вместе со сниженной ошибкой от вибрационного воздействия в виде сдвига смещения (Vibration Rectification Error). AHRS, интегрирующие акселерометры Colibrys, применяются в самолетах, вертолетах, беспилотных воздушных транспортных средствах UAV, в резервных системах на больших самолетах и малых реактивных самолетах.

Sherborne Sensors производит широкую линейку высокоточных инерциальных акселерометров для измерения линейных ускорений и замедлений. Уровень точности



Рис. 3. Первый МЭМС-акселерометр Sherborne Sensors с высокими рабочими характеристиками Schaevitz A700 для high-end рынков

и надежности акселерометров Sherborne высок, и они применяются в аэрокосмических, авиационных, военных, промышленных сегментах рынка.

В группу прецизионных акселерометров, отличающихся особо высокой точностью, входят A700 (рис. 3) — первые со столь высокими рабочими характеристиками МЭМС-акселерометры, с которыми компания Sherborne дебютировала в марте 2010 года.

Это одно- и двухосевые аналоговые емкостные датчики, рассчитанные на измерения диапазонов от $\pm 0,5g$ до $\pm 5g$, которые после прохождения сигнала через схему коррекции ошибок достигают заявленной точности лучше, чем $\pm 1mg$. С каждой единицей поставляются выражения для коррекции ошибок, которые помогают минимизировать измерительные неточности вследствие смещения нуля, погрешностей линейности, теплового дрейфа смещения и чувствительности. Коэффициенты выражений вводятся в хост ПО, за счет чего и может быть достигнута измерительная точность A700 в $\pm 1mg$.

A700 — это МЭМС-датчик, который включает воздушное демпфирование, допускающее значительную независимость от рабочей температуры. Датчики скомпенсированы для минимизации температурных дрейфов чувствительности и смещения. Акселерометры также включают механические остановы для минимизации влияния эффектов превышения воздействий ускорения, заключены в прочный алюминиевый корпус весом менее 50 г, имеют встроенные признаки самотестирования.

Устройства работают от нерегулируемого источника питания, поставляются с интегрированным экранированным сенсорным кабелем, опционально могут включать электрический соединитель и встроенный датчик температуры, использование которого дает возможность индивидуализации характеристики каждого датчика, основываясь на текущих данных о рабочей температуре. Все акселерометры A700 протестированы и калиброваны на 100%.

Повышение рабочих характеристик акселерометров проявляется не только на high-end рынках, но и, например, в автомобильных применениях.



Рис. 4. Endevco 7290E Microtron — новый высокоточный МЭМС-акселерометр с интегрированной цифровой температурной компенсацией

Endevco — компания, которая в настоящее время вместе с Ferroperm, Vibro-Meter, Sensorex и Wilcoxon Research входит в подразделение Meggitt Sensing Systems, выпустила новое семейство акселерометров Model 7290E Microtron на основе емкостной технологии микродатчиков.

Endevco 7290E (рис. 4) представляет собой датчик с интегрированной температурной компенсацией, сконструированный для высокоточного измерения низкочастотных событий, с характеристиками нулевого смещения и чувствительности, объявленными лучшими в классе.

Акселерометры 7290E разработаны для измерений низких уровней ускорений в аэрокосмическом и автомобильном окружении — ударных или вибрационных.

Представленные в 7 различных моделях, в зависимости от измерительного диапазона, ранжированного от 2g до 150g, акселерометры включают емкостной чувствительный элемент, изготовленный по так называемой технологии кремниевых микродатчиков, основанной на анизотропном травлении. Технология изготовления включает применение газового демпфирования, которое дает малую температурную зависимость частотного срабатывания, и внутренних остановов превышения диапазона для противостояния высоким ударным воздействиям и ускорительным нагрузкам.

Электроника со схемой цифровой температурной компенсации обеспечивает прецизионную температурную компенсацию в широком температурном диапазоне.

Диапазон возбуждающих напряжений, опций выхода, длины кабеля предлагает клиенту большие возможности для выбора.

Есть две опции питания, первая из которых (R) допускает работу в диапазоне от 9,5 до 18 В, вторая опция (U) — работу от напряжений питания 12,5–36 В. 7290E обеспечивает и дифференциальный выход в диапазоне ± 2 В, и выход с одним концом (single-end) на 0,5–4,5 В со смещающим напряжением 2,5 В.

Типичная нелинейность и гистерезис датчика 7290E составляет +0,2% FSO (от полного диапазона) для большинства диапазонов. Смещение нуля — до 0,1% FSO на 5000g.

Допускаются удары до 5000g, воздействие статического ускорения до 20 000g, вибрации до 100g (20–2000 Гц). Рабочая температура — $-55 \dots +121$ °С. Вместе с широким частотным срабатыванием и высокой устойчивостью к ударным воздействиям все это дает возможность допустить высокий уровень измерительной точности и пятилетнюю гарантию на устройство.

7290E рекомендуется для применений в самолетах, при тестировании флаттеров, автомобильных исследованиях движения на грубых дорогах, тестирования систем подвесок железнодорожного транспорта, контроля наклона поездов, центробежных сил ускорения и нагрузки при запуске, краткосрочной навигации.

В конце 2009 года компания MEMSIC Inc., известная своей тепловой технологией акселерометров, выпустила новый двухосевой датчик ускорения для автомобильных применений в системах динамической стабилизации (ESC/VSC) и других системах безопасности (измерения крена (roll over), EPB).

Тепловые акселерометры MXP7205VF и MXP7205VW — это новое системное решение MemSic для автомобильных систем ESC и др. Датчики являются высокоточными устройствами, рассчитанными на измерения диапазонов ± 5 g по осям XY и XZ, достигающими при этом стабильности смещения порядка ± 30 mg в рабочем температурном диапазоне $-40 \dots +105$ °С.

Новые датчики отличаются также возможностью осуществления интерфейса SPI — помимо интерфейсов аналогового и ШИМ других устройств автомобильной линейки. Успешность акселерометров MemSic в автомобильных применениях производители объясняют устойчивостью к высокочастотной вибрации, достигнутой на уровне технологии. В тепловой технологии MemSic для измерения ускорения используются нагретые газовые шарики, вследствие чего акселерометры MemSic не имеют вообще каких-либо подвижных механических частей и, следовательно, механического резонанса и резонансных частот. Данный метод также обеспечивает экстремальную устойчивость к ударам порядка 50 000g и очень низкий уровень сбоя в ppm.

В начале 2010 года MemSic заявила о приобретении компании Crossbow Technology, Inc — с целью расширения возможностей сенсорной интеграции и создания решений за пределами отдельных компонентов: для охвата аэрокосмических и промышленных high-end рынков.

От автономных гироскопов к гироскопам и IMU

Гироскопы как автономные компоненты значительно востребованы на потребительском рынке, где в настоящее время весьма ярко проявлена конкуренция между ST Microelectronics и InvenSense.

Компания ST — лидирующий поставщик МЭМС-компонентов для потребительских и портативных применений. Не так давно, в 2009 году, она ввела новое семейство одно- и мультиосевых МЭМС-гироскопов. Применения ST-гироскопов — детектирование углового движения при осуществлении человеко-машинного интерфейса, в персональной и автомобильной системах навигации, для стабилизации изображений цифровых камер.

Семейство гироскопов ST включает датчики в одноосевом исполнении (yaw) или двухосевом (pitch-and-roll, pitch-and-yaw) — всего 15 гироскопов, рассчитанных на покрытие измерительного диапазона в пределах от 30 до 6000 dps (°/с) (рис. 5а). Примерами являются LPR503AL — двухосевой pitch-and-roll гироскоп, рассчитанный на измерения угловых скоростей 30 и 120 dps, или LPR550AL — двухосевой pitch-and-yaw гироскоп с полными измерительными диапазонами 500 и 2000 dps.

Датчики могут обеспечивать два отдельных выхода для каждой оси одновременно — неусиленный выход, служащий для обнаружения углового движения, и выход, характеризующийся четырехкратным усилением для высокоразрешающих измерений. Это повышает гибкость дизайна и пользовательской практики.

Гироскопы ST отличаются высокой стабильностью в широком диапазоне температуры и времени, с вариациями ниже 0,05 dps/°C для уровня нулевой скорости. Точность измерения гарантируется с уровнем шумов в 0,014 dps/Гц на 30 dps полной шкалы.

Напряжение питания — 2,7–3,6 В. LGA-корпус имеет размеры 5×5×1,5 мм.

В конце 2009 года ST ввела также аналоговый гироскоп LYPR540AH3 (рис. 5б) с высокими рабочими характеристиками, рассчитанный на измерения угловых скоростей в диапазоне 360° вдоль трех ортогональных осей и представляющий собой первое трехосевое устройство в одном корпусе из числа представленных на рынке.

Гироскоп отличается высокой точностью и стабильностью, малыми размерами корпуса (4,4×7,5×1,1 мм). Его основное назначение — осуществление пользовательских интерфейсов, 3D обнаружение жестов и движения в мобильных телефонах, игровых контроллерах, системах персональной навигации и других портативных устройствах. В комбинации с трехосевым акселерометром устройство может применяться в составе IMU.

Для каждой из трех осей обеспечивает одновременно два независимых выхода: высокоточный выход для детектирования медленного движения в полном диапазоне до 400 dps и выход для измерений диапазона угловых скоростей до 1600 dps, соответствующих измерению быстрых действий и движений. Все это направлено на создание новых стандартов де-факто в отношении



Рис. 5. Гироскопы ST Microelectronics с высокими рабочими характеристиками, разработанные для массовых рынков:
 а) семейство из 15 одно- и двухосевых (yaw, pitch-and-roll, pitch-and-yaw) недорогих гироскопов для полного покрытия типичных измерительных задач в диапазоне от 30 до 6000°/с;
 б) LYPR540AH3 — первый трехосевой гироскоп в одном корпусе;
 в) трехосевой гироскоп L3G4200DH с высокими рабочими характеристиками и встроенным блоком памяти с FIFO;
 г) пример стекированного исполнения гироскопов STMicro (стекированы МЭМС и ASIC-кристаллы)

точности и стабильности в рабочем температурном диапазоне (-40... +85 °С) и во времени, упрощении интеграции и на программном, и на аппаратном уровне.

ST — компания, которая продала уже более 600 млн акселерометров на рынок, и в 2003 году именно ST представила первый трехосевой аналоговый акселерометр.

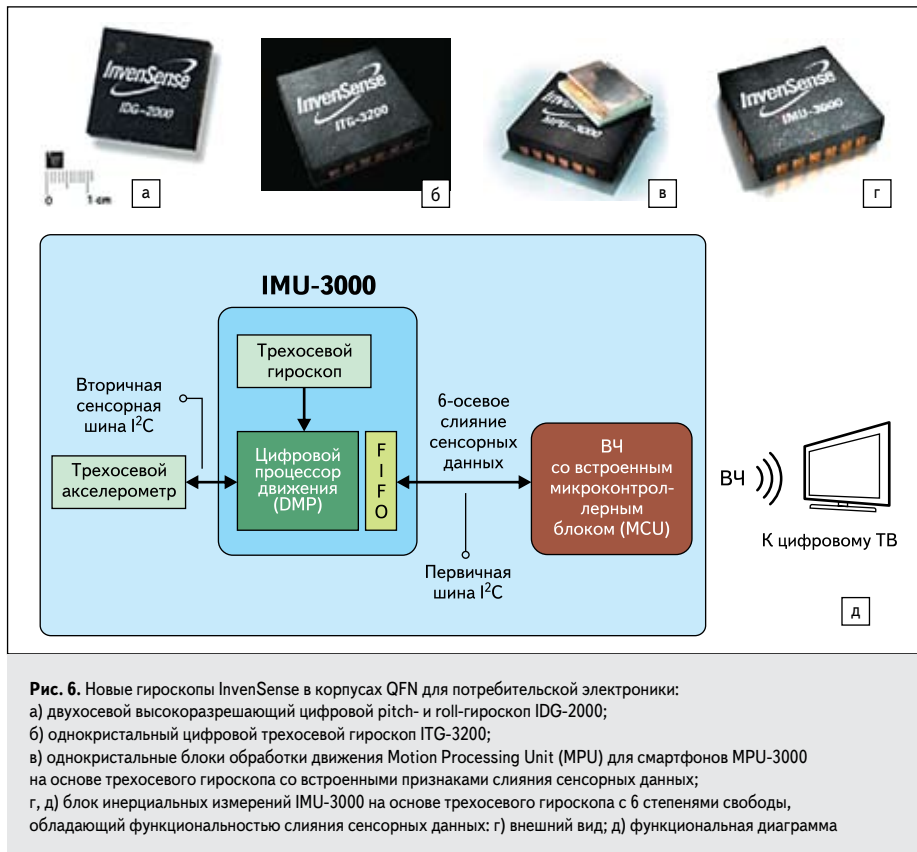


Рис. 6. Новые гироскопы InvenSense в корпусах QFN для потребительской электроники:
 а) двухосевой высокоразрешающий цифровой pitch- и roll-гироскоп IDG-2000;
 б) однокристалльный цифровой трехосевой гироскоп ITG-3200;
 в) однокристалльные блоки обработки движения Motion Processing Unit (MPU) для смартфонов MPU-3000 на основе трехосевого гироскопа со встроенными признаками слияния сенсорных данных;
 г, д) блок инерциальных измерений IMU-3000 на основе трехосевого гироскопа с 6 степенями свободы, обладающий функциональностью слияния сенсорных данных: г) внешний вид; д) функциональная диаграмма

3-осевые датчики ускорения ST сейчас стоят менее 70 центов, что создает серьезные проблемы для конкурентов. (Потенциальная конкуренция с ST, очевидно, — одна из основных причин приобретения Rohm Kionix).

Первый трехосевой гироскоп ST продавался по цене \$3,6 в объемах выше 10 000 шт., но для гироскопов данная цена также является достаточно низкой — ввиду их сложности в сравнении с акселерометрами.

Совсем недавно ST расширила свое портфолио датчиков движения. Новый трехосевой гироскоп L3G4200DH (рис. 5в) с высокими рабочими характеристиками отличается встроенным блоком памяти с признаком FIFO (first-in first-out) для интеллектуального управления питанием. Цена устройства в массовых объемах — \$2,9. Размеры корпуса составляют 4×4×1 мм.

Все гироскопы STMicro отличаются стекированным исполнением устройств (рис. 5г). Детальную информацию о принципах работы и устройстве гироскопов ST, а также другую связанную с этим информацию можно получить посредством презентации, представленной на сайте компании [5].

Конкуренты, не имеющие возможностей для снижения цены за счет массовых объемов, должны производить устройства с преимущественными признаками. Можно одновременно делать шаги и в том, и в другом направлении, как, например, работает компания InvenSense.

InvenSense за последние несколько месяцев представила сразу несколько актуальных

моделей гироскопов, отличающихся малыми размерами корпусов, высокой функциональностью и низкой ценой.

Так, например, в 2009 году InvenSense выпустила двухосевой pitch- и roll-гироскоп InvenSense IDG-2000 в корпусе QFN с размерами 4×4×0,9 мм (рис. 6а). Устройство предназначено для улучшения оптической стабилизации изображений в цифровых камерах и камерах сотовых телефонов с более чем 8-мегапиксельным разрешением. IDG-2000 представлен производителем как первый цифровой двухосевой гироскоп, интегрирующий 16-битный АЦП, что допускает цифровые интерфейсы I²C и SPI. Одновременно, в связи с его размерами, это устройство можно отнести к числу самых тонких датчиков с самым малым фут-принтом, представленных на рынке для аналогичных применений.

Устройства выпускаются на основе платформы Nasiri, согласно которой интегрирование MEMS и ASIC производится с использованием соединения на уровне пластин, что и позволило достичь малых размеров корпуса. При этом обеспечиваются высокие рабочие характеристики, малый шум, конкурентоспособная, в сравнении с ST, цена. В настоящем производстве построено на 8-дюймовой инфраструктуре (тогда как первые гироскопы выпускались на основе 6-дюймовых пластин), что допускает недорогое производство.

IDG-2000 характеризуется сниженной фазовой задержкой с более высокой частотной полосой программируемого цифрового ФНЧ с интегрированными сигма-дельта АЦП,

встроенным автоматическим контролем усиления, оптимизированными антиступенчатыми фильтрами, поперечной чувствительностью менее чем $\pm 1\%$. Интегрированный датчик температуры предназначен, в частности, для регулировки смещения.

Устройство IDG-2000 измеряет джиттер (дрожание) руки в частотном диапазоне от 0,1 до 20 Гц. Измерительный шум оценивается в $0,033^\circ/\text{c-rms}$. Рабочая частота в 30 кГц позволяет устройству быть устойчивым к окружающим шумам, к которым камера чувствительна, например, в условиях низкой освещенности, что более актуально для высокоразрешающих датчиков, и при активации функции зуммирования с любым разрешением.

Потребление мощности снижено на 50% в сравнении с аналоговыми гироскопами с низким максимальным током в активном режиме (4 мА на 2,1 В) и максимальным током в 5 мкА в спящем режиме.

В 2009 году InvenSense представила первый однокристалльный цифровой трехосевой гироскоп ITG-3200 по цене менее \$3 (рис. 6б). Его основное назначение — игры и 3D дистанционное телевизионное управление. Все три оси вращения (pitch, roll, yaw) детектируются устройством, размещенным на одном кремниевом чипе. Заявленное снижение потребления мощности составляет 50%, размер корпуса снижен на 67% ($4 \times 4 \times 0,9$ мм QFN) по сравнению с конкурирующими мульткристалльными решениями. Цена ITG-3200 в массовых объемах — менее \$3.

Технология производства усовершенствована, что включает меньшие CMOS-узлы и большее число кристаллов на пластине.

Трехосевая интеграция в ITG-3200 минимизирует поперечную интерференцию и смещение нуля (сигнала на нулевой скорости). Это достигается за счет того, что МЭМС гиросtructures являются независимыми, но размещены на общей подложке для повышения характеристик. Они интегрируют три высокоразрешающих 16-битных АЦП, допускающих быструю и точную оценку движений в пределах одного устройства без многих внешних компонентов для обработки сигнала и других дискретных компонентов. ITG-3200 интегрирует ФНЧ, датчик температуры, элементы последовательного интерфейса Fast Mode I²C. Характеристические признаки включают полный диапазон до $2000^\circ/\text{c}$, малый шум до $0,03^\circ/\text{c}/\sqrt{\text{Гц}}$, устойчивость к ударам до 10000g.

На основе данных гироскопов InvenSense уже в 2010 году представила блоки обработки движения Motion Processing Unit (MPU) для смартфонов. MPU-3000 (рис. 6в) представляет собой однокристалльные устройства, которые объединяют цифровые трехосевые гироскопы и встроенные признаки слияния сенсорных данных в так называемом цифровом процессоре движения Digital Motion Processor (DMP) или встроенной аппарат-

ной ускорительной машине Embedded HW Acceleration Engine.

Процессоры разрабатывались для LBS-услуг, 3D игровых консолей, стабилизации изображений, обнаружения жестов. Смартфоны как устройства, осуществляющие множество функций, используют мало-мощный гироскоп для обеспечения широкой частотной полосы в играх, основанных на движении. Для помощи в навигации гироскоп должен обладать высокой чувствительностью, быть малозумящим, обеспечивать стабилизацию изображений камер, контролировать пользовательский интерфейс, включающий обнаружение жестов. MPU-3000 дает возможность измерений в диапазоне $250\text{--}2000^\circ/\text{c}$, включает встроенный 16-битный АЦП, программируемые цифровые фильтры. Фабричная калибровка чувствительности — до 1%. Габариты устройства — $4 \times 4 \times 0,9$ мм, интерфейс — I²C или SPI.

DMP вместе со встроенным признаком FIFO разгружает алгоритмы обработки высокочастотного движения в хост-процессоре, что предназначено для общего улучшения системных характеристик портативного устройства. MPU-3000 также включает вторичный I²C-интерфейс для связи DMP с внешним акселерометром, что позволяет выполнять слияние сенсорных данных гироскопа и акселерометра в направлении 6 степеней свободы и вычислять кватернионы. Другие признаки MPU-3000 включают внутреннюю генерацию тактирования, датчик температуры, программируемые датчики прерывания, вывод FSYNC для синхронизации изображений, видео, данных GPS.

Шум до $0,03^\circ/\text{c}/\sqrt{\text{Гц}}$, низкое энергопотребление (13 мВт) и малый размер корпуса являются общими признаками платформы Navi^gi. Технологический прорыв в обеспечении уникальной системной функциональности MPU-3000 для смартфонов поддержан низкой ценой — до \$4 в зависимости от объемов.

MPU-3000 представляет собой первое решение на основе технологии MotionProcessing, которая далее была обобщена до создания следующего поколения технологии, объединяющей, в частности, уже имеющиеся решения AirSign, MotionCommand, TouchAnywhere.

InvenSense обеспечивает встроенную программную платформу, основанную на библиотеке Motion Processing Library (MPL) с API-интерфейсами. К примеру, отрисовка в воздухе символа “P” активирует библиотеку фото (MotionCommand). Касание обратной стороны телефона приводит к доступности функции скроллинга фото посредством простого нажатия влево или вправо. Когда телефон звонит в кармане, несколько стуков могут заглушить звонок (TouchAnywhere). Вместо введения кода для разблокировки телефона для безопасной аутентификации может использоваться уникальная воздушная сигнатура (AirSign).

Все эти новые технологии скоро будут доступны пользователям сотовых телефонов, включающих MPU-3000.

Совсем недавно InvenSense представила на потребительский рынок IMU-3000 (рис. 6г, д) — блок инерциальных измерений с 6 степенями свободы и функциональностью слияния сенсорных данных.

IMU-3000 включает встроенный цифровой 3-осевой гироскоп и DMP-процессор со вторичным портом I²C для подключения акселерометра, что предназначено для вывода законченного 6-осевого выхода со слиянием сенсорных данных на первичный порт I²C. В клиентском приложении данные о линейном и угловом движении будут объединены в один поток данных. Устройство рекомендуется для игровых контроллеров, дистанционного управления телевизоров, спортивных, медицинских и других систем, где IMU-3000 предназначен разгрузить хост-процессор от интенсивных вычислений, связанных с обработкой движения, снизить частоту опроса выхода каждого датчика и допустить использование менее мощных и недорогих микроконтроллеров.

Трехосевой гироскоп IMU-3000 рассчитан на программируемые диапазоны ± 250 , ± 500 , ± 1000 и $\pm 2000^\circ/\text{c}$ — для детектирования и быстрого, и медленного движения. Шумовые характеристики улучшены — до $0,02^\circ/\text{c}/\sqrt{\text{Гц}}$, чувствительность калибрована до 1%. Встроенные признаки включают FIFO, 16-битный АЦП, программируемые цифровые фильтры, датчик температуры, программируемые прерывания, встроенное тактирование и т. д. Устройство заключено в корпус QFN с размерами $4 \times 4 \times 0,9$ мм, его рабочая температура — $-40 \dots +85^\circ\text{C}$, потребление мощности — 13 мВт при рабочем напряжении 2,1–3,6 В, доступные интерфейсы — I²C и SPI, выходное напряжение — 1,7–3,6 В.

МЭМС-технология допустила большое число применений на потребительском и автомобильном рынках — за счет обеспечения решений, эффективных в стоимостном отношении.

Очевидно, что и для гироскопов прослеживаются те же самые общие тенденции, что и для акселерометров. Автономные компоненты для массовых и маргинальных рынков отличаются более высоким системным уровнем функциональности, возможностями со-интеграции, более высоким уровнем рабочих характеристик, меньшими размерами. Здесь позиционированы, например, компании Panasonic, Epson Toyocom, Analog Devices, Bosch, VTI и др.

VTI Technologies (VTI) сейчас запускает новое семейство комбинированных гироскопов для промышленных применений с высокими рабочими характеристиками. В 2010 году запланирован также выпуск автономных гироскопов.

Комби-устройство включает дизайн 3-осевого акселерометра с близким к тактическому исполнению одноосевым гирос-



Рис. 7. Новые high-end гироскопы Sensorog для жестких условий, требующих высокой стабильности смещения и малого углового измерительного шума: а, б) гиродатчики SAR100 (а) и SAR150 (б) в герметичном корпусе LCC; в) SIMU202 — мультиосевой гиросмодуль с высокими рабочими характеристиками для применения в аэрокосмической и военной области

скопом в одном общем корпусе. Целевые применения включают IMU, стабилизацию и контроль платформ, анализ и контроль движения, системы управления и навигационные системы.

Новое продуктивное семейство основывается на собственной технологии производства VTI 3D MEMS, которая позволяет VTI производить прочные, стабильные и малошумящие датчики.

Первые представители семейства — датчики SCC1300-D02 ($\pm 100^\circ/\text{с}$ и $\pm 2\text{г}$ по 3 осям) и SCC1300-D04 ($\pm 300^\circ/\text{с}$ и $\pm 6\text{г}$ по 3 осям).

Датчики угловой скорости характеризуются устойчивостью к ударам и вибрациям, являются температурно-компенсированными в диапазоне $-40 \dots +125^\circ\text{C}$. Стабильность смещения гироскопов — лучше $1^\circ/\text{ч}$, точность смещения в полном температурном диапазоне $\leq \pm 0,6^\circ/\text{с}$.

Комбоверсии включают отдельные SPI-интерфейсы (один для гироскопа, другой для акселерометра).

Размеры корпуса с проводным фреймом — $18,65 \times 8,5 \times 4,53$ мм.

Технология МЭМС-гироскопов выходит и на рынки high-end применений, допуская массовое замещение более дорогих технологий.

Компания Silicon Sensing Systems (SSS), дочерняя компания Atlantic Inertial Sensors (AIS), за последнее время значительно улучшила характеристики своих кремниевых МЭМС-гироскопов. Улучшение SSS характеризует как трехкратное — до $3^\circ/\text{ч}$ стабильности смещения с угловым случайным шумом до $0,1^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ в CRS09. Для достижения улучшения были изменены форма и толщина кольца, металлические слои в верхней части — чтобы получить большое улучшение в шумах и характеристиках смещения в температурном диапазоне. В устройствах использована электроника с замкнутым циклом.

Выход МЭМС-технологии с автомобильного рынка на high-end сегменты является одной из основных стратегий компании Sensorog, которая планирует выпустить широкую линейку новых МЭМС-продуктов, основанных на существующей технологии, но для high-end применений: гироскопов, гиросенсорных кластеров, датчиков давления.

Компания Sensorog Technologies в 2009 году запустила МЭМС-гиродатчик SAR100 (рис. 7а), допускающий применение в жестких условиях, требующих высокой стабильности смещения. SAR100 разрабатывался с расчетом на растущие применения в авиационных, военных, энергетических, контрольно-измерительных и промышленных системах.

SAR100 представляет собой гиродатчик в герметичном корпусе LCC, который может противостоять ударам до 5000г без деградации характеристик. SAR100 предлагается в двух диапазонах — 100 и $250^\circ/\text{с}$ (опционально — $2000^\circ/\text{с}$), стабильность смещения — $0,02^\circ/\text{с}$ (порядка $70^\circ/\text{ч}$). SAR100 взаимодействует с электроникой в замкнутом цикле, выходной сигнал — цифровой SPI, включен механизм самотестирования.

SAR150 — новый, еще более прецизионный цифровой датчик, представленный уже в этом году. На фоне общих с SAR100 характеристик он отличается высокой стабильностью смещения лучше чем в $50^\circ/\text{ч}$.

В 2010 году Sensorog выпускает SIMU202 (рис. 7в) — мультиосевой гиросмодуль с еще более высокими рабочими характеристиками, допускающими его применение в аэрокосмической и военной области и замещение традиционных FOG, RLG, AHRS или механических гироскопов.

SIMU202 детектирует входной диапазон $\pm 400^\circ/\text{с}$ со стабильностью смещения лучше $2^\circ/\text{ч}$ (порядка $0,5^\circ/\text{ч}$) и угловым случайным шумом $0,2^\circ/\sqrt{\text{ч}}$. Выходной сигнал — 24-битный цифровой, калиброванный в полном температурном диапазоне.

SIMU202 представляет собой кластер с ультравысокоточными гироскопами в количестве 1, 2 или 3, объединенными в корпусе с интерфейсом RS422. Кластерные функции поддерживаются 32-битным микроконтроллером, допускающим выбор выходной единицы, частоту сэмпинга, частоту среза ФНЧ, параметры RS422. Обеспечивается любая комбинация осей и многие другие признаки, например непрерывная самодиагностика.

SIMU202 предназначен для замещения FOG и RLG в следующих применениях: ракетное управление, AHRS, стабилизация платформ, буровые исследования.

Для улучшения точности своих гироскопов компания Sensorog пытается принять в расчет все, что касается влияния на функциональность выпускаемых ею устройств. Компания стремится производить стандартные модульные продукты, которые комбинируются между собой, что обеспечивает подходящее соотношение размера, характеристик, цены.

Sensorog, Systron Donner Inertial, Atlantic Inertial Systems/Silicon Sensing Systems, Intersense, Gladiator Technologies, Analog Devices — все эти компании достигли за последнее время значительного прогресса в изготовлении более стабильных и точных гироскопов и IMU с меньшим дрейфом и меньшим шумом.

IMU

Что касается МЭМС IMU, то и для них самой ярко выраженной тенденцией настоящего времени является экспансия на high-end сегменты вместе с повышением рабочих характеристик. Достигнутый за счет потребительского сегмента рынка уровень рабочих характеристик допустил выход МЭМС-технологий IMU на high-end сегменты. Блоки IMU и мульти-сенсорные модули распространяются также на других массовых и маргинальных рынках.

По оценкам Yole Development, в 2010 году общий рынок IMU приблизится к $\$2$ млрд.

Индустрия IMU весьма развита: в данном сегменте позиционированы Honeywell, Northrop Grumman, Sagem, Litelf, Kearfott, Thales, Atlantic Inertial Systems, L3Communications, IXSEA, EADS Astrium, KVH, Systron Donner Inertial, Goodrich, iMAR, Crossbow, Gladiator Technologies, Bosch, Panasonic, Murata, InvenSense и другие.

Технологии производства IMU определяются технологиями производства гироскопов:

- полусферические резонансные гироскопы (Hemispheric Resonator Gyro, HRG);
- кольцевые лазерные гироскопы (Ring Laser Gyroscopes, RLG);
- волоконно-оптические (Fiber Optic Gyroscopes, FOG);
- МЭМС-гироскопы (кремниевые и кварцевые);
- механические/динамические настраиваемые гироскопы (Dynamically Tuned Gyroscopes, DTG);
- электростатические гироскопы (ElectroStatic Gyro или Electrostatically Suspended/Supported Gyro, ESG).

На рынке high-end IMU доминируют волоконно-оптические FOG и кольцевые лазерные гироскопы (RLG), отличающиеся высокой надежностью и стабильностью, но большими размерами и ценой. Новые технологии — это HRG и МЭМС, а в особенности кремниевые МЭМС — дают возможность снижения цены и размеров.

Навигационные применения доминируют для сбыта IMU, это относится к любым типам транспортных средств: от самолетов и вертолетов до спутников, кораблей и подводных лодок.

Рынок high-end IMU сформирован рядом сегментов, в которых выделяются авиационные и ракетные/реактивные сегменты — не менее 40% каждый (по оценкам Yole 2007 года).

Но совсем недавно (по данным Yole Development прошлого года) МЭМС-продукты составляли всего лишь 10% от общего рынка IMU с высокими рабочими характеристиками.

По оценкам Yole, МЭМС-устройства составляют примерно 40% от общего количества устройств, проданных в нише ракетно-реактивных применений и военного снаряжения. Применяются они и в системах AHRS. Хотя сейчас ситуация в корне меняется, большинство производителей в области авионики и военной техники все еще стремятся использовать волоконно-оптические и другие проверенные годами технологии. Но сами производители IMU уже понимают и внедряют МЭМС в свои новые линейки продукции как конкурентоспособные альтернативы.

Спрос на МЭМС IMU и гироскопы с высокими рабочими характеристиками поддерживается ростом спроса на средства борьбы для уменьшения боковых столкновений в урбанизированных регионах и управления/защиты снаряжением (munitions guidance). Yole Development прогнозирует, что данный сегмент по потреблению гироскопов и IMU превзойдет навигационные применения и достигнет \$1,3 млрд в 2012 году, в оборонных применениях рынок МЭМС-гироскопов и IMU в 2013 году составит \$250–350 млн, в промышленных — \$80–130 млн.

Некоторое время назад в области гироскопов и IMU для high-end рынков отмечалось лидерство Honeywell, но сейчас значительные шаги сделали компании Systron Donner Inertial и Atlantic Inertial.

Systron Donner разработала новое поколение кварцевых гироскопов для военных применений с заявленной стабильностью смещения в $1^\circ/\text{ч}$ в полном температурном диапазоне: $-55...+85^\circ\text{C}$.

Главный бизнес компании составляют МЭМС IMU для вооруженных сил США и НАТО, беспилотных воздушных транспортных средств (UAV), GPS-навигации и стабилизации платформ. Но уровень исполнения до сих пор не достигал тактического (tactical grade).

SDI500 (рис. 8) — это IMU тактического уровня исполнения, с высокими рабочими характеристиками, рассчитанный на многие военные применения.

С этим датчиком SDI видит возможность замещения FOG-гироскопов МЭМС-аналогами, в частности, в применениях прецизионного управления снаряжением (munitions guidance), где главным требованием является размер, а затем данные спецификаций. Согласно мнениям специалистов компании, МЭМС-устройства имеют превосходные характеристики, меньший на 40% размер, на 10–20% более низкую цену, большой срок хранения.



Рис. 8. SDI500 Systron Donner — кварцевые МЭМС IMU тактического уровня исполнения для военных применений, с высокими рабочими характеристиками

Устройство характеризуется возможностью 20-летнего срока службы без калибровки, множественными форматами выходных данных, выходными интерфейсами SDLC, RS232 и UART. Обращает на себя внимание еще одна характеристика SDI500 — MTBF (Mean Time Between Failure, среднее время между сбоями), которое составляет более чем 25 000 часов.

SDI подчеркивает, что отдала приоритет кварцевой технологии гироскопов, поскольку кварц дает больший уровень сигналов и меньший шум — эти показатели в 5 раз лучше, чем для кремния. По данным SDI, случайный угловой шум (angle random walk) новых IMU составляет всего $0,02^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ — после одного часа стандартной девиации ориентации он будет равен $0,02^\circ$, затем будет возрастать пропорционально квадратному корню времени до $\sqrt{2} \cdot 0,02^\circ$ через два часа и т. д.

Компании Atlantic Inertial Systems (приобретена Goodrich) и Silicon Sensing Systems достигли больших результатов для кремниевых IMU.

Новое поколение IMU AIS/SSS подходит для военных применений.

SiIMU02 (рис. 9а) — прочное герметичное устройство, используемое в снаряжении и рассчитанное на диапазоны детектирования угловой скорости до $\pm 9,000^\circ/\text{с}$ (Roll-ось)/ $\pm 500^\circ/\text{с}$ (P-, Y-оси) и диапазоны линейных ускорений до $\pm 30g$. Оно выпускается с набором опционных цифровых интерфейсов, на основе индуктивной технологии VSG-3.

Устройство характеризуется стабильностью смещения менее $6,5^\circ/\text{ч}$ и случайным угловым шумом $0,5^\circ/\sqrt{\text{ч}}$. SiIMU02 был выпущен одновременно с одноосевым МЭМС-гироскопом SiRRS02 с такими же показателями.

Блок инерциальных измерений SiIMU04 (рис. 9б) представляет собой блок IMU с двухосевым инклинометром, характеризующийся стабильностью смещения менее $8^\circ/\text{ч}$. Случайный угловой шум составляет также $0,5^\circ/\sqrt{\text{ч}}$. В IMU объединены кремниевые акселерометры от AIS, отличающиеся высокими рабочими характеристиками, с датчика-



Рис. 9. Новое поколение кремниевых МЭМС IMU AIS с высокими рабочими характеристиками:
а) SiIMU02 — прочное герметичное устройство для военных применений;
б) SiIMU04 — IMU, дополненный двухосевым инклинометром

ми угловой скорости на основе технологии кремниевого вибрационного резонирующего кольца SiVSG от SSS.

Те же самые гироскопы и IMU предлагаются компанией AIS для автомобильного и промышленного рынков.

В 2009 году компания AIS выпустила кремниевые IMU, известные как MinIM. Они в 4 раза меньше предшественников, размером менее 1 кубического дюйма, и построены на основе емкостной технологии кремниевого вибрационного резонирующего кольца SSS VSG-4.

Gladiator Technologies также стремится улучшить стабильность смещения своих МЭМС IMU до $1\text{--}10^\circ/\text{ч}$, что соответствует FOG нижнего сегмента данного рынка с незамкнутым циклом. За 4,5 года компания снизила значение характеристики своих гироскопов с $45^\circ/\text{ч}$ до $30^\circ/\text{ч}$ в 2008 году. Сейчас доступны также датчики со стабильностью смещения в $10^\circ/\text{ч}$ и случайным угловым шумом до $0,005^\circ/\text{с}\sqrt{\text{Гц}}$ — это характеристики LandMark 30 IMU (рис. 10).

Gladiator Technologies выпустила целую серию новых продуктов LN, включающую, например, LandMark 20 IMU eXT, отличающийся малым шумом для гироскопов ($0,01^\circ/\text{с}\sqrt{\text{Гц}}$), ультрамалым энергопотреблением, малым размером, весом (115 г). А также IMU размером менее 1 кубического дюйма LandMark 21 IMU, MEMS AHRS с GPS (стабильность смещения всех устройств $20^\circ/\text{ч}$). Новый гироскоп G50Z серии LN ха-

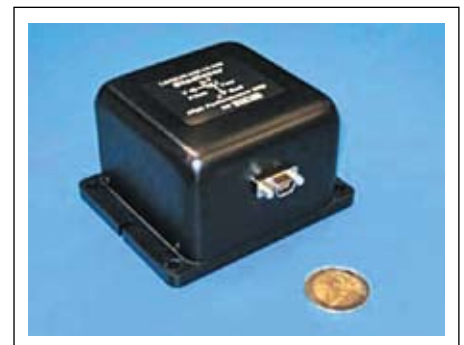


Рис. 10. LandMark 30 IMU — пример достижений МЭМС-технологии IMU Gladiator Technologies в отношении высокой стабильности смещения и углового шума

рактируется шумом до $0,005^\circ/\sqrt{\text{Гц}}$, МТВФ до 81 000 часов.

В отличие от большинства high-end поставщиков, Gladiator представляет собой fabless-компанию, нацеленную на коммерческие, а не на военные применения. Компания поставляет модульные продукты со стандартными протоколами и клиентскими интерфейсами. Цена и размер МЭМС-устройств позволяют применять их широко — от AHRS до аэросъемки или наведения (нацеливания луча) антенн.

Можно отметить, что конкурирующая с МЭМС FOG-технология также развивается, допуская производство меньших по размеру и более дешевых устройств. KVH Industries, к примеру, сообщает о больших продажах ее недорогих FOG в малом корпусе с показателями стабильности смещения в $1^\circ/\text{ч}$ и углового случайного шума в $0,1^\circ/\sqrt{\text{ч}}$.

Но кремниевые МЭМС-технологии имеют перспективы достигнуть стабильности смещения $1^\circ/\text{ч}$, хотя на данном этапе для кремниевой технологии существуют препятствия в виде шумов и джиттера.

Но еще более выигрышными являются достижения МЭМС-технологии в плане миниатюризации и технологичности производства.

Intersense разработала датчик NavChip IMU (рис. 11), представленный компанией как первый IMU на чипе для поверхностного монтажа. NavChip со стабильным смещением гироскопа в $12^\circ/\text{ч}$, угловым случайным шумом до $0,25^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ предназначен для повышения характеристик систем навигации в военных применениях.

Новый чип IMU разрабатывался для малых беспилотных транспортных средств — UAV и роботов для коммерческих и военных систем, его использование позволит уменьшать системы стабилизации камер и антенн и в фиксированных, и в мобильных применениях. В будущем компания Intersense нацелена на AHRS-применения.

МЭМС IMU для массовых и маргинальных (например, промышленного) рынков также требуют повышения характеристик и оптимизации монтажа.

Analog Devices тоже расширяет сферы применения своих недорогих МЭМС IMU. В линейке продукции этой компании сейчас представлены:

- IMU ADIS16300 с четырьмя степенями свободы, включающий трехосевой акселерометр и yaw-гироскоп.

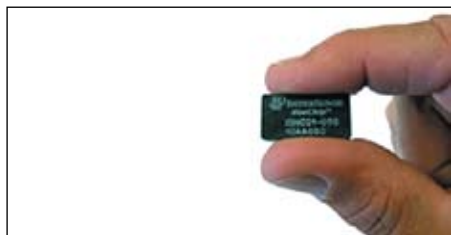


Рис. 11. Первый IMU на чипе для поверхностного монтажа — NavChip Intersense

- IMU с шестью степенями свободы ADIS16354, ADIS16360/2/4/5/7, представляющие собой комбинацию трехосевых акселерометра и гироскопа.

- Трехосевые прецизионные IMU ADIS16400, ADIS16405, которые включают мультиосевой акселерометр, мультиосевой гироскоп и мультиосевой магнитометр, служащий цели повышения курсовой точности.

Применения устройств включают медицину (хирургические и другие медицинские инструменты, протезирование, получение изображений), навигацию, стабилизацию платформ, робототехнику, стабилизацию изображений, контроль и анализ движения, автоматизированное управление для промышленного и беспилотного воздушного транспорта и в цифровых компасах (ADIS16400, ADIS16405).

IMU ADI представляют собой продукты iSensor, основанные на технологиях iMEMS. Несколько раз IMU Analog награжались на выставке Sensors Expo. Эти устройства отличает высокий уровень системной интеграции, позволяющей снижать время разработки. Калибровка и компенсация также выполняются производителем. Цифровые SPI-интерфейсы обеспечивают пользовательский доступ к данным, программируемость и возможность конфигурирования IMU.

Все устройства отличаются малым угловым шумом до $0,05^\circ/\sqrt{\text{Гц}}$. Согласно общей тенденции рынка, состоящей в повышении характеристик угловых измерений, ADI анонсировала введение ADIS16385 — IMU с очень высокой стабильностью смещения гироскопа (в 4 раза лучше по сравнению с остальными представителями семейства).

Другие инерциальные модули

STMicroelectronics в 2010 году представила на рынок потребительской электроники цифровой компасный МЭМС-модуль LSM303DLH (рис. 12), в котором 3-осевой цифровой акселерометр с высокими рабочими характеристиками на основе собственной технологии ST объединен с 3-осевым магниторезистивным цифровым датчиком на основе технологии Honeywell. Данное устройство с интерфейсом I²C является еще одним примером мультисенсорной системы в корпусе. Производители стремились обеспечить следующие признаки цифрового компаса: высокую точность вместе с малым форм-фактором и низким энергопотреблением по конкурентоспособной цене.

Модуль разрабатывался для повышения возможностей мобильной навигации, он допускает услуги, основанные на положении location-based services (LBS), что включает помощь в нахождении направления, ориентирование в соответствии с картой и дисплеем, инерциальную навигацию пешеходов или автомобиля.

Модуль использует многие встроенные признаки, типичные для ST, включая функцию wake-up/power-down и обнаружение перемещений устройства во всех направ-



Рис. 12. Цифровой компасный МЭМС-модуль LSM303DLH ST на основе 3-осевого цифрового акселерометра и 3-осевого магнитометра

лениях (6D). Полные диапазоны ускорения $\pm 2/\pm 4/\pm 8g$ и полный диапазон магнитного поля $\pm 13\text{--}80$ мТл выбираются пользователем.

Модуль ST LSM303DLH заключен в корпус $5\times 5\times 1$ мм. Устройство совместимо программно и регистрами с трехосевым цифровым семейством акселерометров LIS331DLH/M/F. Цена — \$2,5 для массовых объемов.

STMicroelectronics выпустила также платформу MotionBee, чувствительную к движению и обладающую возможностями беспроводной коммуникации по протоколу ZigBee. В первом поколении платформа оснащена 3-осевым датчиком ускорения от STMicro, способным детектировать ускорения в диапазоне $\pm 2g$ и $\pm 6g$. Назначение датчика — способность к удаленному мониторингу движения, обнаружению и слежению в медицине, безопасности, промышленности и мониторингу окружающей среды.

Протокол ZigBee, который для данного применения разрабатывался совместно STMicro и Ember, был выбран в связи с тем, что он обеспечивает меньшее энергопотребление, чем Bluetooth и WiFi, и поэтому допускает длительную (более чем год) работу от батарей.

Первое MotionBee-устройство — это SPMB250-A1 с размерами $49\times 27\times 5$ мм, его цена — \$60.

Это не все примеры. Многие производители ориентированы на производство компонентов, модулей МЭМС датчиков инерции/движения с еще более высокими уровнями интеграции, системной функциональности, рабочих характеристик, более миниатюрных, маломощных и недорогих.

Литература

1. www.sysoeva.com/mems.htm
2. Сысоева С. Ключевые сегменты рынка МЭМС-компонентов. Акселерометры // Компоненты и технологии. 2010. № 3.
3. Сысоева С. Три уровня автомобильных сенсорных инноваций: макро, микро и нано // Компоненты и технологии. 2010. № 1.
4. МЭМС-технологии. Простое и доступное решение сложных системных задач // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2009. № 7.
5. <http://www.st.com/stonline/domains/support/epresentations/memsgyrosopes/gyros.htm>