

Новые акселерометры компании STMicroelectronics

Анатолий ЮДИН,
к. т. н.

В статье рассматриваются основные характеристики и особенности новых датчиков ускорения движения (акселерометров) компании STMicroelectronics, а также возможные области их применения.

Большинство интегральных акселерометров производится по технологии MEMS (микроэлектромеханических систем) и представляет собой датчики линейного ускорения. В этом качестве они используются для измерения углов наклона тел, сил инерции, ударных нагрузок и вибрации. Эти устройства находят широкое применение на транспорте, в медицине, промышленных системах измерения и управления, инерциальных системах навигации. Особенную долю рынка MEMS-акселерометров составляют компьютерные и коммуникационные устройства. Так, например, смартфоны компании Nokia построены на основе чипа компании STMicroelectronics модели LIS302DL.

Сегодня на рынке MEMS-акселерометров доминирует большая тройка производителей: Analog Devices, Freescale и STMicroelectronics.

Компания STMicroelectronics успешно развивает свою собственную технологию производства MEMS на базе поликристаллического кремния. Сенсорный элемент датчиков ST, способный детектировать ускорение, производится с использованием процесса, получившего название THELMA (Thick Epi-Poly Layer for Microactuators and Accelerometers), который позволяет создавать поверхностные микромеханические структуры, прикрепляемые к подложке в нескольких анкерных точках и способные перемещаться в плане структуры. Эквивалентная схема сенсорного элемента представляет собой полумост, разбаланс которого при ускорении измеряется посредством интеграции заряда чувствительного конденсатора, питаемого импульсами напряжения. Номинальное значение рабочей емкости — несколько пикофарад, под действием ускорения максимальные вариации емкостной нагрузки

составляют до 100 пФ [1]. Основные этапы развития и особенности технологии MEMS THELMA STMicroelectronics подробно изложены в трудах специалистов компании [3].

Акселерометры STMicroelectronics выпускаются в малоразмерных корпусах, в которые интегрированы сенсорный элемент и кристалл ASIC с аналоговым или цифровым интерфейсом SPI/I²C. Текущая линейка акселерометров STMicroelectronics, рекомендованных для новых проектов (табл. 1), постоянно пополняется новыми изделиями, отражающими потребности рынка. В таблице красным цветом выделены новинки 2008 г., которые далее мы рассмотрим подробнее.

STMicroelectronics производит двух- и трехосевые линейные акселерометры двух видов — с аналоговым (рис. 1) и цифровым выходом (рис. 2).

Таблица 1. Акселерометры ST

Обозначение	Статус	Корпус	Краткое описание	Напряжение питания (Vcc)			Резонансная частота		Чувствительность	Пределы диапазона ускорения		Выходное напряжение 0G
				мин.	тип.	макс.	тип.	мин.		ном.	макс.	
				В	В	В	Гц	Гц	В/г	г	г	В
AIS226DS	План	SO16L	Инерциальный MEMS-датчик, 2 оси, акселерометр слабого ускорения с цифровым выходом для автомобильных применений	3	3,3	3,6	—	—	—	6	2	—
AIS326DQ	Пр-во	QFPN 28 7×7×1,9	Инерциальный MEMS-датчик, 3 оси, акселерометр слабого ускорения с цифровым выходом для автомобильных применений	3	3,3	3,6	—	—	—	6	2	—
LIS202DL	Пр-во	LGA 14L 3×5×1	MEMS датчик движения, из семейства «пикколо», 2 оси, акселерометр ускорения ±2/±8 г с цифровым смартвыходом	2,16	2,5	3,6	2000	—	—	8	2	—
LIS244AL	Пр-во	LLGA 16L 4×4×1,5	MEMS датчик движения, 2 оси, акселерометр ускорения до ±2 г с аналоговым выходом	2,4	3	3,6	—	4000	0,42	—	2	1,5
LIS244ALH	Пр-во	LLGA 16L 4×4×1,5	Прецизионный инерциальный MEMS-датчик, 2 оси, ультракомпактный линейный акселерометр ускорения до ±6 г	2,4	3,3	3,6	—	2000	0,66	6	2	—
LIS302ALK	Анонс	LGA 14L 3×5×1	MEMS датчик движения, из семейства «пикколо», 3 оси, акселерометр ускорения до ±2 г с аналоговым выходом	3	3,3	3,6	—	2000	0,44	2	—	1,235
LIS302DL	Пр-во	LGA 14L 3×5×1	MEMS датчик движения, из семейства «пикколо», 3 оси, акселерометр ускорения ±2/±8 г с цифровым смартвыходом	2,16	2,5	3,6	2000	—	—	8	2	—
LIS302SG	Пр-во	LGA 14L 3×5×1	MEMS датчик движения, из семейства «пикколо», 3 оси, акселерометр ускорения до 2 г с аналоговым выходом	3	3,3	3,6	—	2000	0,478	—	2	1,65
LIS331AL	Пр-во	LLGA 16L 3×3×1,0	Инерциальный MEMS-датчик из семейства «нано», 3 оси, акселерометр ускорения до ±2 г с аналоговым выходом	3	3,3	3,6	—	2000	0,478	—	2	1,65
LIS331DL	Пр-во	LLGA 3×3×1,0 16L	MEMS датчик движения из семейства «нано», 3 оси, акселерометр ускорения ±2/±8 г с цифровым смартвыходом	2,16	2,5	3,6	2000	—	—	8	2	—
LIS331DLF	Развитие образцы	LLGA 16L 3×3×1,0	MEMS датчик движения со сверхмалым потреблением, 6-разрядный, 3-осный акселерометр с цифровым смартвыходом	—	—	—	—	—	—	—	—	—
LIS331DLH	Пр-во	LLGA 16L 3×3×1,0	Прецизионный MEMS-датчик движения со сверхмалым потреблением, 3 оси, с цифровым смартвыходом	—	—	—	—	—	—	—	—	—
LIS331DLM	Развитие образцы	LLGA 16L 3×3×1,0	MEMS датчик движения со сверхмалым потреблением, 8-разрядный, 3-осный акселерометр с цифровым смартвыходом	—	—	—	—	—	—	—	—	—
LIS344AL	Пр-во	LLGA 4×4×1,5 16L	Инерциальный MEMS-датчик, очень компактный 3-осный линейный акселерометр	2,7	3	3,3	—	2000	0,3	—	3,5	—
LIS344ALH	Пр-во	LLGA 16L 4×4×1,5	Прецизионный инерциальный MEMS-датчик, очень компактный 3-осный линейный акселерометр ускорения ±2/±6 г	2,4	3,3	3,6	—	1800	0,66	6	2	—
LIS3LV02DL	Пр-во	LGA 16L 4,4×7,5×1	Линейный 3-осный акселерометр ускорения ±2/±6 г с цифровым SPI/I ² C интерфейсом	2,16	2,5	3,6	—	—	—	6	2	—
LIS3LV02DQ	Пр-во	QFPN28 7×7×1,9	Линейный 3-осный акселерометр ускорения ±2/±6 г с цифровым SPI/I ² C интерфейсом	2,16	2,5	3,6	—	—	—	6	2	—

Особенности датчиков с аналоговым выходом:

- аналоговый выход и дополнительный мультиплексированный выход;
- 2 или 3 чувствительные оси;
- устанавливаемый пользователем диапазон измерения: $\pm 2,0$ или $\pm 6,0$ g;
- энергосберегающий режим: < 10 мкА;
- разрешающая способность выше 0,5 mg;
- низкий ток потребления: < 1 мА;
- встроенная схема самотестирования;
- широкий диапазон температур: $-40 \dots 85$ °C;
- заводская калибровка параметров;
- высокая стрессоустойчивость: до 10 000 g;
- высокие температурная стабильность и срок службы;
- стандартные и сверхминиатюрные корпуса.

Особенности датчиков с цифровым выходом:

- I²C/SPI-интерфейсы;
- программируемый пользователем диапазон измерения и скорость передачи данных;
- разрешающая способность лучше 1,0 mg (12-битный АЦП);
- возможность выхода из спящего режима при заданном пользователем пороговом ускорении;
- широкий диапазон температур: $-40 \dots 85$ °C;
- заводская калибровка параметров;
- высокая стрессоустойчивость: до 10 000 g;
- высокие температурная стабильность и срок службы;
- сверхминиатюрные корпуса.

В апреле 2008 года номенклатура датчиков STMicroelectronics пополнилась двумя новыми акселерометрами с программируемым диапазоном измерений $\pm 2/ \pm 6$ g в корпусах типа LGA размером $4 \times 4 \times 1,5$ мм, для приложений, где требуются малые размеры и высокое качество.

Двухосевой LIS244ALH и трехосевой LIS344ALH акселерометры функционируют в режиме малого потребления, предлагают высокую точность и разрешение, что особенно важно при батарейном питании. Аналоговые выходы обеспечивают прямые измерения внешних воздействий, что позволяет разработчикам оптимизировать внешнюю фильтрацию и аналогово-цифровое преобразование. Выход микросхем имеет заводскую калибровку по чувствительности, но в то же время допускается окончательная калибровка в составе изготавливаемого прибора. Устройства имеют встроенную функцию самотестирования, которая проверяет функционирование самих датчиков, а также встроенный интерфейс, гарантирующий заявляемые параметры.

Оба устройства обеспечивают решения для обнаружения движения в приложениях, требующих минимальных размеров. Это могут быть сотовые телефоны, переносные аудио- и видеопроекторы, цифровые фото- или видекамеры, персональные навигационные устройства. В подобных приборах возможно использование режимов, включающих опре-

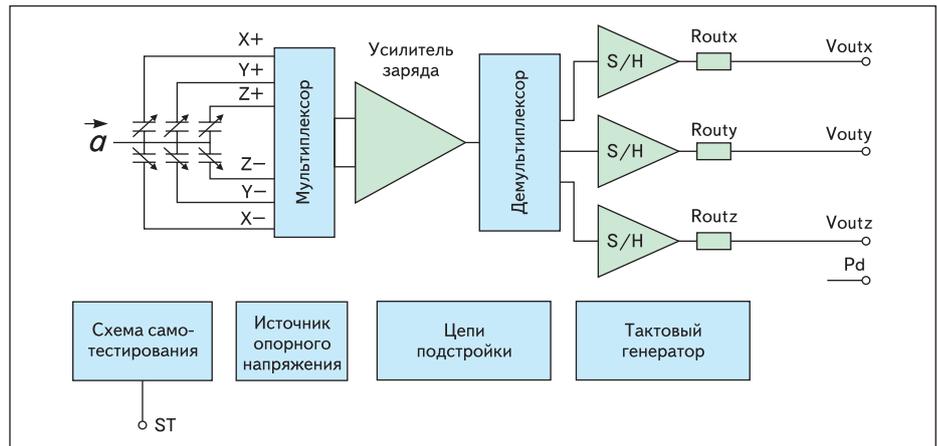


Рис. 1. Блок-схема акселерометра ST с аналоговым выходом

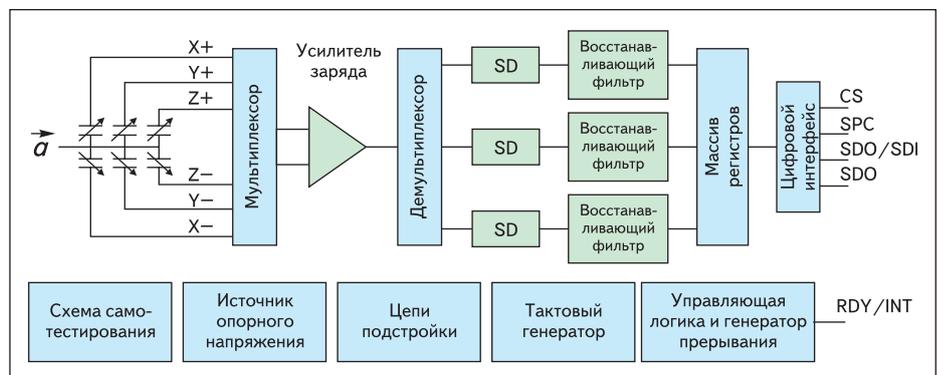


Рис. 2. Блок-схема акселерометра ST с цифровым выходом

деление свободного падения, интеллектуальный интерфейс пользователя и управление питанием, основанное на анализе движения, которое могло бы перевести прибор в спящий режим, в зависимости от его ориентации на поверхности. Дополнительные приложения могут включать в себя интерактивные игровые терминалы, противоугонные системы, спортивное оборудование и устройства из области медицинского оборудования. Широкий спектр диапазона рабочей температуры от -40 до $+85$ °C совместно с устойчивостью против удара при ускорении до 10 000 g гарантирует надежное функционирование датчиков при различных условиях использования.

В конце 2007 года компания STMicroelectronics, являющаяся одним из лидеров в производстве MEMS-устройств, анонсировала новое поколение «нано» трехосных линейных акселерометров LIS331xx. Эти универсальные, экономичные во всех отношениях, в том числе и по энергопотреблению, MEMS-датчики предлагают высокую гибкость и интеллектуальные встроенные свойства. Они полностью удовлетворяют растущие запросы на компактные устройства с детектированием перемещений для применения на потребительском и промышленном рынке.

Новые трехосевые датчики движения от ST — полностью собственная разработка

STMicroelectronics. Они размещаются в пластиковом миниатюрном корпусе размером $3 \times 3 \times 0,9$ мм, что позволяет решить задачи по уменьшению веса и габаритов в портативной электронике. Акселерометры LIS331xx имеют оптимальные характеристики при малом потреблении. Их сверхкомпактная и надежная конструкция устойчива к вибрациям и ударам до 10 000 g.

Датчики ускорений семейства «нано» компании STMicroelectronics подходят для широкого спектра приложений с малыми величинами ускорения в потребительской и промышленной электронике, включая пользовательский интерфейс на базе движений, игровые устройства, детекторы падения для защиты накопителей на жестких магнитных дисках, устройства мониторинга вибраций и их компенсации в бытовой электронике.

Акселерометр LIS331AL выполнен по схеме датчика с аналоговым выходом (рис. 1). Микросхема обеспечивает измерение индивидуальных значений ускорения для всех 3 осей. Датчик предлагает полномасштабный выходной диапазон ускорения от $\pm 2,0$ g при высокой температурной стабильности. Он имеет встроенную возможность самотестирования, которая позволяет пользователю проверить функционирование устройства после монтажа на печатную плату. Отме-

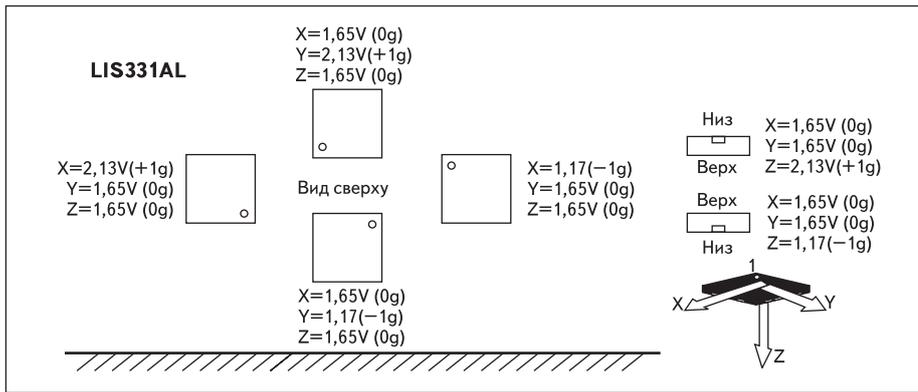


Рис. 3. Ориентация акселерометра LIS331AL в пространстве

тим, что направление координатных осей у акселерометров ST может различаться. Примеры значений выходных напряжений акселерометра LIS331AL, в зависимости от его ориентации в пространстве, показаны на рис. 3.

Акселерометр LIS331DL, функциональная схема которого изображена на рис. 2, имеет стандартный цифровой интерфейс SPI/I²C и интеллектуальные встроенные функции, включая распознавание двойного и одиночного «клика», функции автозапуска и детектирования движения. Есть также ВЧ-фильтры и две выделенных программируемых линии прерываний.

Акселерометр LIS331DL имеет выбираемую пользователем полную шкалу величины ускорения ± 2 и ± 8 g и способен измерять ускорение со скоростью передачи выходных данных 100 или 400 Гц.

Особенность устройства — наличие двух независимых, программируемых сверху-вниз источников прерывания, каждый из которых может быть сконфигурирован для генерации инерциального сигнала прерывания автозапуска при превышении программируемого порога ускорения по одной из трех осей в случае обнаружения свободного падения, щелчка («клика») или двойного «клика». Для этих целей предназначены два независимых выходных штырька, которые обеспечивают сигналы прерывания на связанные с акселерометром устройства.

Распознавание «клика» и двойного «клика» позволяет производителям связать простые движения с командами пользователя, например, включение/выключение устройства, открытие документа, перемещение по пунктам меню в приложениях, отключение звука звонящего мобильного телефона, при этом можно не доставать его из кармана.

Конфигурируемые ВЧ-фильтры могут быть включены для реализации функций, активируемых движением, и мониторинга вибрации независимо от положения устройства в момент измерения.

Два отдельных программируемых источника прерывания дают возможность немедленно реагировать на движение, а значит, про-

изводители получают больше свободы и гибкости в своих разработках и приложениях.

В ноябре 2008 г. компания STMicroelectronics расширила семейство акселерометров «нано», приступив к производству новых трех устройств — LIS331DLH, LIS331DLM и LIS331DLF. Это прецизионные трехосевые линейные акселерометры с цифровым выходом. Новые крошечные чипы размером $3 \times 3 \times 1$ мм отличаются способностью масштабирования, встроенными интеллектуальными возможностями и малым потреблением тока. Новые MEMS-акселерометры ST нацелены на широкий ряд приложений с малым ускорением, включая пользовательский интерфейс перемещения или шагомер в сотовых телефонах, игровые устройства, пульты дистанционного управления или портативные мультимедиа-проигрыватели, а также обнаружение свободного падения для защиты целостности данных приводов жестких дисков и мониторинга вибрации. Все три устройства — LIS331DLH, LIS331DLM и LIS331DLF — интегрируют на кристалле ряд встроенных интеллектуальных особенностей, включая режим пониженного потребления, функцию автозапуска, движение свободного падения и обнаружение 6D-ориентации, а также имеют стандартный цифровой интерфейс SPI/I²C. Комплект новых датчиков обеспечивает полную масштабируемость разрешающей способности. Разработчики могут выбрать 6-, 8- или 12-разрядное устройство. Микросхемы совместимы по выводам, параметрам перемещения, а также программно, что позволяет использовать их многократно для различных проектов без необходимости замены платы и программных драйверов. Акселерометры могут быть запрограммированы для работы в спящем режиме с автозапуском, при котором устройство поддерживает цепь считывания активности, потребляя менее чем 10 мкА, и автоматически пробуждается при наступлении события. В устройствах имеется конфигурируемый фильтр верхних частот, который может быть использован для допуска функций активации движения и мониторинга вибрации, независимо от того, в каком положении нахо-

дится прибор в момент измерения. Два отдельных программируемых сверху-вниз сигнала прерывания допускают немедленное уведомление о свободном падении, перемещении или событии 6D, что обеспечивает разработчикам достаточно свободы и гибкости при конструировании прикладных приложений. Новые акселерометры ST имеют большую производительность при малом потреблении мощности, а их миниатюрная устойчивая конструкция обеспечивает очень высокий иммунитет относительно вибрации и ударов при ускорении до 10 000 g. Наличие встроенной функции самоконтроля позволяет потребителю проверять функционирование датчика после размещения его на плате. Образцы акселерометров LIS331DLH, LIS331DLM и LIS331DLF уже доступны, а их полномасштабное производство планируется на начало 2009 года.

К общим основным особенностям данных акселерометров относятся:

- широкий диапазон питающего напряжения: от 2,16 до 3,6 В;
- совместимость входов/выходов с пониженным напряжением 1,8 В;
- несколько режимов понижения потребления тока: от 250 мкА в нормальном режиме работы и до 1–10 мкА в спящем режиме работы;
- динамично выбираемый пользователем диапазон ускорения $\pm 2/\pm 4/\pm 8$ g;
- цифровой выходной интерфейс I²C/SPI;
- два независимых программируемых прерывания, генерируемых для обнаружения свободного падения и движения;
- функция автозапуска из спящего режима;
- обнаружение ориентации 6D;
- встроенная функция самотестирования;
- высокая живучесть при шоковом ускорении до 10 000 g.

Выявленные основные отличия между этими тремя микросхемами [8–10] сведены в таблицу 2.

Микросхемы управляются непосредственно микроконтроллером. Из навесных компонентов рекомендуется задействовать только одну емкость на 10 мкФ и одну емкость 100 нФ.

Традиционно акселерометры STMicroelectronics предназначались для использования в жестких дисках компьютеров и других потребительских и промышленных приложениях. Поэтому до последнего времени все акселерометры ST специфицировались для промышленного диапазона рабочих температур от -40 до $+85$ °C. В этом году, откликаясь на потребности рынка компонентов для автоэлектроники, компания приступила к производству специализированных акселерометров с расширенным рабочим диапазоном температур от -40 до $+105$ °C. Кроме того, учитывая специфику этого рынка, первое такое устройство — AIS326DQ — упаковано в квадратный корпус QFPN-28, а второе устройство — AIS326DS — в корпус с планарными выводами SO16W.

AIS326DQ и AIS326DS — это трехосевые акселерометры с цифровым выходом, которые построены на принципе и схемотехнике цифрового датчика (рис. 2), уже рассмотренного нами.

Микросхема AIS326DQ имеет выбираемую пользователем полную шкалу ускорений ± 2 или ± 6 g и способна измерять ускорение при системной полосе пропускания свыше 640 Гц для всех осей. Полосу пропускания устройства можно выбирать в зависимости от требований, установленных для приложения. При этом выходная скорость данных может быть 40/160/640 или 2560 Гц. Чувствительность устройства находится в диапазоне от 316 до 1096 величины LSB/g, где 1 LSB = 1 g/1024 при дискретности 12 бит и полной шкале 2 g [11].

Разрешение по ускорению при шкале ± 2 g составляет от 1 до 15,5 mg в зависимости от частоты выходных данных. Гарантируемая устройством нелинейность при шкале ± 2 g и скорости выходных данных 40 Гц — не более $\pm 2\%$ по осям X, Y и не более $\pm 3\%$ по оси Z.

Встроенная возможность самоконтроля позволяет проверять функционирование системы после установки его на плате.

Акселерометр AIS326DQ рекомендуется ST для применения в следующих автомобильных приложениях:

- противоугонные системы и инерциальная навигация;
- функции активации движением;
- мониторинг вибрации и уравнивания;
- измерение углов наклона;
- «черные ящики», регистраторы событий и др.

В противоугонных системах трехосевой акселерометр используется в качестве инклинометра, который чувствует наклон автомобиля или мотоцикла относительно земли. Если для захвата транспортного средства применяется другая машина, то акселерометр обнаруживает изменение наклона и активизирует систему обеспечения безопасности. Акселерометр может также использоваться для обнаружения попытки снятия колеса. В сложных противоугонных системах акселерометр может немедленно после вскрытия автомобиля инициировать работу видеокамеры, и преступник будет зафиксирован на пленке.

От сигнала акселерометра в автомобиле может быть идентифицирована любая неблагоприятная случайность. При этом двери могут быть разблокированы, что поможет спасателям проникнуть в автомобиль и сохранить жизнь пассажиров.

В регистраторах аварийного отказа акселерометр обнаруживает наличие столкновения, и все необходимые данные могут быть сохранены в системе для более позднего анализа. Инерционные данные могут быть выбраны и сохранены в системной памяти для последующего анализа аварии с целью определения ее причин.

В автомобильной навигации инерционные датчики по технологии MEMS могут дополнять систему GPS при потере сигнала. Систе-

Таблица 2. Основные отличия микросхем LIS331DLF, LIS331DLM, LIS331DLH

	LIS331DLF	LIS331DLM	LIS331DLH
Дискретность (бит)	6	8	16
Чувствительность	16/8/4 LSB/g	от 64/32/16 LSB/g	от 4,3 до 0,9 мг/разряд при 12-бит
Разрешение по ускорению (mg)	62,5	16	
Скорость передачи выходных данных	50/100/400 Гц и от 10 до 0,5 Гц в режиме пониженного потребления	50/100/400 Гц и от 10 до 0,5 Гц в режиме пониженного потребления	50–1000 Гц и 10–0,5 Гц в режиме пониженного потребления
Интенсивность шумов ускорения (mg/√Гц)			218

Примечание: 1 LSB = 4 g/64 при дискретности 6 бит, полная шкала ускорения ± 2 g;
1 LSB = 4 g/256 при дискретности 8 бит, полная шкала ускорения ± 2 g;
1 LSB = 4 g/4096 при дискретности 12 бит, полная шкала ускорения ± 2 g.



Рис. 4. Внешний вид отладочной платы EK3LV02DQ

ма счисления пути продолжает проследить движение в промежутки времени, когда спутниковые сигналы не принимаются или в случае, если они недостаточно точны.

Многие интеллектуальные компоненты компании STMicroelectronics, в том числе и акселерометры, поддерживаются собственными средствами разработки и оценки, которые позволяют разработчикам быстро оценивать возможности компонентов и развивать свои проекты.

Отладочные комплекты для акселерометров допускают получение через аналоговый или цифровой интерфейс данных о параметрах ускорения, ощущаемого акселерометром, и их анализ, который поддерживает специализированное программное обеспечение для цифровых решений. На рис. 4 представлен внешний вид отладочной платы EK3LV02DQ из комплекта STEVAL-MKI004V1 для акселерометра LIS3LV02DQ с цифровым выходом.

Для датчиков с аналоговым выходом считываемые акселерометром данные преобразуются емкостным усилителем с низким уровнем шумов в аналоговое напряжение, а для цифровых датчиков измеренные устройством сигналы считываются установленным на плате 8-разрядным микроконтроллером (ST72F651 на рис. 2) и пересылаются на компьютер через USB-интерфейс для дальнейшей обработки.

В заключение отметим, что наряду с новыми акселерометрами в 2008 г. компания STMicroelectronics начала производство и других новых продуктов по технологии MEMS, а именно гироскопов и функциональных ми-

кросхем. Пока в производстве — по одному прибору каждого типа. Это микросхема LY530AL — MEMS инерциальный одноосный датчик угловой скорости (гироскоп) с аналоговым и цифровым выходами и MEMS функциональный датчик FC30 с 3D-смарториентацией (6 позиций) и обнаружением внешнего шелчка по устройству.

Возвращаясь к областям возможного применения датчиков движения, можно с уверенностью утверждать, что, как и акселерометры, новые разновидности датчиков компании STMicroelectronics будут востребованы на рынке.

Литература

1. Сысоева С. Автомобильные акселерометры. Часть 5 // Компоненты и технологии. 2006. № 4.
2. Еманов А. Инерциальные датчики STMicroelectronics // Новости электроники. 2007. № 18.
3. Cacchione F. Mechanical characterization and simulation of fracture processes in polysilicon Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). PhD Thesis. Politecnico di Milano. Department of Structural Engineering. April 2007.
4. Carey D. Under the Hood: Hot 3G phone owes debt to analog // EE Times, 11/05/2007.
5. AN2768, Application note, LIS331DL 3-axis digital MEMS accelerometer: translates finger taps into actions. Rev. 1, June 2008.
6. LIS331DL, MEMS motion sensor 3-axis $\pm 2g/\pm 8g$ smart digital output “nano” accelerometer, Datasheet, Rev. 3, April 2008.
7. LIS331AL, MEMS inertial sensor: 3-axis $\pm 2g$ analog output “nano” accelerometer. Datasheet, Rev. 1, September 2007.
8. LIS331DLF, MEMS digital output motion sensor ultra low-power high performance 3-axes “nano” accelerometer, Preliminary Data, Rev. 3, November 2008.
9. LIS331DLM, MEMS digital output motion sensor ultra low-power high performance 3-axes “nano” accelerometer, Preliminary Data, Rev. 3, November 2008.
10. LIS331DLH, MEMS digital output motion sensor ultra low-power high performance 3-axes “nano” accelerometer. Datasheet, Rev. 2, November 2008-12-21.
11. AIS326DQ, MEMS inertial sensor 3-axis, low g accelerometer with digital output. Datasheet, Rev. 2, December 2008.
12. AIS226DS, MEMS inertial sensor 2-axis, low g accelerometer with digital output, Preliminary Data, Rev. 1, November 2008.