

# Акселерометры и гироскопы для портативных устройств

Николай Савенко (Санкт-Петербург)

Среди разработчиков портативных устройств с инерциальными датчиками сегодня наблюдается растущий спрос на компактные, малопотребляющие, точные датчики. В статье представлен ряд новых изделий от основных производителей микроэлектронных инерциальных датчиков и показаны пути эволюции данной категории датчиков.

В настоящее время в области компактных механических инерциальных датчиков стала доминировать микроэлектромеханическая технология (MEMS). Технология MEMS подразумевает изготовление на кристалле кремния микроскопических подвижных элементов и при совмещении с микроэлектронными технологиями позволяет создавать очень компактные, надёжные, простые с точки зрения применения датчики, и не просто датчики, а «системы на кристалле» высокой степени интеграции. Эта технология разрабатывалась в течение нескольких десятилетий, прежде чем стала коммерческой (примерно с начала 90-х годов прошлого века) и её плоды стали доступны потребителю. Сейчас она освоена и улучшена многими производителями, продолжает бурно развиваться и совершает переворот во многих областях техники.

Стоит отметить, что технология MEMS применяется не только для создания датчиков; её возможности чрезвычайно широки. Интересующимся можем порекомендовать статью [1], а мы вернёмся к обзору датчиков.

Одним из первых коммерческих производителей акселерометров MEMS стала фирма Analog Devices, которая начиная с 1993 г. поставила на рынок уже более 200 миллионов акселерометров и продолжает их поставлять. Акселерометры в очень больших количествах потребляет современная автомобильная промышленность. Здесь микроэлектромеханические приборы применяются в качестве датчиков столкновения для активации подушек безопасности (SRS). В таких областях особенно ценится высокая надёжность микроэлектромеханических датчиков.

По мере развития технологии появились более чувствительные и точные приборы, и их области применения стали расширяться. В частности, сейчас очень часто чувствительные акселерометры применяются в качестве датчиков наклона (инклинометров). Отметим также некоторые другие более или менее характерные примеры применения акселерометров в современной промышленной и бытовой технике:

- датчики систем сигнализации, в частности автомобильных. В таких системах акселерометры с успехом детектируют наклон и вибрацию [5];
- системы мониторинга вибрации в промышленности;
- системы балансировки белья в современных стиральных машинах по уровню вибрации при отжиме;
- устройства ввода данных (манипуляторы) для портативных устройств типа PDA или сотовых телефонов;
- системы стабилизации положения стрел кранов, экскаваторов, буровых установок и т.д.;
- системы оповещения о землетрясениях.

В начале нынешнего века появились первые гироскопы (датчики угловой скорости), изготовленные по технологии MEMS. Здесь также одним из лидеров является фирма Analog Devices, предложившая портативные гироскопы ADXR150 и ADXR300. Эти приборы выдают напряжение, пропорциональное скорости вращения. Такие гироскопы можно применять и в качестве датчиков направления, если интегрировать сигнал угловой скорости; хотя при этом довольно быстро накапливается погрешность.

Компактные гироскопы используются в таких системах, как:

- схемы стабилизации изображения в цифровых фотоаппаратах, видеокамерах, встроенных камерах сотовых телефонов;
- автомобильные системы (динамическое управление движением автомобиля, антиблокировочные системы торможения, круиз-контроль, датчики переворота в системах безопасности);
- системы навигации. Гироскоп в составе автомобильной навигационной системы с GPS-приёмником позволяет сохранить точность навигации в течение нескольких минут при потере приёма сигнала со спутника. Например, при въезде в туннель или лес или в условиях плотной городской застройки довольно часто происходит потеря приёма; обычно не превышающая 2...3 мин. Применение гироскопа позволяет сделать навигацию непрерывной;
- устройства ввода информации, манипуляторы и т.д.;
- системы стабилизации стрел башенных кранов и т.п.;
- игрушки, роботы;
- беспилотные летательные аппараты. Очень интересный пример робота-БПЛА был продемонстрирован фирмой Epson [3]. В этом устройстве был применён ультракомпактный гироскоп XV-3500CB фирмы Epson.

Итак, перейдём к обзору наиболее интересных и современных портативных инерциальных датчиков, ожидаемых или уже представленных сегодня на рынке.

## ANALOG DEVICES

Одним из крупнейших производителей акселерометров и гироскопов (датчиков угловой скорости) является фирма Analog Devices. Эта фирма вот уже около 15 лет поставляет датчики, изготовленные по технологии iMEMS, и смогла захватить значительную часть рынка благодаря, в частности, значительным вложениям в научные исследования и высокому качеству продукции.

Технология производства постоянно развивается. Среди новшеств сто-

ит отметить герметизацию кристаллов микромеханических датчиков на стадии кремниевой пластины. В ходе технологического процесса на каждый датчик приваривается «крышка» из поликристаллического кремния (см. рис. 1).

Таким образом, герметизация производится ещё до разделения пластины на кристаллы и помещения кристаллов в корпус. Такой подход позволил повысить качество продукции и одновременно снизить её стоимость за счёт использования дешёвых корпусов, т.к. от корпуса герметичности уже не требуется.

Среди новинок хочется отметить двухосевые акселерометры с выходом по напряжению ADXL320 и ADXL321, их функциональная схема приведена на рис. 2. Это компактные, мало потребляющие приборы с аналоговым выходом. Их динамические диапазоны соответственно  $\pm 5g$  и  $\pm 18g$ ; в остальном это однотипные приборы, их характеристики приведены ниже (здесь и далее  $g$  обозначает ускорение свободного падения  $9,8 \text{ м/с}^2$ ,  $mg$  соответственно равно  $1/1000g$ ). Основные параметры датчиков:

- двухосевые;
- динамический диапазон  $\pm 5g$  (ADXL320) и  $\pm 18g$  (ADXL321);
- разрешающая способность 2 мг (ADXL320) и 3 мг (ADXL321) на частоте 60 Гц;
- однополярное напряжение питания 2,4...5,25 В;
- малое энергопотребление: 350 мкА (тип.) при  $V_{пит} = 2,4 \text{ В}$ ;
- высокая стабильность нуля;
- высокая точность коэффициента преобразования;
- погрешность ортогональности осей X и Y не более  $\pm 0,1^\circ$  (тип.);
- полоса устанавливается конденсатором RC-цепочки;
- выдерживает ускорение до 10 000g;
- корпус LFCSP  $4 \times 4 \times 1,45 \text{ мм}$ .

Очень интересный и перспективный новый прибор – это трёхосевой акселерометр ADXL330 с динамическим диапазоном  $\pm 2g$ . Функциональная схема датчика аналогична приведенной на рис. 2, но отличается наличием третьего канала. Характеристики акселерометра ADXL330:

- трёхосевой датчик;
- динамический диапазон  $\pm 2g$ ;
- чувствительность 300 мВ/g;
- однополярное напряжение питания 2...3,6 В;

- малое энергопотребление: 200 мкА (тип.) при  $V_{пит} = 2 \text{ В}$ ;
- высокая стабильность нуля;
- высокая точность коэффициента преобразования;
- полоса устанавливается конденсатором RC-цепочки;
- выдерживает ускорение до 10 000g;
- выпускается в обычном и бессвинцовом исполнении;
- корпус LFCSP  $4 \times 4 \times 1,45 \text{ мм}$ .

Среди гироскопов фирмы Analog Devices один из наиболее современных и точных – однокристалльный гироскоп ADXRS401. Функциональная схема датчика приведена на рис. 3. Этот датчик угловой скорости продолжает линию гироскопов ADXRS150/300. Приведём его основные характеристики:

- динамический диапазон скорости вращения:  $\pm 75 \text{ град/с}$ ;
- чувствительность 15 мВ/град/с;
- полоса частот 40 Гц;
- спектральная плотность шума выходного сигнала, пересчитанная на скорость вращения, –  $0,05 \text{ град/с}/\sqrt{\text{Гц}}$ ;

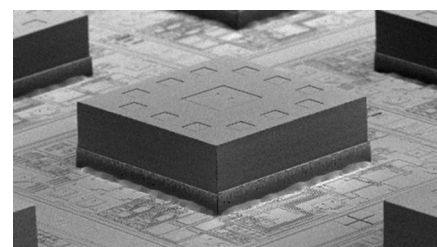


Рис. 1. «Крышка» из поликристаллического кремния, закрывающая микромеханический датчик

- нелинейность 0,1%;
- встроенный температурный датчик и источник опорного напряжения;
- напряжение питания 4,75...5,25 В;
- потребляемый ток 6 мА;
- рабочий температурный диапазон  $-40...+85^\circ\text{C}$ ;
- встроенная схема автотестирования;
- встроенный температурный датчик;
- корпус 32-выводной BGA.

Новая линия инерционных датчиков Analog Devices – это серия высокоинтегрированных приборов со смешанными сигналами ADIS. Главные достоинства датчиков ADIS заключаются в наличии встроенной

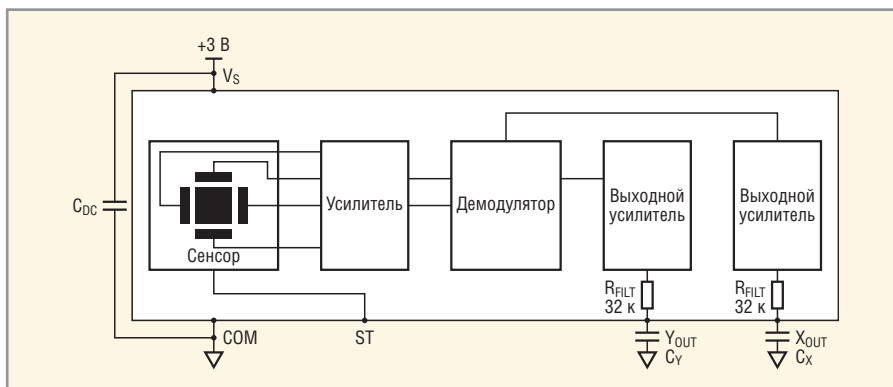


Рис. 2. Функциональная схема двухосевых акселерометров с аналоговыми выходами ADXL320/ADXL321

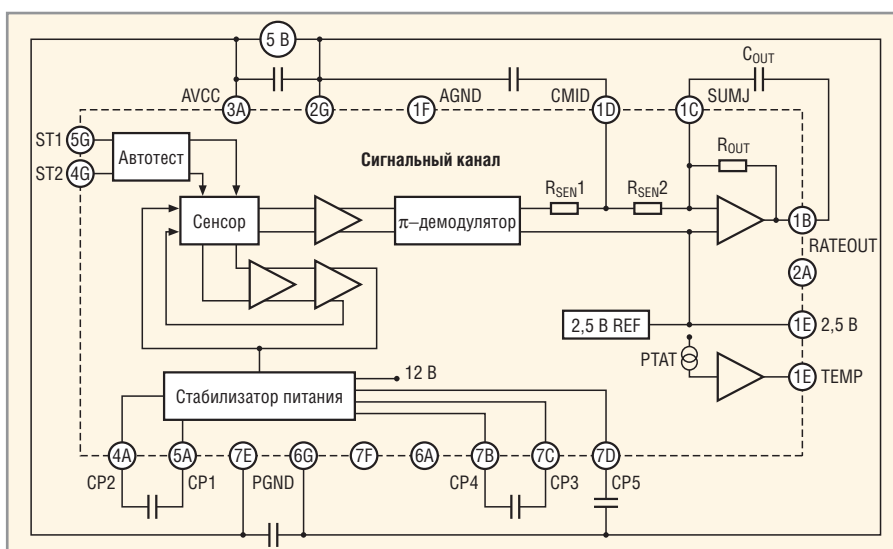


Рис. 3. Функциональная схема гироскопа с аналоговым выходом ADXRS401

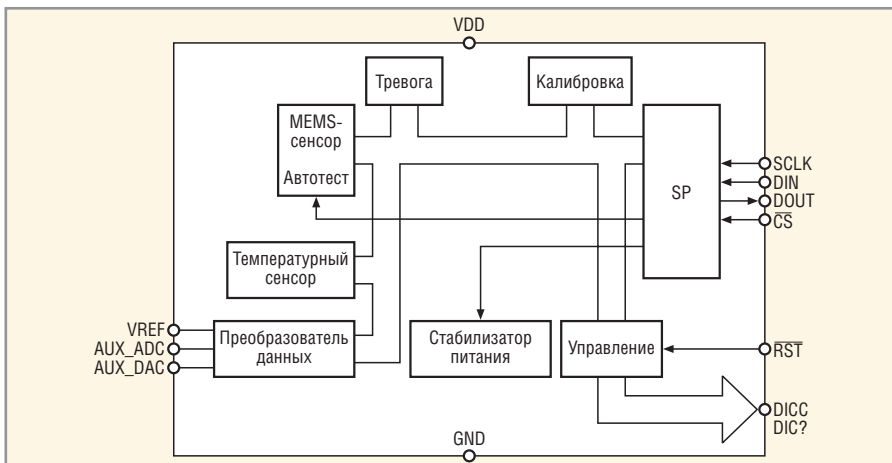


Рис. 4. Функциональная схема акселерометра-инклинометра с цифровым выходом ADIS16201

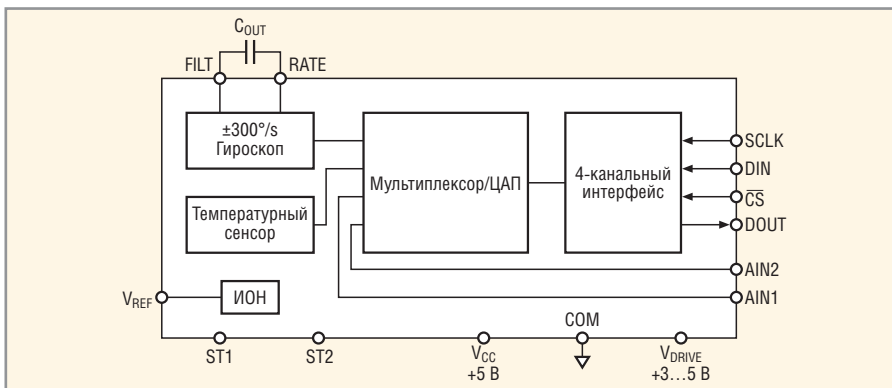


Рис. 5. Функциональная схема гироскопа с цифровым выходом ADIS16100

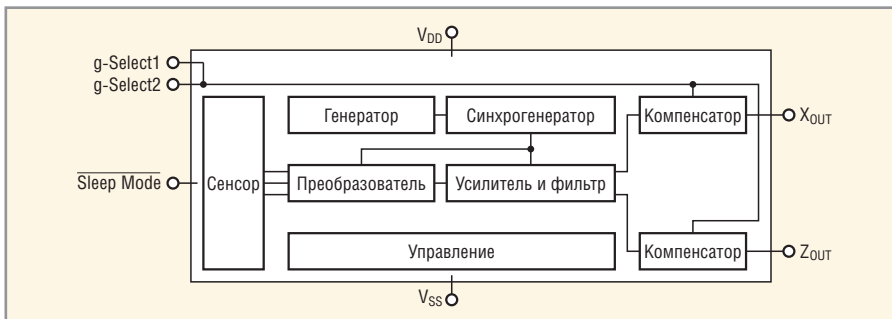


Рис. 6. Функциональная схема двухосевого акселерометра с аналоговым выходом MMA6280Q

схемы оцифровки сигнала, контроллера и последовательного интерфейса SPI, через который осуществляется считывание цифрового кода, значения температуры, управление режимами работы датчиков и их калибровка. Датчики серии ADIS весьма удобны в применении при прямом подключении к хост-микроконтроллеру.

Интересный представитель этой новой серии датчиков – акселерометр-инклинометр ADIS16201 (рис. 4). Его основные характеристики:

- двухосевой;
- 12-разрядный цифровой код на выходе;
- динамический диапазон  $\pm 1,7g$ ;
- 10-разрядный код от температурного датчика;
- чувствительность, смещение, частота отсчётов, АЧХ программируются посредством цифрового интерфейса;
- программируются уровни срабатывания сигнала Alarm;
- имеются встроенные средства автотестирования;
- имеется режим отключения (shutdown);
- высокоскоростной интерфейс SPI;
- дополнительный 4-разрядный порт;
- 12-разрядный ЦАП, 12-разрядный АЦП;
- напряжение питания 3...3,6 В;
- рабочий температурный диапазон  $-40...+125^{\circ}C$
- корпус LGA  $9 \times 9$  мм.

Прибор имеет массу полезных достоинств, но, пожалуй, самое уникальное – что этот прибор выдаёт цифровой код, соответствующий углу наклона, а не просто проекции ускорения силы тяжести на ось чувствительности, как это свойственно обычным акселерометрам. Понятно, что это обеспечивает удобство в применении и освобождает процессор от пересчёта значения ускорения в значение угла, то есть от вычисления арксинуса.

Ещё один новый прибор фирмы Analog Devices – гироскоп с цифровым интерфейсом ADIS16100 (рис. 5). Его основные характеристики:

- полностью интегрированный гироскоп на одном кристалле;
- цифровой интерфейс SPI;
- величина кода пропорциональна скорости вращения;
- чувствительность 4,1 LSB/град/с (LSB – единица младшего разряда выходного кода);
- встроенные средства автотестирования;
- встроенный температурный датчик;
- два внешних входа АЦП;
- однополярное питание 5 В,
- корпус  $8 \times 8$  мм.

## FREESCALE SEMICONDUCTOR (MOTOROLA)

Фирма Freescale Semiconductor (подразделение фирмы Motorola) также является одним из лидеров в области MEMS, весьма давно занимается разработками в данной области и сейчас для производства датчиков использует поверхностную и объёмную микромеханическую технологии. В числе новых приборов – двухосевые и трёхосевые датчики ускорения [6]. В качестве примера приведём новый двухосевой датчик MMA6280Q (рис. 6). Его особенности:

- двухосевой датчик ускорения;
- выбор одного из четырёх значений чувствительности/динамического диапазона: 1,5g/2g/4g/6g;
- малое энергопотребление: 500 мкА;
- энергопотребление в режиме ожидания: 3 мкА;
- напряжение питания: 2,2...3,6 В;
- корпус QFN размером  $6 \times 6 \times 1,45$  мм.

Ещё один новый прибор фирмы Freescale Semiconductor – трёхосевой акселерометр MMA7261Q. Его структурная схема отличается от приведённой на рис. 6 только наличием третьего канала. Особенности данного прибора:

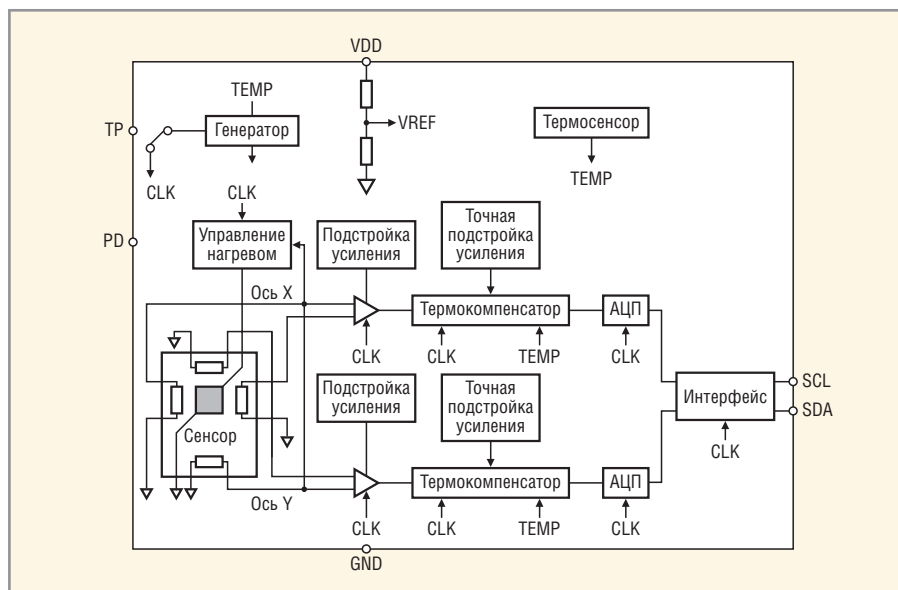


Рис. 7. Функциональная схема двухосевого акселерометра с интерфейсом I<sup>2</sup>C MXC6202

- трёхосевой датчик ускорения;
- выбор одного из четырёх значений чувствительности/динамического диапазона: 2,5g/3,3g/6,7g/10g;
- малое энергопотребление: 500 мкА;
- энергопотребление в режиме Sleep: 3 мкА;
- напряжение питания: 2,2...3,6 В;
- корпус типа QFN 6 × 6 × 1,45 мм;
- время включения: 1 мс.

## MEMSIC

Весьма известная фирма на рынке MEMS, целиком специализируется на этой продукции [7]. Один из наиболее популярных и современных датчиков этой фирмы – двухосевой акселерометр MXC6202 (рис. 7). Характеристики этого прибора:

- двухосевой датчик ускорения;
- встроенные средства оцифровки и интерфейс I<sup>2</sup>C;
- динамический диапазон: ±2g;
- чувствительность: 512 LSB/g;
- температурный диапазон: –40...+85°C;
- имеются встроенные средства автотестирования;
- встроенный датчик температуры;
- напряжение питания: 2,7...3,6 В;
- энергопотребление менее 2 мА при напряжении питания 3,0 В;
- корпус LCC размером 5 × 5 × 1,55 мм.

## ST MICROELECTRONICS

Фирма ST Microelectronics выпускает ряд малопотребляющих двух- и трёхосевых акселерометров. Кроме того, эта фирма предлагает ряд своеобразных приборов – датчиков углового ускорения. На рис. 8 показан

датчик углового ускорения со встроенным АЦП и цифровым выходом. Этот прибор построен на основе сигма-дельта архитектуры, имеет встроенный цифровой фильтр-дециматор. Приводим его характеристики:

- чувствительность: 2,5 рад/с<sup>2</sup>;
- 8-разрядный АЦП;
- полоса частот: 800 Гц;
- динамический диапазон: 200 рад/с<sup>2</sup>;
- трёхпроводной цифровой интерфейс;
- напряжение питания: 3,3 В.

Ещё один новый датчик фирмы ST Microelectronics – трёхосевой акселерометр LIS3L06AL для малых значений ускорения с выходом по напряжению (рис. 9). Особенности датчика:

- напряжение питания: 2,4...3,6 В;
- энергопотребление: 1 мА;
- выбираемый динамический диапазон: ±2g или ±6g;
- разрешающая способность: 0,5 мг в полосе 100 Гц;
- встроенные средства автотестирования.

## EPSON

Фирма Epson представила на рынке гироскоп XV-3500CB, который, возможно, на сегодня является самым маленьким гироскопом: его размеры 5 × 3,2 × 1,5 мм. Этот гироскоп сделан с помощью пьезотехнологии. Его основные особенности и характеристики:

- энергопотребление: 2,7 мА;
- напряжение питания: 2,7...3,3 В;
- рабочая температура: –20...+80°C;
- выходное напряжение в неподвижном состоянии: 1,35 В;

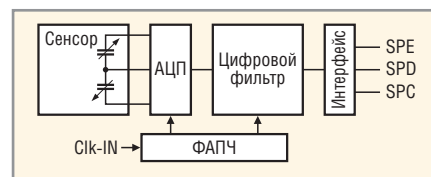


Рис. 8. Функциональная схема датчика углового ускорения с цифровым интерфейсом LIS1R02

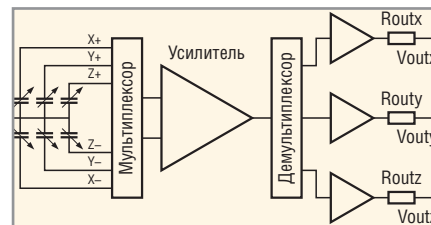


Рис. 9. Функциональная схема трёхосевого акселерометра с аналоговыми выходами LIS3L06AL

- динамический диапазон: ±100 град/с;
- чувствительность: 0,67 мВ/град/с;
- линейность: ±5%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На рынке микромеханических датчиков в настоящее время наблюдается довольно бурный рост, вызванный, с одной стороны, повышением спроса, а с другой стороны – конкуренцией между основными поставщиками. Ассортимент портативных инерциальных датчиков довольно велика этот выбор между ними довольно сложен. Необходимо учитывать много различных параметров, причём эти параметры зачастую нормируются разными производителями по-разному. Цель данной статьи – в первую очередь, познакомить читателя с основными игроками на рынке микромеханических датчиков. Для более полного ознакомления с продукцией упомянутых в статье фирм советуем обратиться к приведённым ниже ссылкам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.bytemag.ru/?ID=606646>.
2. [http://www.analog.com.ru/pub\\_imems.htm](http://www.analog.com.ru/pub_imems.htm).
3. [http://www.epson.co.jp/e/newsroom/news\\_2004\\_08\\_18.htm](http://www.epson.co.jp/e/newsroom/news_2004_08_18.htm).
4. <http://www.analog.com/iMEMS>.
5. [http://www.analog.com/Uploaded-Files/Application\\_Notes/50324364571097434954321528495730car\\_app.pdf](http://www.analog.com/Uploaded-Files/Application_Notes/50324364571097434954321528495730car_app.pdf).
6. [http://www.freescale.com/webapp/sps/library/prod\\_lib.jsp](http://www.freescale.com/webapp/sps/library/prod_lib.jsp).
7. [http://www.memsic.com/memsic/products/productselector\\_app.asp](http://www.memsic.com/memsic/products/productselector_app.asp).
8. <http://www.st.com/stonline/products/families/sensors/accelerometers.htm>.

