

Новые сенсорные решения. Выход на новый уровень измерений

В статье представлен обзор последних сенсорных разработок, включая МЭМС и микросистемы, подтверждающий непрерывную эволюцию от компонента с законченным функционалом/расширенным набором функций к полному системному решению — на более высоком уровне системной интеграции и автономности отдельных узлов.

Светлана СЫСОВЕВА
Dr.Gold@sysoeva.com

Введение

Следующий уровень измерений, о котором говорится в заглавии статьи, означает более высокий уровень развития измерительных технологий. Обобщая, мы сегодня можем говорить о таких ключевых тенденциях, как:

- Переход от 2D- к 3D-измерению в пространстве.
 - Более высокий уровень интеграции и интеллектуальности компонентов.
 - Развитие технологий микро- и наносистем.
 - Более высокое качество измерений (характеристики/уровень исполнения, точность, стабильность и т. п.).
 - Повышение стойкости к жестким условиям эксплуатации и надежности/срока службы.
 - Увеличение числа датчиков, участвующих в измерениях, развитие мультисенсорных технологий, слияние сенсорных данных.
 - Повышение числа степеней свободы.
 - Появление новых уровней и узлов в системной иерархии.
 - Распространение технологий сетевой коммуникации.
 - Выделение новых программных слоев.
 - Аппаратно-программная конвергенция интеллектуальных узлов.
 - Энергосбережение.
 - Развитие беспроводных технологий.
 - Развитие батарейных и безбатарейных технологий питания.
 - Повышение автономности узлов/систем/суперсистем.
- Эти тенденции непосредственно связаны с другими передовыми решениями, пережившими свое основное развитие в предшествующие годы:
- Встраиваемые системы.
 - Переход от предложения сенсорного компонента к полному системному решению.
 - Бесконтактные технологии.
 - Полностью интегрированные сенсорные решения.

- Миниатюризация.
- Микросистемы и МЭМС.
- Развитие технологий инерциальных измерений.
- Компоненты с законченным функционалом/расширенным набором функций.
- Сенсорные/мультисенсорные модули, кластеры, блоки.
- Развитие модульной концепции интеграции.
- Энергосбережение.
- Беспроводные технологии.
- Пассивные сенсорные технологии.

Новые сенсорные решения непрерывно демонстрируют переход от автономного компонента к полному системному решению. Но понятие полного системного решения применительно к сенсорным технологиям трактуется по-разному, так как само понятие системы имеет множество определений.

Наиболее часто датчик рассматривается как один из множества компонентов иерархической системы, во главе которой находится центральный процессор. В иерархической системе каждый компонент системы может рассматриваться как система; эта же система также может рассматриваться как элемент надсистемы (суперсистемы).

Поэтому полное системное решение всегда предполагает целостность, единство рассматриваемого датчика с другими системными узлами, приоритет целей и задач системы над целями и задачами автономного компонента.

Концепция и методы системных сенсорных решений переживают в настоящее время очередной эволюционный виток, что выражается в повышении автономности, саморегулирования и самоуправления узлов.

В основе концепции системности большинства датчиков лежит объединение сенсорной или актюаторной части со CMOS ASIC, выполняющей функции сбора, обработки сигнала и интерфейса.

Суть автономизации компонента состоит в том, чтобы превратить датчик в авто-

номный модуль, минимально нагружающий внешнюю систему и внешний процессор обработкой результатов измерений, оставляющий за ним функции контроля и координации с другими узлами, повышения характеристик устройств и добавления функциональности — но на более высоком уровне иерархии. При этом и сама суперсистема стремится к полной автономии. Примеры — беспилотные летательные аппараты, концепция автономного управления автомобилем, «умные» роботы и дома. Поэтому производители работают над дальнейшим повышением характеристик, функциональности, надежности, интеллектуальности сенсорных решений, чему соответствует закономерный выход на следующий уровень системной интеграции — обособление сенсорных узлов и появление новых программных слоев.

В последнее время увеличилось число предложений высокоинтегрированных компонентов с высокими рабочими характеристиками и функциональностью, интегрированными микроконтроллерами, ЦОС для обработки сигнала, средствами подключения к проводным или беспроводным сенсорным сетям. Многие из них представляют собой решения, которые основаны на интеграции с ASIC МЭМС, микро- и наноструктур сенсоров и актюаторов, front-end структур, технических средств корпусирования и межсоединений.

Технологии датчиков движения, инерции, магнитного поля получили в последнее время наибольшее развитие [1–4]. Если ограничиться рассмотрением развития технологий только в рамках декартовых координат, то можно наблюдать явный переход от 2D- к 3D-измерению. Вначале для МЭМС-акселерометров, а затем и для МЭМС-гироскопов было достигнуто повышение числа степеней свободы до трех. Инерциальные датчики, объединенные с другими датчиками в один сенсорный узел, могут дать решение с большим

числом степеней свободы для системы в 3D-измерении и за его пределами. Сегодня число механических степеней свободы отдельного сенсорного узла на основе комбинаций инерциальных датчиков достигает 6, с учетом его ориентации относительно магнитного поля Земли — 9, а с учетом высоты, детектируемой датчиком давления, — 10.

Распространение мультисенсорных измерений, а также микроконтроллеров и ЦОС создало необходимость и возможность единого аппаратно-программного микросистемного решения со слиянием данных от датчиков. Новая философия отличается тем, что программному обеспечению отводится первостепенная роль, где по отношению к аппаратной части ASIC оно является надстройкой следующего уровня. Следующее поколение мультисенсорных систем основывается на разработке алгоритмов, встраиваемых в микроконтроллеры, ПО, интегрированных входы для других датчиков, выходов для проводной и беспроводной коммуникации.

Но это не все, следующий уровень системной интеграции теперь объединяет средства беспроводной (антенной) передачи данных и даже беспроводное питание, средства генерации и запаса энергии.

Все новые разработки, обзор которых представлен в этой статье, подтверждают обозначенные выше ключевые тенденции в развитии современных сенсорных технологий.

Выход магнитных энкодеров в 3D-измерение

Компания austriamicrosystems недавно представила свою технологию 3D-энкодеров Холла (HallinOne), разработанную в сотрудничестве с институтом интегральных схем имени Фраунгофера IIS, о чем уже сообщалось в [4].

Уникальность 3D-решения на основе энкодеров Холла состоит в возможности однокристалльных датчиков Холла независимо измерять все три компонента магнитного поля в направлении трех осей детектирования и преобразовывать 3D-информацию о магнитном поле в абсолютную информацию о положении.

В настоящее время выпущена первая микросхема семейства 3D-энкодеров AS5410, которая представляет собой линейный датчик, поддерживающий абсолютные измерения магнитного поля при линейном движении двухполюсного магнита, требуемого в качестве источника магнитного поля. Измерительная конфигурация представлена на рис. 1а. В измерениях линейного хода вдоль одной оси участвуют X и Z компоненты магнитного поля. Первая демонстрация этого сенсорного решения состоялась на мероприятии Sensors Expo & Conference (Rosemont, Illinois) 6–7 июня 2011 года, следующая за ней — на мероприятии SENSOR+TEST, прошедшем 7–9 июня 2011 года в Нюрнберге.

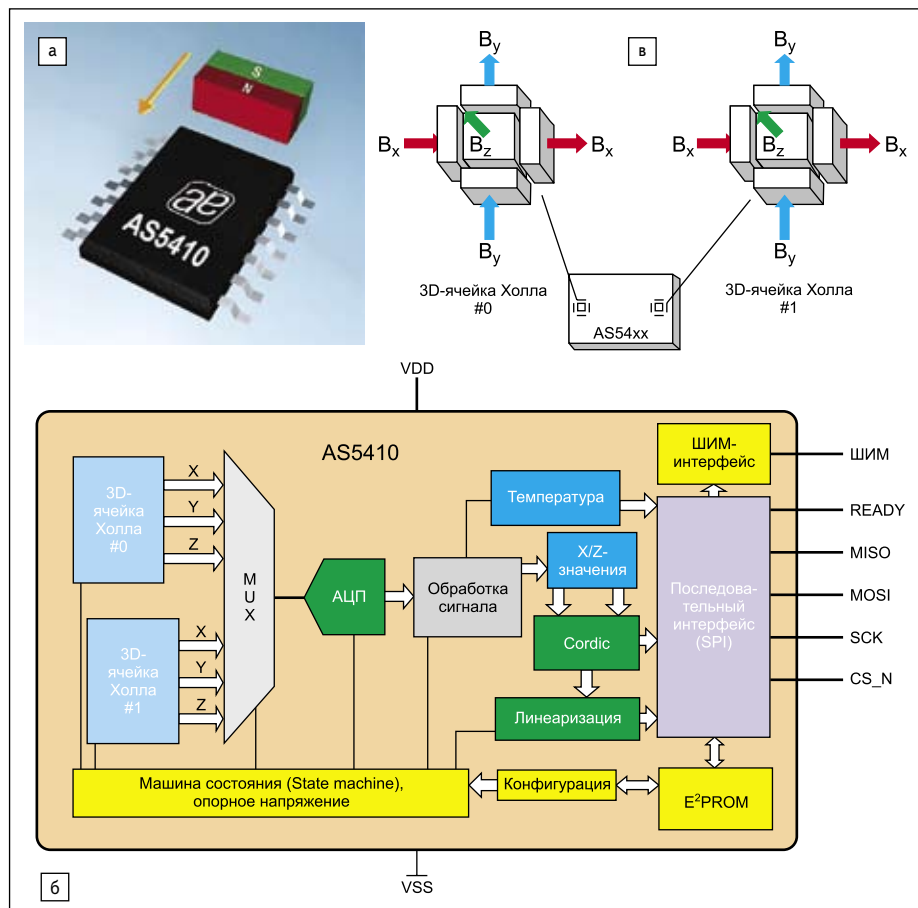


Рис. 1. Линейный энкодер AS5410 — первая микросхема семейства 3D-энкодеров компании austriamicrosystems: а) измерительная конфигурация для детектирования линейного перемещения малого дипольного магнита; б) блок-диаграмма; в) иллюстрация технологии 3D ячеек Холла

На мероприятии Sensors Expo & Conference 3D-энкодер AS5410 был отмечен золотой наградой в категории “Sensors” («Датчики»).

В микросхеме системно объединены две ячейки Холла, разнесенные на 2,5 мм, схемы обработки сигнала, компенсации температурных эффектов, изменений зазора между магнитом и датчиком, а также перепрограммируемая память EEPROM и средства линеаризации выхода (33 точки линеаризации для более высокой точности — до 0,5%).

С использованием двух 3D-ячеек Холла осуществляются абсолютные и дифференциальные измерения магнитного поля с разрешением до 14 бит.

AS5410 допускает детектирование линейного хода магнита немедленно после включения и без предшествующего опорного запуска в применении. Диапазон хода в 40 мм для магнита размерами 4×4×3 мм из материала NeFeV является примерным. Могут быть достигнуты другие диапазоны детектирования, в пределах до 50 мм линейного хода весьма малых магнитов, и реализованы различные механические конфигурации — с оптимальными размерами, геометрией и траекторией движения магнитов.

Это происходит посредством программирования памяти EEPROM, которая позволяет

AS5410 преобразовывать широкий диапазон входных данных, включая криволинейное движение, нелинейные диапазоны, изменение геометрии с наклонами кристалла и чипа друг относительно друга.

Дифференциальные магнитные измерения рассчитаны на применение AS5410 в промышленных системах, где детектирование положения производится не только в условиях пыли, грязи и влажности (к которым бесконтактная магнитная технология нечувствительна), но и в условиях нежелательных магнитных полей, которые могут осложнить измерения. Этот признак, а именно нечувствительность 3D-датчиков Холла к внешним магнитным полям, реализован впервые в мире.

Мультиплексор выбирает данные от двух ячеек Холла в качестве входов для блока вычислений CORDIC-алгоритма (рис. 1б). Выбранные входы могут быть абсолютными или дифференциальными сигналами. За ступенями последовательной выборки/сэмплинга сигналов Холла посредством сигма-дельта АЦП следует ступень обработки сигнала с компенсацией смещения и температурных воздействий, а также амплитудное согласование. Блок определения X/Z значений включает регистры, содержащие входные сенсорные

сигналы, которые являются входными для вычислений согласно алгоритму CORDIC (COordinate to Rotation Digital Computer). Этот блок преобразует прямоугольные координаты в полярные, а синусно-косинусные сигналы от ячеек Холла — в данные угла, расстояния и величины.

33-точечная линеаризация выходов CORDIC допускает высокую точность с использованием различных конфигураций магнитов в различных применениях.

Линеаризованная информация об абсолютном положении магнита в пределах линейного хода до 50 мм доступна непосредственно через многовыводный SPI-интерфейс и ШИМ-выход с одним выводом. Верификация полученных данных допускается посредством проверки CRC-кода (Cycle Redundancy Check, циклическая проверка избыточности).

В однокристалльное устройство интегрированы датчик температуры, выход которого может прочитываться через SPI-интерфейс, и перепрограммируемая память EEPROM. Двухнаправленный выход SPI допускает коммуникацию с устройством, включая прочтение всех сенсорных данных, памяти и запись в EEPROM конфигурационных данных. Через интерфейс SPI можно выбрать 4 базовых рабочих режима. 3D-энкодер AS5410 компании austriamicrosystems допускает быстрое и удобное конфигурирование.

Блок State machine контролирует автоматическую последовательность измерений в пределах цикла согласно заданной конфигурации. Конфигурационная ступень в AS5410 является предопределенной.

Энкодер AS5410 поставляется в 14-выводном корпусе TSSOP, квалифицированном для работы в температурном диапазоне от -40 до $+105$ °C. Рабочее напряжение питания — 3,3 В.

Отдельно стоит отметить возможность работы датчика AS5410 в двух режимах потребления мощности — непрерывном режиме и режиме одиночного кадра (Single shot mode). В непрерывном режиме AS5410 остается активным все время, и обновление регистров происходит непрерывно. В режиме одиночного кадра AS5410 после выполнения цикла измерений автоматически переходит в спящий режим. Готовность к новому измерению сигнализируется выводом READY.

Рекомендованные применения устройства — автомобильные и промышленные, а именно позиционирование плунжеров, педали, пневматических и гидравлических цилиндров, системы автоматизации со многими линейными ступенями позиционирования посредством каскадирования нескольких датчиков AS5410.

Образцы AS5410 и демонстрационные платы уже доступны для оценки, а производство стартует в III квартале текущего года. Объявленная цена одной микросхемы — всего лишь \$3,75 в количестве свыше 1000 шт.



Рис. 2. Иллюстрация мембранной технологии потенциометров SENSORFOIL Hoffmann & Krippner

AS5410 — это первая 3D-микросхема от austriamicrosystems [5], за ней следуют другие разработки датчиков для типовых конфигураций и применений.

Серия 3D-энкодеров AS540x, которая также была отмечена журналом EDN как финалист конкурса инноваций 2010 года, создавалась для работы в температурном диапазоне от -40 до 150 °C, с напряжением питания до 18 В в автомобильном и до 3 В — в промышленном исполнении и с соответствующим типом интерфейса (SPI, PWM, SENT). Энкодеры серии AS540x можно применять не только для линейного, но и углового — осевого и внеосевого (On/Off-axis), мультиосевого и наклонного детектирования, что предопределено конфигурацией ячеек Холла, объединяющих горизонтальные и вертикальные платы Холла (рис. 1в).

Потенциометры в новом качестве

Потенциометры — основной конкурент бесконтактных технологий магнитных энкодеров. В связи с контактным принципом работы для потенциометрической технологии имеются принципиальные ограничения в отношении надежности/срока службы, шумовых свойств, чувствительности к загрязнениям (пыли), рабочего диапазона детектирования. Но, несмотря на это, уровень развития технологий потенциометров на практике позволяет избежать многих теоретических недостатков и расширить возможности их применений в 2D-системах линейного и углового детектирования.

Компания Hoffmann & Krippner в текущем году вводит Moog QuietSense — тонкопленочный датчик положения, отличающийся

практически бесшумной и точной работой. Датчик разрабатывался для систем с ограниченным пространством и отличается линейностью в 0,1% в условиях вакуума. Модель Moog QuietSense QU66601L была отмечена на мероприятии Sensors Expo & Conference как заслуживающая упоминания в категории “Sensors” («Датчики»).

Ультратонкие мембранные потенциометры Hoffmann & Krippner на основе технологии SENSOFOIL предназначены для измерения линейного и углового положения (рис. 2) [6]. Толщина датчиков SENSOFOIL составляет 0,7–1,7 мм. Устройства герметично уплотняются и практически не изнашиваются. Они могут использоваться вместо обычных потенциометров и работать как делители напряжения.

Стандартные элементы длиной 50–500 мм, линейные, круговые или клиентские формы обеспечивают требуемую точность и легко интегрируются. Срок службы — свыше 1 млн раб. циклов (до 60), с точностью до 1 мм или 500 мкм, что зависит от условий работы. Все стандартные продукты SENSOFOIL уплотнены согласно классу IP 65/NEMA 4X.

Компания проработала и возможности для бесконтактной работы потенциометров. Технология SENSOFOIL MAGNET сходна с технологией SENSOFOIL Standard, но интегрирует ферромагнитный материал, допускающий бесконтактную работу.

Повышение технологического уровня потенциометров достигнуто на макроуровне, а следующий пример иллюстрирует технологические достижения, реализованные на микроуровне, но с применением нанотехнологий.

МЭМС датчики газа, системно интегрирующие наноматериалы

Компания Synkera (www.synkera.com) разрабатывает и производит инновационные устройства, системно комбинирующие нанотехнологии и MEMS вместе с использованием материалов с особыми свойствами.

В категории “Sensors” на мероприятии Sensors Expo & Conference 2011 года семейство химических датчиков MikroKera (рис. 3а) было удостоено золотой награды.

Спрос на датчики газа всех видов увеличивается, и первые два датчика водорода H_2 и летучих органических веществ VOC были введены Synkera в 2010 году с целью удовлетворить потребность в маломощных, надежных устройствах с высокими рабочими характеристиками для промышленного контроля качества воздуха и процессов. Семейство датчиков MikroKera основано на тех же самых сенсорных материалах, что применены в серии ProKera датчиков VOC и водорода (H_2), но потребление мощности снижено до $\sim 1/4$ от линейки ProKera, что открывает новые возможности применения датчиков семейства MikroKera в портатив-

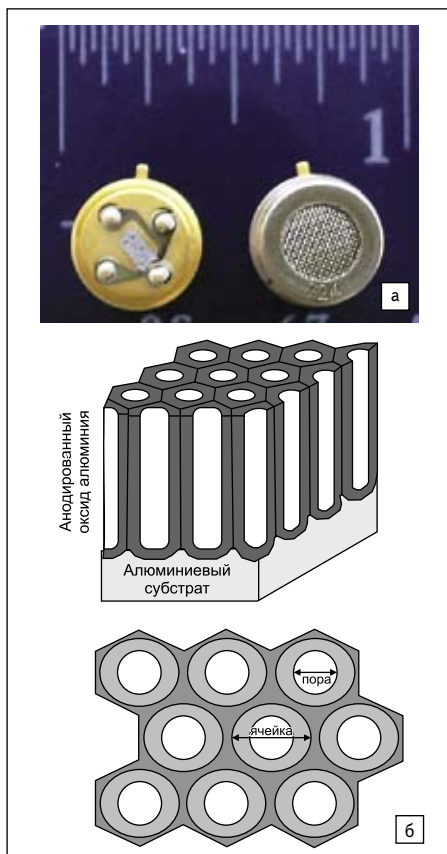


Рис. 3. MikroKera от Synkera — маломощные датчики газа, системно интегрирующие микро- и нанотехнологии: а) датчики водорода семейства MikroKera; б) наноструктурированный анодированный оксид алюминия — основной материал микросенсорной платформы

ных и беспроводных устройствах. Датчики для детектирования хлора (Cl_2), сульфида водорода (H_2S) — следующие представители семейства MikroKera.

Семейство MikroKera представляет собой маломощные датчики на основе микромеханической и наноструктурированной микросенсорной платформы из анодированного оксида алюминия (anodic aluminum oxide, AAO).

Ядро платформы — синергетическое объединение методов шаблонного нанопроизводства и технологий микромеханики, основанное на применении ААО. Шаблонное нанопроизводство используется для придания материалу заданных свойств, а гибкий процесс производства керамических МЭМС обеспечивает удобный путь для интеграции устройства.

Принцип действия химических датчиков семейства MikroKera — резистивный, но Synkera разработала и электрохимический метод детектирования [7].

Рабочие принципы MOS-датчиков основаны на поглощении газа на поверхности оксида металла, что изменяет электрическое сопротивление. Поверхностное взаимодействие происходит при повышенных температурах. Сам датчик может работать при комнатной

температуре, но для оптимального детектирования необходимо два источника напряжения — для нагрева резистивного элемента и питания схемы. Потребление мощности нагревателем для семейства MikroKera снижено до 100 мВт. В поглощении поверхностная площадь играет значительную роль.

Synkera NanoMOS датчики отличаются уникальной сенсорной архитектурой с большой поверхностной площадью, объединенной с МЭМС, малым размером, высокой чувствительностью, быстрым срабатыванием и малым энергопотреблением.

Анодированный оксид алюминия — это самоорганизующийся наноструктурированный материал, содержащий высокоплотные однородные цилиндрические поры, которые выровнены перпендикулярно к поверхности материалов и проникают сквозь его толщину. Упорядоченная пористая структура формируется при электрохимическом анодировании субстрата алюминия определенным способом.

Тонкий плотный барьерный слой оксида отделяет поры от алюминия. Диаметр пор подгоняется от 5 нм до нескольких сотен нм, с соответствующей плотностью пор от 10^{12} до 10^9 см⁻². Поверхностная площадь пор приближается к 100 м²/г.

Структура этого материала была известна с конца 1960-х годов.

Анодированный оксид алюминия является оптически прозрачным, электрически изолирующим, теплостойким, механически прочным и химически инертным материалом. Обработка ААО совместима с технологиями микропроизводства и может быть масштабирована для высокообъемного производства. Synkera выпускает материалы с диаметром пор от 5 до 200 нм и длиной пор от 0,1 до 300 микрон. В производстве используются различные архитектуры ААО, включая ААО, прикрепляемый к фольге из алюминия, пластины ААО в свободном состоянии, шаблоны ААО, интегрированные в различные неалюминиевые субстраты — кремний, стекло. Методы, которые используются для шаблонного нанопроизводства высокоплотных массивов наноструктур в порах ААО, включают электроосаждение, полимеризацию, золь-гель процессы, химическое паровое осаждение (CVD) и другие.

Оксид алюминия, полученный методами микромеханики из субстрата алюминия, вначале находится в аморфном состоянии, а затем подвергается температурной обработке для формирования α - или γ -керамики на основе оксида алюминия. Это повышает химическую стойкость и температурную стабильность материала. Применение газочувствительных компаундов и металлических электродов в теплоизолированной области дает микросенсорный элемент.

Теплоизолированная область может нагреваться до 1000 °С без разрушения, срок службы — 10^5 циклов.

Synkera разработала также микросборки и сенсорные массивы, когда несколько датчиков, чувствительных к одному или разному газовым составам, могут быть размещены на одном субстрате.

Полная системная интеграция инерциальных датчиков с программными модулями

Первую аппаратно-программную реализацию слияния данных датчиков, причем на одном кристалле — вначале в 6-осевом, а затем в 9-осевом формате, представила компания Invensense [1–2, 8].

IMU-3000 — первый трехосевой гироскоп, интегрирующий на кристалле входы внешнего акселерометра, что дает 6-осевой блок инерциальных измерений. От множества интегральных компонентов блоков инерциальных измерений, предлагаемых другими производителями (например, Analog Devices, Sensor Dynamics), IMU-3000 отличается тем, что интегрирует на том же кристалле аппаратную машину обработки движения под названием Digital Motion Processor (DMP), позволяющую выполнять слияние датчиков без центрального процессора. Интеграция в систему производится с использованием стандартной библиотеки MotionProcessing Library (MPL) и API.

Следующим решением Invensense стал микропроцессор MPU-6000, интегрирующий на одном кристалле не только трехосевой гироскоп, но и трехосевой акселерометр, а также входы для подключения трехосевого магнитометра и аппаратную машину DMP с программными надстройками MPL и API. Это первая в мире аппаратно-программная реализация 9-осевого сенсорного IMU, выполняющего вычисления без участия центрального процессора.

Оба этих законченных аппаратно-программных решения остаются самыми миниатюрными: размеры однокристалльных корпусов QFN — $4 \times 4 \times 0,9$ мм. Полное системное решение включает по одному внешнему датчику (акселерометр для IMU-3000, магнитометр — для MPU-6000) и различное ПО для быстрой интеграции с популярными мобильными устройствами.

ПО как надстройка над аппаратной частью блоков инерциальных измерений обособляется в отдельный слой более высокого уровня. Многие поставщики датчиков инерции, включая STMicroelectronics и Freescale, отводят ПО главенствующую роль.

Для выполнения слияния данных ST ввела программную машину iNEMO Engine [1, 9]. А компания Freescale использовала многоуровневую пирамидальную системную концепцию для линейки Xtrinsic интеллектуальных сенсорных решений (рис. 4) [10], которая была принята для транспортных и мобильных применений с обнаружением жестов.

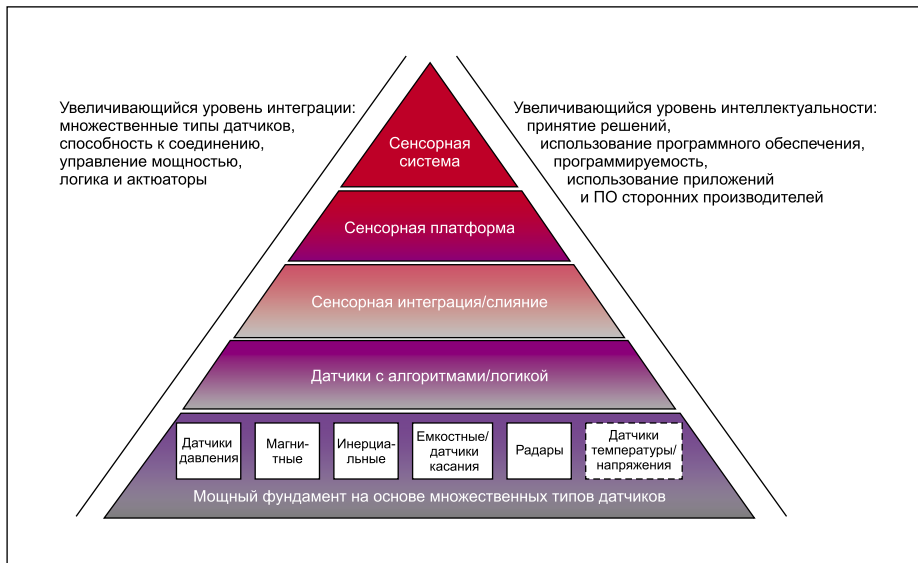


Рис. 4. Линейка Xtrinsic Freescale интеллектуальных сенсорных решений

10-осевой формат слияния данных мобильных датчиков для навигации в 3D-измерении

10-осевой формат предназначен для новых мобильных устройств, навигация посредством которых будет осуществляться с учетом высоты его нахождения над уровнем моря (LBS, инерциальная навигация пешеходов в многоэтажных зданиях и т. п.).

Первое коммерческое 10-осевое решение, о котором стало известно в мае 2011 года, было предложено компанией STMicro-electronics [9]. ST предлагает использовать в качестве аппаратной части три своих MEMS-датчика — геомагнитный модуль LSM303DLHC, гироскоп L3G4200D и датчик давления, для программной связи которых предназначена программная машина iNEMO Engine.

С мая 2011 года установлена цена этого решения — \$5,9 в больших объемах, а массовое производство начнется в III квартале 2011 года.

Но и другие компании разработали и представили свои предложения, заслуживающие рассмотрения.

Analog Devices, Inc. (ADI) (www.analog.com) в июне этого года выпустила новый блок IMU ADIS16407 с 10 степенями свободы, который интегрирует в одном корпусе следующие датчики (рис. 5):

- трехосевой iMEMS цифровой гироскоп, детектирующий диапазоны: ± 75 , ± 150 , $\pm 300^\circ/\text{c}$;
- трехосевой iMEMS цифровой акселерометр на диапазон детектирования $\pm 18g$;
- трехосевой цифровой магнитометр на диапазон $\pm 0,25$ мТл;
- цифровой барометр диапазона 10–1200 мбар.

ADIS16407 предназначен обеспечить простой и эффективный в стоимостном выражении метод интегрирования прецизионных мультисенсорных структур в промышленные системы. Применения, на которые рассчитан датчик, объединяют стабилизацию платформ, беспилотную навигацию, робототехнику. Все сенсорные компоненты

В портфолио Xtrinsic представлена сенсорная платформа MMA9550L, являющаяся расширением функционала интегрированного трехосевого акселерометра за счет программируемого ядра и памяти, способная управлять множественными сенсорными входами и принимать локальные решения системного уровня.

MMA9550L можно запрограммировать для обнаружения свободного падения (freefall), детектирования наклона, 3D-ориентации, кликов/стуков (Tap and double tap detection), инерциальной навигации, удара, вибрации, внезапного движения, управления питанием.

Movea (www.movea.com) и Hillcrest Labs (www.hillcrestlabs.com) также поставляют системы обнаружения жестов, основанные на технологиях МЭМС, объединенных с обработкой сигнала и технологиями слияния данных согласно применению.

Movea поставляет разнообразные чипы и чипсеты MotionIC для компьютерной периферии, удаленного контроля IPTV, электроники, предназначенной для реабилитации и спорта.

MotionIC, основанные на интегральных блоках IMU, акселерометрах, гироскопах и магнитометрах, поставляются в широком диапазоне сенсорных конфигураций: 2G, 3A/2G, 3A/3M, 3A/3G/3M (где А означает акселерометр, G — гироскоп, М — магнитометр) [11].

Например, Air MotionIC 2G поддерживает 2D-наведение с 2D обнаружением жестов, Air MotionIC 3A2G допускает обнаружение более сложных жестов.

Для MotionIC системная интеграция мультисенсорных МЭМС-датчиков с процессором обработки движения и ПО SmartMotion Firmware достигается с малым форм-фактором.

MotionPod — блок инерциальных измерений, представляющий собой полное аппаратно-программное 9-осевое решение

для точного 3D-измерения ориентации человеческого тела или его частей [1, 11].

Ядром технологии обнаружения движения Freespace Hillcrest Labs является ПО Freespace MotionEngine, которое выполняет существенные функции обработки движения.

Решения на основе технологии Freespace включают модули удаленного контроля SmartRemote для компьютерных и игровых приложений, телевизионного дистанционного управления интерактивными курсорными приложениями Smart TV, а также сенсорные модули для интеграции в клиентские системы удаленного контроля и курсорного управления. Сенсорные модули интегрируют Freespace MotionEngine, встроенное в микропроцессор, вместе с МЭМС датчиками инерции в 6-осевой конфигурации (акселерометр + гироскоп), что дает клиентам готовый к использованию модуль.

Технология Freespace использована в следующих продуктах: LG Electronics Magic Motion remote control, Logitech MX Air, Loop pointer, Kodak Theatre HD Player, Universal Electronics Dolphin remote control [12].

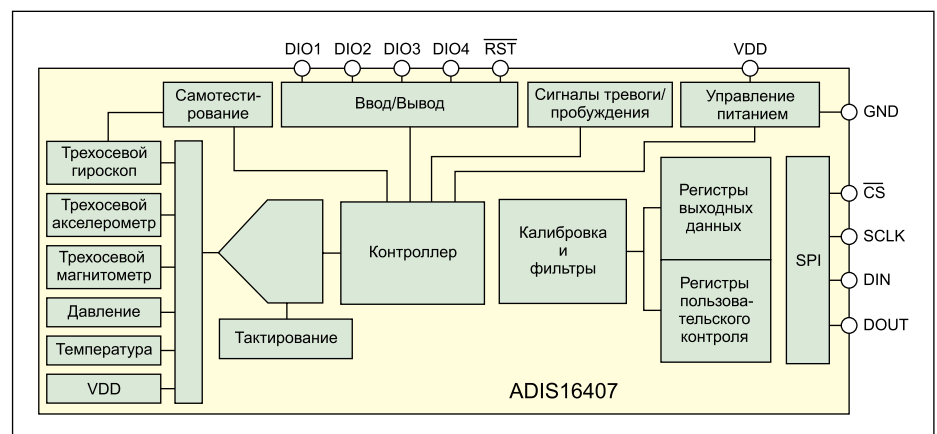


Рис. 5. Новый интегральный блок IMU ADIS16407 Analog Devices с 10 степенями свободы

интегрированы в один кубический корпус со сторонами куба по 23 мм, протестированы и откалиброваны при производстве, ортогонально выровнены, что позволяет снизить время интеграции и упростить этот процесс. Модуль обеспечивает простой интерфейс для сбора данных и контроля его конфигурации. Новый компонент имеет стандартный соединительный интерфейс и выводитно совместим с другими IMU семейства ADIS (ADIS1635x, ADIS1636x, ADIS1640x) [13].

ADIS16407 — автономная система, работающая без пользовательской инициализации. При подаче напряжения питания датчик инициализируется и начинает сбор, обработку, выгрузку данных в выходные регистры. Интерфейс SPI позволяет прямое подключение к большинству типов встраиваемых системных микроконтроллеров.

О достижениях технологий МЭМС-акселерометров в плане стойкости к жестким условиям

Analog Devices демонстрирует следующие достижения технологии МЭМС-акселерометров. Компания вводит высокотемпературный двухосевой акселерометр iMEMS ADI ADXL206, гарантированно работающий в диапазоне от -40 до $+175$ °C (рис. 6) [13]. Это прецизионное устройство разработано для геологических буровых установок и промышленных систем с высокими рабочими температурами.

Новый акселерометр iMEMS измеряет ускорение в полном диапазоне в $\pm 5g$ с разрешением 1 мг.

Акселерометр ADXL206 имеет типичный шумовой порог в $110 \text{ мкг}/\sqrt{\text{Гц}}$, что позволяет разрешать сигналы менее 1 мг при измерениях наклона (менее $0,06^\circ$ наклона) с узкой частотной полосой (< 60 Гц). Могут быть выбраны частотные полосы 0,5 Гц — 2,5 кГц. ADXL206 поставляется в 8-выводном корпусе

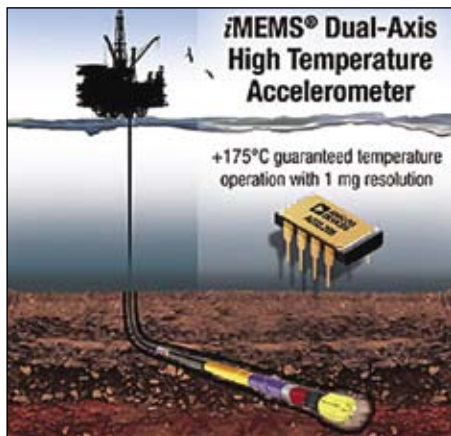


Рис. 6. Высокотемпературный двухосевой акселерометр ADXL206 Analog Devices на основе технологии iMEMS, работающий при температурах до $+175$ °C

се SBDIP размерами $13 \times 8 \times 2$ мм. Ключевые признаки включают также потребление мощности в 700 мкА и высокую повторяемость смещения.

Серия 72 Endevco High-G акселерометров позволяет надежно детектировать ускорения, вибрации, удары в диапазоне до $20000g$. За эту разработку компания Meggitt Sensing Systems, в состав которой сейчас входит компания Endevco, была отмечена серебряной наградой в категории "Sensors" на только что прошедшем мероприятии Sensors Expo & Conference. Хотя это не самая новая разработка Endevco: о ней впервые было объявлено почти год назад, в июне 2010 года [14].

Серия Endevco model 72 представляет собой семейство пьезорезистивных акселерометров в SMT-корпусе для поверхностного монтажа. В устройство входит высокочувствительный мостовой сенсорный МЭМС-элемент, применяется газовое демпфирование для подавления резонанса и механические остановы для противостояния перегрузкам (патент США 6,988,412). Низкопрофильный, миниатюрный, герметичный корпус весит примерно 0,16 г. Серия 72 изначально была специфицирована на диапазон детектирования до $20000g$, но по-прежнему остается в перспективе выпуск версии модели 72, рассчитанной на диапазон детектирования до $60000g$.

Частотное срабатывание включает статическое ускорение. Сдвиг смещения после удара сведен производителем к минимуму, что позволяет рекомендовать это устройство для детектирования ударов длительного действия, характерных для автомобильных, авиакосмических и других тестовых измерений общего назначения.

Дальнейшее повышение рабочих характеристик МЭМС-акселерометров

Швейцарская компания Colibrus — лидирующий мировой поставщик стандартных и полузаказных МЭМС датчиков движения для военной, авиакосмической и энергетической отрасли, а также промышленных и измерительных систем, работающих в жестких условиях и требующих высоких рабочих характеристик датчиков.

Colibrus в мае 2011 года анонсировала выпуск последнего поколения МЭМС датчиков ускорения — SF2006 (рис. 7). Назначение датчиков — мониторинг структур и состояния зданий, мостов, плотин, ядерных реакторов, измерения сейсмической активности, картография землетрясений, предупреждение цунами. Акселерометры квалифицированы Геологической Службой США (US Geological Survey, USGS) согласно классу В [15].

SF2006, рассчитанный на полный диапазон ускорений до $\pm 5g$, отличается низким шумом — до $900 \text{ нг гмс}/\sqrt{\text{Гц}}$, высоким динамическим диапазоном (112 дБ на 100 Гц),



Рис. 7. МЭМС-акселерометры SF2006 Colibrus

высокой линейностью ($< 1\%$) и частотной полосой от 0 до 1 кГц.

Компании Hewlett-Packard (HP) и Royal Dutch Shell сотрудничают в разработке беспроводных сенсорных сетей для обнаружения нефти и газа на основе оригинальной технологии МЭМС-акселерометров, которые, как было ранее объявлено, в 1000 раз более чувствительны по сравнению с обычными коммерчески доступными МЭМС-акселерометрами [16–20].

Датчики имеют и другие преимущества: дают малые шумы, причем на низких частотах (до 1 Гц вниз), отличаются малым энергопотреблением, малым размером и в целом подходят для многоканального беспроводного сбора данных в сейсмических сенсорных сетях.

Для этой сенсорной технологии был продемонстрирован шумовой порог в $10 \text{ нг}/\sqrt{\text{Гц}}$ [20]. Достигнутые результаты продемонстрировались в Сейсмологической лаборатории Геологической Службы США с помощью высокоразрешающего сейсмометра GS-13. В испытаниях USGS датчик показал динамический диапазон в 120 дБ и шумовую спектральную плотность мощности менее чем $10 \text{ нг}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Характеристики датчика тестировались в реальном времени, в условиях землетрясения в 6,7 балла по шкале Рихтера в Калифорнийском заливе, которое произошло 21 октября 2010 года. Сигнал от опорного датчика был согласован с акселерометром HP до 25 мГц.

Ключ в достижении характеристик лежит в основе сенсорной технологии вместе с ASIC. Датчик изготавливается из трех однокристалльных кремниевых подложек при соединении трех пластин в малом вакуумном инкапсулированном корпусе (рис. 8).

Инерциальная масса подвешивается на гибких балках, выравненных в центральной пластине. Электроды размещаются на поверхности массы и на противоположных стационарных пластинах с зазором между ними. Большая масса дает малый шум.

Плоское частотное срабатывание акселерометра HP является его важнейшим пре-

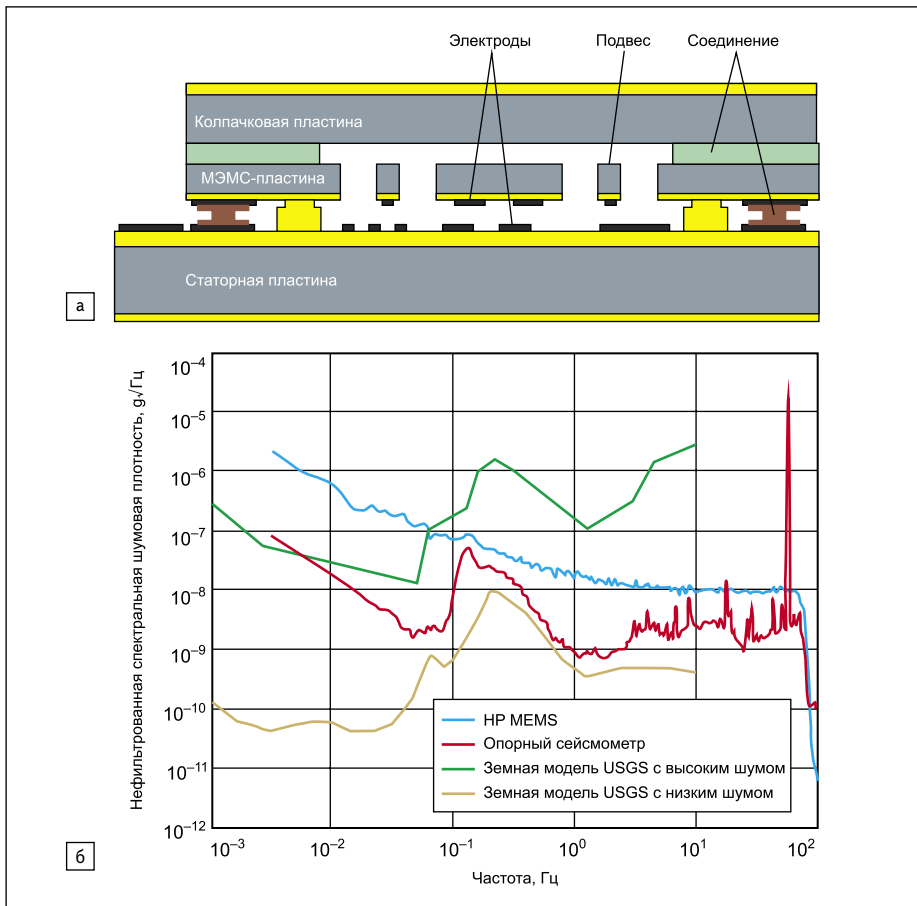


Рис. 8. Технология акселерометров Hewlett Packard: а) МЭМС-структура; б) шумовая характеристика

имуществом на низких частотах (от 200 Гц до нуля), выход датчика — линейный без гистерезиса (рис. 86).

Более высокие рабочие характеристики МЭМС гироскопов и датчиков давления

Sensoror Technologies выпустила 3-осевой гиromодуль МЭМС STIM210 (рис. 9) с высокими рабочими характеристиками. Вес гиromодуля — 55 г, стабильность смещения характеризуется в $10^\circ/\text{ч}$ с нестабильностью в $0,5^\circ/\text{ч}$. STIM210 — второй модуль серии, выпущенный вслед за предшественником — STIM202 [2, 21]. Поэтому характеристики обоих модулей во многом идентичны, но угловой случайный шум STIM210 снижен до $0,15^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ [22].

STIM210 иллюстрирует дальнейшие шаги Sensoror Technologies в направлении расширения границ использования МЭМС-гироскопов. STIM210 рекомендован для навигации, стабилизации и тактического управления (guidance) в промышленных, аэрокосмических и военных сегментах рынка. Демонстрации STIM210 состоялись на мероприятиях Sensors+Test в Германии и Sensors Expo в США в июне 2011 года.

Acuity, Inc. (www.acuitymicro.com) — это fabless-поставщик датчиков давления МЭМС-типа, отличающихся стабильностью смеще-

ния и точностью на очень низких давлениях. Полный диапазон ражирован до 2,5 мбар вниз. Датчики поставляются OEM-клиентам в форме пластин или в корпусе как скомпенсированные, калиброванные, усиленные единицы. Текущая технология MEMS, дизайн структуры и процессы позволяют говорить о характеристиках и надежности следующего поколения датчиков.

Новым продуктом является AC3050-010 — кристалл пьезорезистивного датчика давления на 10 мбар полной шкалы с очень высокой стабильностью, который рассчитан на промышленные, медицинские применения и HVAC. AC3050-010 выпущен как дополнение к серии AC3030. Датчики предшествующей серии рассчитаны на полные диапазоны давлений 20, 50 и 100 мбар и получили положительные отзывы клиентов.

Ключевые атрибуты устройства включают:

- Очень низкую массу диафрагмы, перекрывающую g-силы и вибрационные ошибки, что улучшает точность и снижает цену схем коррекции.
- Очень малый фут-принт (квадрат со сторонами 1,9 мм), что также снижает механические напряжения и цену корпусирования.

Размеры кристаллов серии AC3030 еще меньше — $1,6 \times 1,6$ мм. Пластины AC3050 производятся на MEMS фаундри Semfab. Диапазон в 2,5 мбар был достигнут для се-



Рис. 9. Новый трехосевой гиromодуль МЭМС STIM210 Sensoror с высокими рабочими характеристиками



Рис. 10. Стандартные конфигурации усиленных датчиков давления AC4060-XX и AC4061-XXX

рии закорпусированных датчиков AC4060, в которой кристаллы датчика давления типа AC3050 и AC3030 объединены с ASIC (рис. 10).

Заявленная точность детектирования — 2,5% в диапазоне рабочих температур от 0 до 70°C . Серия AC4060 рассчитана на диапазоны 2,5, 5, 10, 20, 50 и 100 мбар. Датчики усилены, калиброваны и заключены в керамический корпус. В ближайших планах — выпуск серии датчиков AC4070, они рассчитаны на те же диапазоны — 2,5–100 мбар, но заключены в пластмассовый корпус [23].

Honeywell не так давно ввела линейку кремниевых датчиков давления TruStability Silicon Pressure Sensors, отличающуюся высокой стабильностью и точностью [24]. Линейка TruStability включает две серии:

- HSC (High Accuracy Silicon Ceramic) — с заявленной точностью до $\pm 1\%$ в рабочем температурном диапазоне $0 \dots 50^\circ\text{C}$;
- SSC (Standard Silicon Ceramic) — с заявленной точностью до $\pm 2\%$, в рабочем температурном диапазоне $-20 \dots 85^\circ\text{C}$.

Диапазон детектирования давлений обоих датчиков составляет от 60 мбар до 10 бар. Потенциальные применения — медицинские и промышленные.

Беспроводные сенсорные устройства и сети для коммуникации по воздуху

Компания Libelium (www.libelium.com) разрабатывает и производит аппаратные средства для осуществления беспровод-

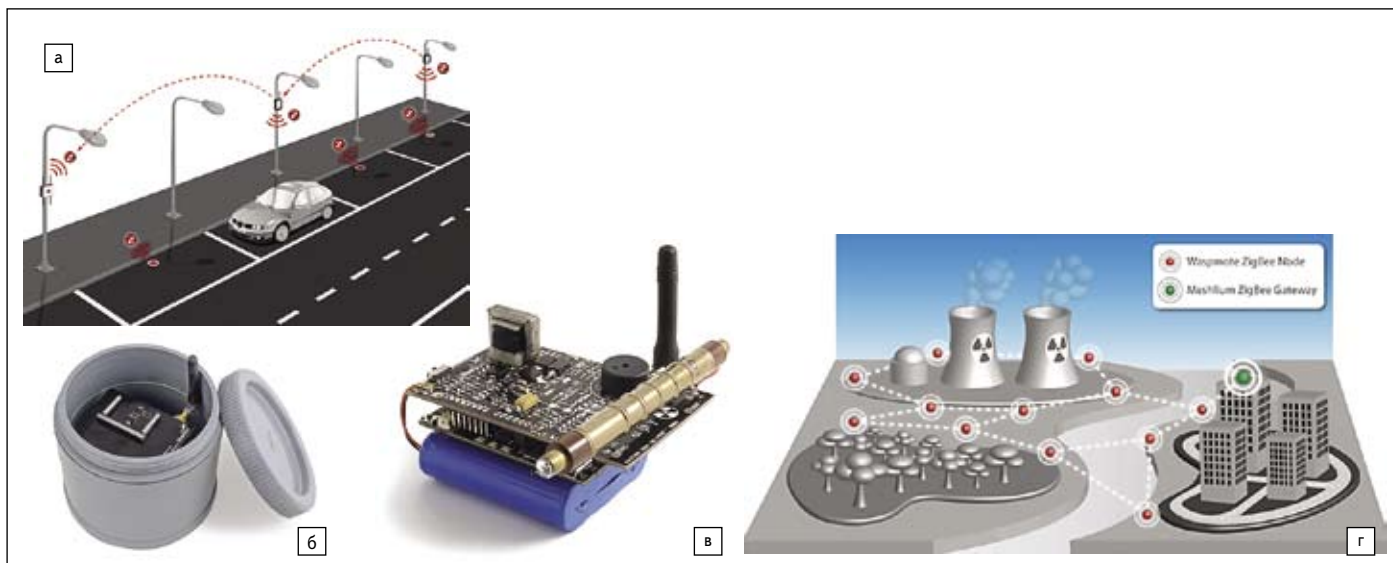


Рис. 11. Беспроводные сенсорные системы и компоненты компании Libelium:

а, б) система интеллектуальной парковки с беспроводными датчиками; в) радиационная плата со счетчиком Гейгера; г) сенсорная сеть для радиационного контроля

ных сенсорных сетей, а также ячеистые сети и коммуникационные протоколы.

Линейка продуктов объединяет:

- Wasp mote — ультрамаломощное сенсорное устройство для создания беспроводных сенсорных сетей на расстоянии до 40 км;
- Meshlium — маршрутизатор, интегрирующий сетевые технологии WiFi (2,4–5 ГГц), ZigBee, GPRS, GPS, Bluetooth;
- N-vio — платформа для коммуникации посредством Bluetooth и другие [25].

В 2011 году Libelium анонсировала введение OTA (Over the Air Provisioning) — решения, которое лежит в основе беспроводного программирования сенсорных сетей (Over the Air Programming, OTAP) и Интернета вещей (Internet of Things). Эта технология допускает программное обновление физических сенсорных узлов без необходимости физического контакта.

OTA работает в нелицензированной частотной полосе (2,4 ГГц, 868 МГц, 900 МГц) и отличается низким уровнем потребления мощности с использованием протоколов типа 802.15.4 и ZigBee. Беспроводное программирование (OTA) в последнее время широко распространилось в связи с популярностью и развитием технологий сотовой связи. OTA позволяет пользователям мобильных телефонов обновлять ПО и пользоваться новыми услугами. Интернет вещей также может выигрывать от такой возможности. Сети, включающие сотни или тысячи узлов, именуемых motes, часто допускают размещение узлов в удаленных и труднодоступных местах, поэтому OTAP вместе с зарядом батареи от солнечной панели позволяет сводить цену сенсорных сетей к минимуму.

Апгрейд возможен для одного узла (unicast), множественных узлов (multicast) или всей сети (broadcast). Libelium OTA решение позво-

ляет работать с прямым (direct) и multihop-доступом (с передачей пакетов продвижения данных), что зависит от используемого протокола (802.15.4 или ZigBee). Приложение OTA-Shell может работать в Windows, Linux и MacOS.

Следующим решением Libelium стала интеллектуальная сенсорная платформа для парковки автомобилей, предназначенная для экономии времени и топлива и снижения эмиссии CO₂. Сенсорная технология Smart Parking интегрируется с платформой Wasp mote (рис. 11а, б). Новый датчик Smart Parking sensor дает возможность детектировать прибытие и отъезд автомобилей, что позволяет системам, основанным на сенсорной парковочной платформе Libelium, находить свободное место для парковки быстро и эффективно. Датчики могут осуществлять коммуникацию с сенсорной сетью с использованием радио Wasp mote ZigBee.

После инсталляции парковочные датчики могут быть физически недоступными в течение многих лет. Передача сигнала осуществляется только в случае парковочного события (прибытия/отъезда автомобиля). Батареи позволяют парковочному датчику служить до 5 лет без замены батарей, а OTA дает возможность апгрейда. Сотни узлов могут быть развернуты в беспроводной сети. Датчики взаимодействуют со шлюзом по радиоканалу частотой 2,4 ГГц или 868/900 МГц. Для подключений 2,4 ГГц ZigBee ячеистые сети связываются с маршрутизаторами, размещенными в уличных осветительных столбах. На более низких частотах возможна прямая коммуникация датчиков со шлюзом.

Эта плата впервые демонстрировалась на Sensors Expo & Conference 2011 в США.

В рамках этого же мероприятия компания Libelium была отмечена бронзовой наградой, но за другую свою разработку — бес-

проводную радиационную сенсорную плату (рис. 11в).

Создание радиационной сенсорной платы было мотивировано ядерной аварией в Фукусиме, случившейся после землетрясения и цунами. Назначение устройства состояло в измерении уровней радиации в опасных зонах. Был создан автономно питаемый батарейный счетчик Гейгера, способный автоматически считывать уровни радиации и посылать информацию беспроводным способом, используя технологии ZigBee, GPRS и им подобные.

Дизайн сенсорной платы выполнен открытым, исходный код выпущен под лицензией GPL.

Автономный беспроводной счетчик, питающийся от батарей, может работать годы. Множество датчиков может быть размещено вокруг ядерной электростанции и в ближайших городах (рис. 11г). Сенсорные узлы можно инсталлировать в уличное освещение, деревья, проработана возможность дополнительной подзарядки таких узлов от солнечных панелей, помимо батарейного питания. В чрезвычайных ситуациях, в случае утечки радиации сеть может быть развернута незамедлительно, при этом для питания датчиков предусмотрены батареи, допускающие высокую нагрузку.

MicroStrain (www.microstrain.com) в текущем году представила беспроводную сенсорную систему — синхронизированную и с расширенным диапазоном (MicroStrain Extended Range, Synchronized), получившую сокращенное название mXRS. Эта разработка была отмечена серебряной наградой в категории “Data Acquisition” («Сбор данных») на Sensors Expo & Conference 2011.

Беспроводная сенсорная система mXRS допускает коммуникацию беспроводных сенсорных узлов с расширенным диапазоном.

Линейка беспроводных сенсорных узлов mXRS включает:

- V-Link-mXRS Wireless Voltage Node — трансивер, собирающий аналоговые данные напряжения для высокоскоростных WSN.
- SG-Link-mXRS Wireless Strain Node — прецизионное устройство для измерения механического напряжения, крутящего момента, нагрузки, давления и магнитных полей (torque, load, pressure and magnetic fields).
- G-Link-mXRS Wireless Accelerometer Node — трехосевой акселерометр для измерения ускорения, вибрации, наклона.
- DVRT-Link-mXRS Wireless Displacement Node — датчик перемещения на основе технологии MicroStrain DVRT.
- TC-Link 6-mXRS Channel Wireless Thermocouple Node — 6-канальный узел на основе термопар типов J, K, R, S, T, E, B, N.
- TC-Link 1-mXRS Channel Wireless Thermocouple Node — одноканальный узел на основе термопар из числа типов, перечисленных выше. Дальность действия датчиков, питающихся от литий-ионной батареи, достигает 1 км.

Сенсорные системы включают беспроводные шлюзы-агрегаторы данных WSDA-Base Synchronized Extended Range Base Station и PO Node Commander [26].

MicroStrain, Inc. получила в той же категории «Data Acquisition» («Сбор данных») и вторую серебряную награду за платформу SensorCloud (в переводе — сенсорное облако), выполняющую запас сенсорных данных, визуализацию, удаленный контроль больших сенсорных сетей (рис. 12) [26–27].

SensorCloud разрабатывалась MicroStrain для собственных датчиков, но сейчас допускается ее подключение через API-устройства и системы других производителей.

SensorCloud включает:

- средства надежного запаса избыточных сенсорных данных;
- средства графической визуализации для удобной пользовательской навигации;
- математический процессор MathEngine;
- средства SMS и e-mail предупреждений.

Целевые применения SensorCloud — удаленный структурный мониторинг (мостов), мониторинг состояния (деталей машин), машинные беспроводные сети, мониторинг окружающей среды (датчики солнечной радиации, температуры, влажности), оптимизация работы центров данных (мониторинг температуры и влажности), виртуальное получение данных с применением MathEngine (для расчетов прогнозов вместо непосредственного съема и анализа сенсорных данных) и др.

Полностью автономные беспроводные сенсорные узлы

Беспроводные сенсорные системы — перспективная технология, так как позволяет исключить подвод проводов для коммуникации и питания, что особенно актуально для удаленных сенсорных узлов, размещаемых в труднодоступных местах. Уровень современных батарейных технологий допускает срок службы сенсорного узла, находящегося в спящем режиме и периодически опрашиваемого по требованию, порядка нескольких лет без подзарядки или замены батареи.

Собиратели энергии (Energy Harvesters) дают еще больше возможностей для питания удаленных сенсорных узлов. Энергохарвестеры могут захватывать и преобразовывать в электрическую энергию различные виды неэлектрической энергии — механическую (энергию вибрации, ускорения, механического напряжения), тепловую (при наличии температурного градиента), энергию света, радиоволн. Затем электрическая энергия используется для питания узла, а на промежуточном этапе — для зарядки перезаряжаемых батарей или суперконденсаторов.

В настоящее время технологии сбора энергии находятся на высоком уровне — в особенности вибрационные энергохарвестеры, ТЭГи (термоэлектрические генераторы), солнечные панели. Например, Shell Oil использует беспроводную сенсорную систему, питающуюся от вибрационных энергохарвестеров Perpetuum (www.perpetuum.com) [28].



Рис. 12. Иллюстрация технологии SensorCloud Microstrain

National Instruments также ввела беспроводную измерительную систему с применением энергохарвестеров Perpetuum [29].

Microstrain EH-Link — беспроводной самопитаемый узел, собирающий энергию от окружающих источников [26]. EH-Link совместим с широким диапазоном технологий генераторов, включая пьезоэлектрические, электродинамические и тепловые. Microstrain сотрудничает с компанией Smart Material (www.smart-material.com).

Интеграция энергохарвестеров с сенсорными узлами — основа для новых разработок. Встроенные датчики стремятся к миниатюризации, а мощность, вырабатываемая энергохарвестерами, соответствует их размерам. Так, большие солнечные панели способны давать гигаватты мощности, но для сенсорных узлов интересны генераторы уровней мощности до 100 мВт и малых размеров. Не вдаваясь в детали, отметим, что для работы энергохарвестеров необходима аппаратная основа и настройка.

Nextreme Thermobility WPG-1 — генератор мощности на основе коммерчески доступной технологии, отмеченный как заслуживающий упоминания в категории Sensors на прошедшем в июне 2011 года мероприятии Sensors Expo & Conference.

Thermobility представляет собой новую тонкопленочную термоэлектрическую технологию, которая основана на использовании тепла, точнее разницы температур, в качестве источника электричества для питания маломощных приборов [30].

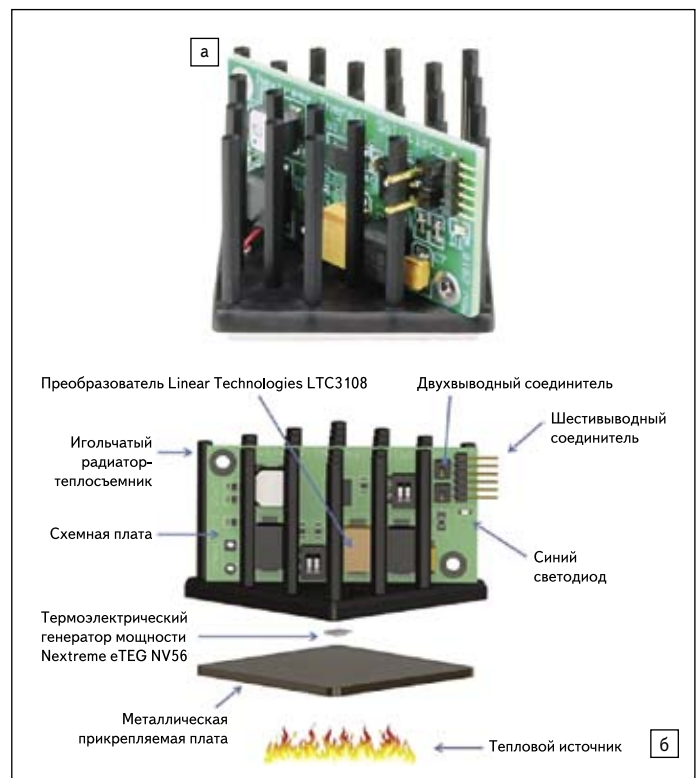


Рис. 13. Thermobility WPG-1 Nextreme Thermal Solutions: а) внешний вид; б) устройство

Для создания полностью автономного узла потребуются беспроводной передатчик.

Thermobility WPG-1 обеспечивает постоянный выход напряжения в 3,3; 4,1 или 5,0 В для электрической нагрузки 15 кОм или выше (рис. 13).

WPG-1 состоит из платы, теплового источника, термоэлектрического модуля Nextreme eTEG HV56 и металлической платы, прикрепляемой к источнику тепла. Модули eTEG рекомендованы для питания датчиков газа, заряда беспроводных датчиков в темноте или труднодоступных местах, для повышения топливной эффективности автомобилей. HV56 продемонстрировали выход мощности в 1,5 мВт.

В будущем Nextreme планирует расширение функций платформы Thermobility, включая интегрированный запас энергии от различных тепловых источников.

Миниатюризация энергохарвестеров до уровней МЭМС или нано открывает большие перспективы для их системной интеграции с сенсорными узлами. Один из примеров питания МЭМС-датчика от радиоволн был описан в [31].

Компания IMEC разработала МЭМС-технология, совместимую со CMOS, — для производства пьезоэлектрических вибрационных энергохарвестеров и представила первый прототип полностью автономного беспроводного датчика температуры, питаемого от вибрации (рис. 14) [32–33]. Достигнут уровень выхода мощности энергохарвестера в 85 мкВт, а потребление мощности датчиком снижено до 10 мкВт. Устройство включает кремниевую массу, подвешенную на балке с пьезоэлектрическим материалом AlN. Принцип работы — резонансный.

Заключение

Таким образом, выход на следующий уровень измерений в контексте этой публикации означает повышение качества решения отдельно взятой измерительной задачи, но не только.

Это также означает увеличение числа осей детектирования и степеней свободы в 3D-измерении. Для системы со многими степенями свободы в качестве основного средства контроля принимается программный подход. Программная надстройка — это слой верхнего уровня по отношению к аппаратной части датчиков.

Выход на следующий уровень означает также повышение характеристик и надежности датчиков, реализованное на новом технологическом уровне, причем с применением технологий различного уровня интеграции (макро-, микро-, нано-).

Системная интеграция, интеллектуальность узлов — это шаг вперед на пути к автономии сенсорных узлов. Распределенные беспроводные сенсорные системы дают большие возможности для их развертывания

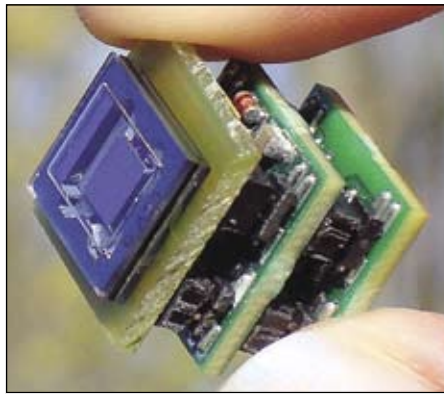


Рис. 14. Полностью автономный датчик температуры, питающийся от МЭМС вибрационного энергохарвестера IMEC

в труднодоступных местах, поэтому встраивание в узлы средств беспроводной коммуникации и автономного питания — следующие закономерные эволюционные этапы в развитии технологий.

Результат эволюции — более полные и всеобъемлющие измерения, новые, более интеллектуальные и даже полностью автономные сенсорные системы и узлы, новые уровни, слои. То есть новые сенсорные решения на новом уровне системной интеграции.

Литература

1. Сысоева С. Мир МЭМС. Дальнейшая конвергенция датчиков движения и смежных технологий на массовых рынках // Компоненты и технологии. 2011. № 6.
2. Сысоева С. Ключевые сегменты рынка МЭМС-компонентов. Инерциальные системы — от low-end до high-end сегментов // Компоненты и технологии. 2010. № 5.
3. Сысоева С. Ключевые сегменты рынка МЭМС-компонентов. Акселерометр // Компоненты и технологии. 2010. № 3.
4. Сысоева С. Датчики магнитного поля. Новые применения и технологии измерения движения и тока // Компоненты и технологии. 2011. № 3.
5. austriamicrosystems: www.austriamicrosystems.com
6. Hoffmann & Krippner, Inc.: www.hoffmann-krippner.com
7. Synkera Technologies, Inc.: www.synkera.com
8. InvenSense: www.invensense.com
9. STMicroelectronics: www.st.com
10. Freescale: www.freescale.com
11. Movea: www.movea.com
12. Hillcrest Labs: www.hillcrestlabs.com
13. Analog Devices, Inc. (ADI): www.analog.com
14. Endevco: www.endevco.com
15. Colibrys: www.colibrys.com
16. Сысоева С. Введение в High-End сегменты применений MEMS-технологии. Часть 3 // Компоненты и технологии. 2010. № 12.
17. HP Labs: www.hpl.hp.com
18. <http://www.hp.com/hpinfo/newsroom/press/2010/100215xa.html>
19. http://www.shell.us/home/content/usa/aboutshell/media_center/news_and_press_releases/2011/03232011_hp.html
20. <http://electronicdesign.com/article/analog-and-mixed-signal/HP-And-Shell-Prepare-Advanced-Geophysical-Seismic-Sensing.aspx>
21. Сысоева С. Введение в High-End сегменты применений MEMS-технологии. Часть 2 // Компоненты и технологии. 2010. № 11.
22. Sensoror Technologies: www.sensoror.com
23. Acuity, Inc.: <http://acuitymicro.com>
24. Honeywell: http://sensing.honeywell.com/index.cfm/ci_id/156182/la_id/1.htm
25. Libelium: www.libelium.com
26. Microstrain: www.microstrain.com
27. <http://www.sensorcloud.com>
28. <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/perpetuum-a-vibration-harvesting-company-00001274.asp>
29. Perpetuum: www.perpetuum.com.
30. Nextreme Thermal Solutions: www.nextreme.com.
31. Сысоева С. Новые мосты в дорожной карте эволюции МЭМС, 3D-ИС и нанотехнологий // Компоненты и технологии. 2010. № 6.
32. IMEC: www.imec.be
33. http://www2.imec.be/be_en/press/imec-news/micromachined-piezoelectric-harvester-with-record-power-autonomous-wireless-sensor.html
34. MicroGen Systems, Inc.: www.microgensystems.com
35. Infinite Power Solutions, Inc.: www.infinitepowersolutions.com

Компании MicroGen Systems, Inc. (www.microgensystems.com) и Infinite Power Solutions, Inc. (www.infinitepowersolutions.com) на выставке Sensors Expo 2011 продемонстрировали полностью беспроводное сенсорное решение в масштабах сети (Wireless Sensor Network, WSN), для питания которого были применены технологии МЭМС.

BOLT060 — это пьезоэлектрический вибрационный энергохарвестер (Piezoelectric Vibrational Energy Harvester, PZEH) от MicroGen. Он представляет собой устройство на кремниевом кристалле площадью 1,0 см² или менее, дающее выход мощности до 200 мкВт. Это первый пример коммерческого устройства для сбора энергии вибрации, основанного на технологиях МЭМС [34–35]. PZEH включен в оценочный комплект THINERGY IPS-EVAL-EH-01 Energy Harvesting Evaluation Kit от IPS со специальной микросхемой MAX17710 компании Maxim (www.maxim-ic.com).