

Тенденции рынка High-end МЭМС-датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения

Датчики инерции сегодня представляют собой ключевой сегмент рынка МЭМС-технологий, в котором нашли место технические и технологические инновации в виде повсеместного распространения технологий сливания сенсорных данных, интегрированных комбидатчиков и сенсорных узлов.

Достижения коммерческой МЭМС-технологии также выражаются в ее все более широком применении в сегменте high-end техники, который составляет военная, аэрокосмическая и техника специального назначения. Мобильные МЭМС-датчики недостаточно хороши для сегмента high-end, где требуются устройства, обладающие на порядок более высокой точностью и надежностью. Рыночная ниша high-end МЭМС — это место для технологий, которые способны обеспечить характеристики датчиков инерции тактического уровня и выше.

Светлана СЫСОЕВА

Введение

Инерциальная навигация прошла долгий путь развития до появления МЭМС-технологии. Исторически первые инерциальные датчики разрабатывались для применения в морской навигации и аэрокосмической промышленности. Если морская или авиационная навигация еще были возможны по внешним ориентирам, то только инерциальная навигация сделала возможными космические полеты, управление ракетами и беспилотными летательными аппаратами.

До появления технологии инерциальные МЭМС-датчики представляли собой механические гироскопы и акселерометры — сложные, дорогостоящие и прецизионные устройства. И сегодня механические гироскопы и блоки инерциальных измерений показывают самые высокие характеристики и применяются в самых ответственных решениях, хотя им на смену пришли, например, менее дорогие технологии волоконно-оптических гироскопов (FOG) и кольцевых лазерных гироскопов (RLG). Но из-за высокой стоимости технология инерциальных измерений долгое время оставалась прерогативой аэрокосмических, морских и военных применений. Технология МЭМС-датчиков инерции стала доступна в качестве альтернативы для недорогих систем примерно с середины 1990-х годов. Хотя уровень характеристик новых МЭМС-датчиков был ниже, чем у их механических и прочих аналогов, но они

также имели значительно меньшие размер, мощность и стоимость.

Множество коммерческих компаний и исследовательских институтов направили свои усилия на разработку и совершенствование технологий МЭМС. Для МЭМС-датчиков инерции были достигнуты наиболее впечатляющие результаты. МЭМС-акселерометры и гироскопы сегодня выпускаются в виде автономных компонентов или в качестве блоков инерциальных измерений или системных решений в комбинации с другими типами датчиков. Уровень характеристик инерциальных датчиков, достижимый технологией МЭМС, неуклонно повышается.

Сегодня инерциальные МЭМС-датчики нашли широкое применение в потребительской, автомобильной, медицинской и промышленной технике.

Инерциальные датчики, которые когда-то можно было найти только в самолетах и кораблях, теперь применяются в автомобилях и промышленных системах, например, для контроля разворачивания подушек безопасности или вибрации двигателей. МЭМС-датчики инерции составляют основу потребительских устройств и мобильных телефонов нового поколения — в виде акселерометров, гироскопов, блоков инерциальных измерений, электронных компасов, 9-осевых сенсорных модулей и датчиков давления. На рынок непрерывно выпускаются новые компоненты с более высокими характеристиками по более низкой цене.

Существует огромная разница между устройствами для high-end и low-end систем [1–4]. Первый уровень составляют автомобильные, а еще более низкий — мобильные датчики, индивидуальные или комбинированные. Следующий уровень — промышленного класса. Разница в этих двух категориях заключается в калибровке датчиков. Инерциальные датчики тактического уровня исполнения применяются в малых и коммерческих транспортных средствах, в том числе для кратковременной навигации при потере сигнала GPS. Верхний уровень составляет морская или авиационная навигация, а также космическая, военная и морская техника, требующая спецификаций датчиков навигационного или стратегического класса. Стратегический уровень исполнения сформирован рядом особых клиентских заказов, таких как межконтинентальные баллистические ракеты.

Таблица 1. Характеристики уровней исполнения МЭМС-датчиков инерции

Уровень исполнения	Характеристики гироскопа (нестабильность смещения, °/ч)	Характеристики акселерометра (нестабильность смещения, мг)
Потребительский	10–10 000 (> 1°/с)	>50
Автомобильный		
Промышленный/low-end тактический, AHRS	1–10	1–3
Тактический	0,01–10 (около 1°/ч)	Около 1
Навигационный	0,01	25мкг
Стратегический	0,001	1мкг

Судя по данным, приведенным в таблице 1, коммерческие акселерометры, гироскопы и IMU для потребительского рынка достаточно хороши для использования в high-end сегменте.

Однако все же именно они стимулировали развитие технологий МЭМС-датчиков инерции, что в конечном итоге обеспечило возвращение датчиков инерции в high-end сегмент в МЭМС-исполнении.

Технологическая эволюция, которая выразилась в смещении от автономных датчиков к интегрированным блокам инерциальных измерений и комбидатчикам, в дальнейшем потребовала оптимизации существующих технологий и введения новых. Сенсорное слияние, выход к 9-осевым комбидатчикам и значительное снижение размеров корпусов — это достижения потребительской электроники последних лет, которые теперь можно использовать в high-end сегменте.

Впрочем, на этом влияние потребительского рынка на сегмент high-end заканчивается. Этот рынок требует высокоточных и стабильных датчиков, разработка которых на основе МЭМС-технологии требует от производителей значительных усилий.

МЭМС-датчики вышли на тактический уровень исполнения [4] и теперь укрепляют здесь свои позиции. Тактический уровень исполнения также имеет градации: верхний, средний и нижний. Low-end тактические и промышленные МЭМС практически тождественны. Если с достижения low-end тактического уровня ведет отсчет само вхождение МЭМС-технологии в high-end сегмент, то теперь МЭМС-датчики инерции выходят за границы верхнего тактического уровня. Основными бенефициарами («выгодоприобретателями») МЭМС-датчиков тактического уровня в военных применениях сегодня являются ракеты малого диаметра, подводные навигаторы, портативные искатели севера и беспилотные воздушные и подводные аппараты БПЛА/БППЛ (UUV). Для данных применений важен размер МЭМС, а для коммерческих — также и цена.

Некоторые high-end МЭМС-гироскопы приближаются по уровню характеристик к FOG и RLG, имея на порядок меньшую чувствительность и на два порядка ниже долговременную стабильность. Однако стоимость подобного high-end МЭМС лишь немного дешевле. Более того, МЭМС-технология и незначительные преимущества считаются дифференцирующими отличиями продукта, что позволяет производителям продавать их по высокой стоимости.

Таким образом, борьба за рыночную нишу high-end датчиков определяет стремление производителей к достижению в первую очередь более высокого уровня характеристик, а не цены.

Лидирующие характеристики МЭМС, доступные на современном уровне, определяются дрейфами смещения 1 °/ч для гироскопов и 1 мг для акселерометров.

Производители некоторых моделей МЭМС-гироскопов ведут борьбу уже за субмиллиметровый дрейф в час, а лидирующие производители акселерометров — за снижение нестабильности смещения менее 1 мг.

В high-end сегменте позиционированы компании Colibrys, Systron Donner, Sensoror, Silicon Sensing и ряд других, например XSens или Analog Devices.

Например, Colibrys сообщила о достижении акселерометрами уровня исполнения со смещением менее 1 мг, вплоть до 0,1 мг. Tronics GYPRO2300 — первый гироскоп высокого уровня исполнения — имеет характеристики нестабильности смещения в 1 °/ч. Нестабильность смещения гироскопов Sensoror STIM300 составляет 0,5 °/ч, а акселерометра — 0,05 мг.

Проанализируем сравнительные характеристики компонентов этих компаний более детально.

Акселерометры

Ключевые характеристики high-end акселерометров

Акселерометры, как и гироскопы, страдают от смещения и дрейфов смещения, ошибок невыравнивания, дрейфов под воздействием температуры и ускорений, нелинейности (так называемой ошибки VRE), а также дрейфа чувствительности.

Важнейшими характеристиками акселерометров для их сравнительного анализа являются смещение и его дрейфы, нестабильность смещения, а также шум. Также могут приниматься во внимание дрейф чувствительности, коэффициент нелинейности VRE и другие параметры.

Любое смещение акселерометра в отсутствие ускорения при двойном интегрировании (bias или bias error) вызывает ошибку скорости, пропорциональную времени интегрирования, и ошибку в вычисленном положении, растущую со временем квадратично.

Неконтролируемое смещение нуля вызывает смещение вектора ускорения относительно его истинного направления, и это касается не только датчиков линейного ускорения, но и гравитационного, которое должно вычитаться из общего выхода акселерометра. В системах инерциальной навигации дрейф смещения акселерометра привносит существенный вклад в погрешность вычисления скорости и положения. При измерении ориентации наиболее существенными являются угловые ошибки вычислений наклонов в продольном и поперечном направлениях.

Нестабильность смещения датчика представляет собой случайные вариации смещения, вычисленные в определенный временной интервал как усредненные значения. Этот параметр вычисляется по методу Аллана для стационарного датчика. При увеличении времени усреднения выходной шум снижается, и наклон достигает мини-

мальной точки, а затем увеличивается вновь. Минимальная точка на кривой Аллана представляет собой нестабильность смещения, приводимую в спецификациях акселерометров в мг или мкг. Чем ниже значение этого параметра, тем меньше ошибка вычисления скорости, положения и ориентации.

Нестабильность смещения акселерометра в большинстве спецификаций определяется производителями как наилучшая характеристика, достигнутая в лабораторных условиях (при 20 °C и отсутствии механических воздействий). Стабильность смещения в реальных условиях представляет собой максимальный дрейф остаточной ошибки смещения после компенсации воздействия внешних факторов — температуры, ударов, вибраций, старения.

Шумовой уровень акселерометра представляет собой некоррелированный с внешними воздействиями шумовой порог в виде минимального выхода датчика, отличимого от фоновых шумов. Шумовая плотность акселерометра специфицирована в $\text{rms mg}/\sqrt{\text{Гц}}$ и характеризует выходной белый шум для данной частотной полосы. Шум акселерометра отрицательно влияет на минимальный разрешаемый угол продольного и поперечного наклонов и существенно влияет на точность вычисления скорости и положения.

Ошибка чувствительности представляет собой отношение ошибки выхода в виде отклонения от прямой линии к полному входному диапазону и выражается в ppm (parts per million). Ошибка чувствительности не имеет такого значения для характеристики акселерометра, особенно в широком входном диапазоне ускорения.

Дрейф смещения под действием вибрации, сохраняемый в отсутствие вибрации вследствие нелинейности, называется ошибкой в результате вибрационного воздействия (vibration rectification error, VRE) и является весьма важной характеристикой для инерциальной навигации. В спецификациях акселерометров VRE выражается в виде коэффициента нелинейности второго порядка, измеренного в $\text{мкг}/\text{г}^2$.

Акселерометры с характеристиками тактического уровня исполнения от Colibrys

Что касается акселерометров, то они, без всякого сомнения, достигли тактического уровня исполнения; нестабильность смещения многих датчиков сегодня измеряется мкг, другие характеристики также являются весьма высокими.

Компания Colibrys, которую в 2014 году приобрела Sagem (Safran), в настоящее время выпускает МЭМС-акселерометры для аэрокосмического и оборонного рынков. Они могут выполнять целый ряд функций блоков инерциальных измерений (IMU), курсовертикалей (AHRS), стабилизации платформ и систем управления медицинского использования (HUMS).



Рис. 1. Акселерометр тактического класса Colibrus RS9010

Например, при поддержке Colibrus компания SBG Systems представляет серии AHRS и INS под названием Ekinox — тактического уровня исполнения.

Недавно выпущенный для AHRS одноосевой акселерометр RS9010 (рис. 1) для диапазона ускорения $\pm 10g$ характеризуется стабильностью смещения тактического или навигационного класса. В спецификации датчика заявлена стабильность смещения (in run) 48 ч, при $+20^\circ\text{C}$ составившая <500 мкг.

При $+20^\circ\text{C}$ калиброванные значения смещения были <50 мВ, чувствительности — (200 ± 2) мВ/г, рабочая частотная полоса — свыше 200 Гц, а шумовая спектральная плотность в данной полосе — 150 мкг/√Гц. Датчик также характеризуется коэффициентом линейности, при $+20^\circ\text{C}$ составившим <125 мкг/г² rms [60–2000 Гц] (1σ), и высокой стабильностью смещения и чувствительности.

В публикациях Colibrus сообщалось о достижении для серии RS9000 и прототипов навигационных акселерометров еще более высоких значений, в частности:

- стабильность смещения (in-run) — $<0,1$ мг;
- точность чувствительности — 400 ppm;
- коэффициент линейности — 65 мкг/г².

Датчик температуры и цифровая ASIC интегрированы с акселерометром RS9010 и выполняют температурную компенсацию 4-го порядка.

Обзор предложений high-end МЭМС-гироскопов

Ключевые характеристики high-end гироскопов

Точность гироскопа обычно определяется важнейшим параметром — стабильностью смещения. Стабильность смещения представляет собой точность выхода датчика при отсутствии вращения в течение всего срока службы. В идеале стабильность смещения должна быть равна 0, но в реальных условиях достижение такой точности невозможно вследствие погрешностей изготовления самого датчика (рассогласование, шум, старение и др.), а также влияния условий и среды на измерения (температурные колебания, вибрации, линейные ускорения и др.).

Таблица 2. Важнейшие характеристики high-end гироскопов

Параметр	Описание	Наилучшие характеристики МЭМС-гироскопов
Нестабильность смещения	Наименьшее значение на кривой Аллана при комнатной температуре в отсутствие вибраций и ударов	$<0,1^\circ/\text{ч}$
Угловой случайный уход (шум) ARW	Метод Аллана	$<0,01^\circ/\sqrt{\text{ч}}$
Дрейф смещения под влиянием температуры	Полный температурный диапазон	$5^\circ/\text{ч}$
Дрейф смещения под влиянием вибрации	Полный диапазон вибрационного воздействия	
Дрейф смещения под влиянием ускорения	Полный диапазон воздействия ускорения	$1-5^\circ/\text{ч}$
Стабильность смещения (in-run)	Квадратичная сумма предыдущих дрейфов в зависимости от условий эксплуатации	
Смещение	Выход при нулевой скорости	$30^\circ/\text{ч}$
Смещение под действием ударов		
Старение		
Стабильность смещения (run-to-run)	Квадратичная сумма предыдущих дрейфов в зависимости от условий эксплуатации	$5-30^\circ/\text{ч}$

Прочие важные характеристики гироскопов включают:

- Угловой случайный уход/шум.
- Нестабильность смещения.
- Ошибка или дрейф смещения гироскопа — общая или под влиянием конкретных факторов, например температуры.
- Собственно смещение — выход гироскопа в отсутствие вращения.
- Измерительный диапазон.
- Температурная чувствительность.
- Чувствительность к вибрации, ускорениям и ударам.
- Старение.

Чувствительность гироскопа также зависит от различных дрейфов, что находит отражение в спецификациях. Гироскопы подвержены собственным шумам и влиянию невыравнивания осей, но внимание этих параметров, как и ряда других, является вторичной задачей.

Нестабильность смещения или стабильность описывает, как смещение изменяется во времени. В спецификациях производителей стабильность смещения обычно специфицируется как 1σ смещение в $^\circ/\text{ч}$ для более точных или в $^\circ/\text{с}$ для менее точных устройств.

Нестабильность смещения в большинстве спецификаций определяется производителями как наилучшая характеристика, достигнутая гироскопом в лабораторных условиях. Нестабильность смещения определяется как минимальная точка на кривой Аллана и используется для характеристики гироскопа, определение которой проводится при комнатной температуре и в отсутствие воздействий вибраций и ударов. Нестабильность смещения in-run рассчитывается в пределах одного испытательного цикла, а run-to-run — по результатам нескольких циклов тестирования.

В более общем случае стабильность смещения (in-run или run-to-run) характеризует работу гироскопа в реальных условиях и в большей степени зависит от того, какой фактор среды влияет на работу датчика — температура или, например, старение.

Помимо абсолютной точности, в расчет может приниматься относительная точность, которая определяется как отношение стабильности смещения к измерительному

диапазону и выражается в процентах, когда речь идет о датчиках для потребительского или high-end сегмента, или в ppm и ppb для датчиков из разряда high-end.

Угловой случайный уход (случайное блуждание угла) (Angle Random Walk, ARW) — это сигнальный шум стационарного (в отсутствие вращения) гироскопа после интегрирования (в отличие от стабильности смещения, которая измеряется до интегрирования сигнала ориентации). Значение ARW дается в спецификациях производителя в $^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ или $^\circ/\sqrt{\text{с}}$. Эта ошибка тем выше, тем дольше время интегрирования. Угловой случайный шум ARW также непосредственно извлекается из кривой Аллана.

Нестабильность смещения и угловой случайный шум (ARW для гироскопа) — два основных источника погрешностей МЭМС-компонентов, которые в первую очередь принимаются во внимание. При комплексном анализе необходимо принять во внимание факторы влияния внешней среды и рабочих условий, то есть всех параметров, перечисленных выше.

Вследствие этого спецификации современных high-end гироскопов представляют собой довольно разрозненные данные для анализа, которые не всегда могут быть абсолютно унифицированы и непосредственно сопоставлены.

Средние цифры наилучших значений для современных МЭМС-гироскопов согласно последним публикациям производителей представлены в таблице 2.

Обзор лидирующих предложений МЭМС-гироскопов

Компания Systron Donner объявила о выпуске одноосевого цифрового кварцевого гироскопа SDD3000, уровень исполнения которого позволяет отнести его к тактическому классу. Устройство оптимальным образом подходит для тех задач, решению которых способствует беспрецедентно низкий шум (ARW), который составляет менее $0,02^\circ/\sqrt{\text{ч}}$, и стабильность смещения (in-run) в $1^\circ/\text{ч}$. Применения включают стабилизацию платформ, системы AHRS (курсовертикали), БПЛА и наземную навигацию. Стабильность

смещения в $1\text{ }^\circ/\text{ч}$ соответствует тактическому уровню исполнения. Другие стандартные температурные дрейфы смещения, заявленные в спецификации трех версий датчика, составляют 1 , 3 и $10\text{ }^\circ/\text{ч}$ соответственно.

При этом устройство с цифровым выходом RS232 или RS422 заключено в корпус размерами $78 \times 83 \times 25$ мм, что допускает его легкую интеграцию. Заявленный срок службы устройства — порядка 20 лет.

Компания Tronics сейчас предлагает свой первый собственный гироскоп GYPRO2300 высокого уровня исполнения, разработанный после многолетнего анализа клиентского спроса. МЭМС-гироскоп Tronics представляет собой одноосевое Z-устройство, малое по занимаемому объему ($0,55\text{ см}^3$) и легкое ($2,6\text{ г}$), которое имеет 24-битный выход. Заявлены следующие ключевые параметры:

- Нестабильность смещения: $1\text{ }^\circ/\text{ч}$.
- Шумовая плотность: $10\text{ }^\circ/\text{ч}/\sqrt{\text{Гц}}$.
- Ошибка смещения в зависимости от температуры: $\pm 0,05\text{ }^\circ/\text{с}$.

Компания Sensorog выпустила на рынок STIM300 — блок инерциальных измерений, объединяющий три высокоточных МЭМС-гироскопа, три высокостабильных акселерометра и три инклинометра. По уровню характеристик гироскопа датчик относится к верхнему тактическому классу. Заявленные характеристики гироскопа, входящего в состав инерциального модуля, следующие:

- Нестабильность смещения: $0,5\text{ }^\circ/\text{ч}$.
- Показатели шума: порядка $0,15\text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$.

Температурный дрейф смещения составляет $10\text{ }^\circ/\text{ч}$, а измерительный диапазон — $400\text{ }^\circ/\text{с}$.

Как видно, заявленные характеристики гироскопа от Sensorog в условиях, близких к идеальным, с большим основанием позволяют причислить его к тактическому классу.

Еще более высокие характеристики имеет одноосевая МЭМС-гироскоп Silicon Sensing Systems CRH01 (рис. 2), представляющий собой разработку на основе вибрационного кольца с индуктивным приводом VSG3.

Основные параметры устройства:

- Нестабильность смещения: $0,2\text{ }^\circ/\text{ч}$ (для версии CRH01-025).
- Показатели шума: порядка $0,04\text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$.
- Температурный дрейф смещения: $\pm 0,2 \dots \pm 0,5\text{ }^\circ/\text{с}$.

Разработаны четыре версии датчика с измерительными диапазонами от ± 25 до $\pm 400\text{ }^\circ/\text{с}$.

Кривая Аллана для версии датчика угловой скорости в диапазоне $\pm 25\text{ }^\circ/\text{с}$ явно показывает, что его типичная нестабильность смещения лучше $0,1\text{ }^\circ/\text{ч}$, а угловой случайный уход (ARW) лучше $0,02\text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$. Такой уровень характеристик до недавнего времени был достижим только FOG- и RLG-гироскопами.

Компания Silicon Sensing еще за год до публикации этой статьи объявила о разработке новой линейки инерциальных датчиков, модулей и систем, отличающихся низким дрейфом (менее $0,3\text{ }^\circ/\text{ч}$) на основе индуктивного МЭМС-гироскопа, представляющего

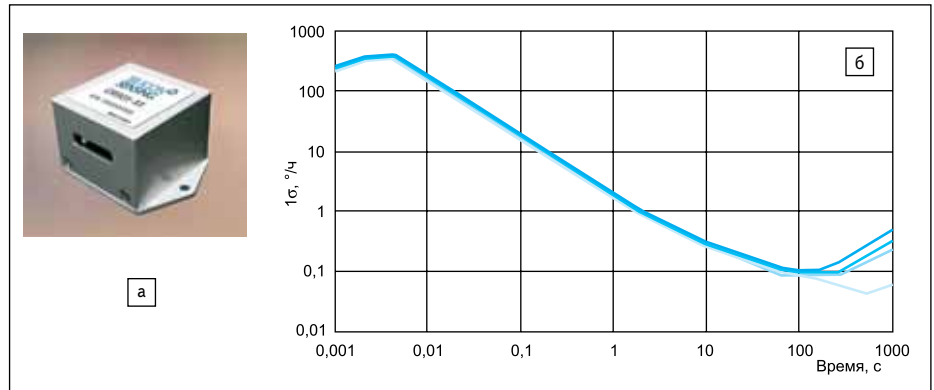


Рис. 2. Прецизионный МЭМС-гироскоп Silicon Sensing Systems CRH01 тактического класса: а) внешний вид; б) кривая Аллана

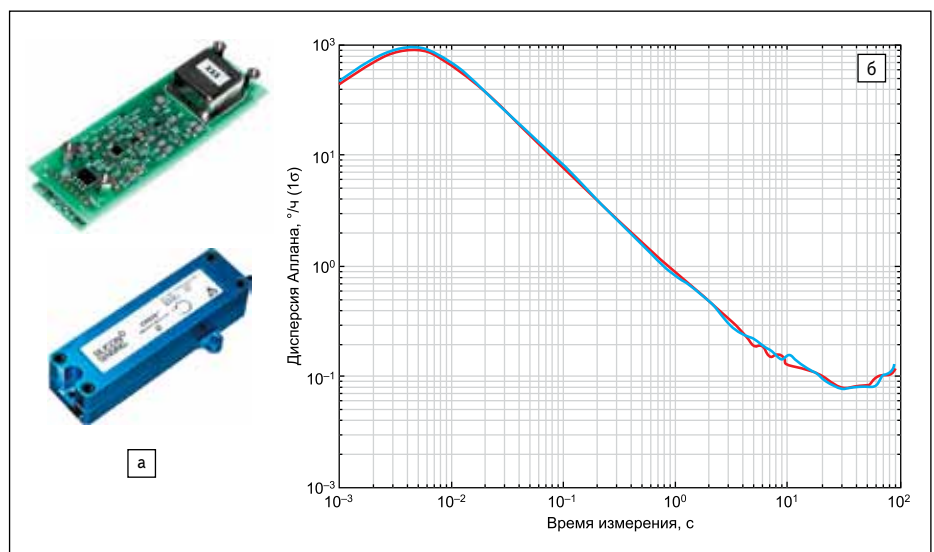


Рис. 3. МЭМС-гироскопы серии CRS39 Silicon Sensing с лидирующей нестабильностью смещения порядка $0,08\text{--}0,1\text{ }^\circ/\text{ч}$: а) внешний вид; б) кривая Аллана

собой недорогую альтернативу волоконно-оптическим продуктам. Но, как видно, реально достигнутые характеристики МЭМС-гироскопов Silicon Sensing Systems Ltd. оказались еще выше.

В настоящий момент важнейшее ожидаемое событие — выпуск Silicon Sensing коммерческих МЭМС-гироскопов серии CRS39 на основе чувствительного элемента индукционного типа SGH03 с увеличенной добротностью последнего поколения VSG3^{QMAX} (рис. 3).

Silicon Sensing уже серийно поставляет датчики CRS39-01 и CRS39-02 — в закорпусированном и незакорпусированном исполнении, характеризующиеся также низкой нестабильностью смещения в $0,2\text{--}0,3\text{ }^\circ/\text{ч}$ и ARW в $0,017\text{ }^\circ/\text{ч}$. Впрочем, по сравнению с другими МЭМС-устройствами тактического класса температурный дрейф у них такой же, как у многих других датчиков, и составляет $3 \pm 10\text{ }^\circ/\text{ч}$ (max $\pm 30\text{ }^\circ/\text{ч}$), а измерительный диапазон — только $\pm 25\text{ }^\circ/\text{с}$. Объявлено, что гироскоп CRS39-03 характеризуется нестабильностью смещения порядка $0,08\text{--}0,1\text{ }^\circ/\text{ч}$, что

выходит за границы верхнего тактического уровня и вполне сопоставимо с характеристиками волоконно-оптических и кольцевых лазерных гироскопов; заявленный показатель случайного ухода — не более $0,0083\text{--}0,015\text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$, а собственный среднеквадратический шум — не более $0,01\text{ }^\circ/\text{ч}$.

На примере одной серии гироскопов компания Silicon Sensing продемонстрировала улучшения в характеристиках нестабильности смещения от типичных значений $0,3\text{--}0,08\text{ }^\circ/\text{ч}$, а шума ARW — $0,013\text{--}0,0083\text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$. На данный момент характеристики МЭМС-гироскопов Silicon Sensing — самые высокие, поэтому датчики применяются в высокопрецизионных high-end системах.

Silicon Sensing также продемонстрировала способность своего гироскопа к высокоточному обнаружению севера (до $0,1\text{ }^\circ/\text{ч}$).

В целом МЭМС-гироскопы не вполне достигли тактического уровня исполнения, которому соответствует стабильность смещения в $1\text{ }^\circ/\text{ч}$ именно в реальных, а не в испытательных условиях. Стабильность смещения лучших МЭМС-гироскопов оценива-

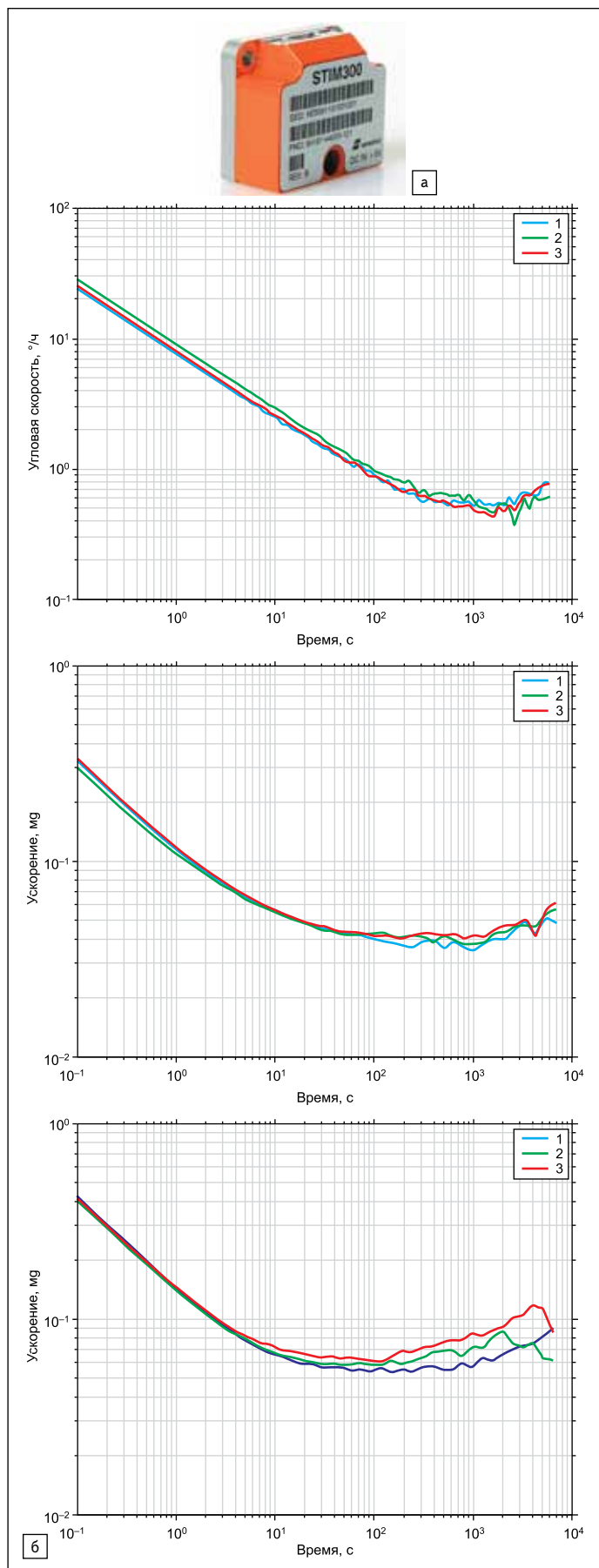


Рис. 4. Sensoror STIM300 — высокоточный 24-битный блок инерциальных измерений: а) внешний вид; б) кривые Аллана

ется в реальных условиях в диапазоне 5–30 °/ч. Но за последние годы МЭМС-гироскопы ведущих производителей — таким примером могут послужить изделия Silicon Sensing — демонстрируют абсолютную реальность достижения технологий МЭМС тактического класса.

Блоки инерциальных измерений

Современные блоки инерциальных измерений (IMU) представляют собой 6-осевые комбинации акселерометров и гироскопов, объединенные с датчиками температуры, аналоговыми схемами переднего фронта для фильтрации и оцифровки, схемами ЦОС, цифровой фильтрации, калибровки и компенсации и цифровым интерфейсом.

IMU, в свою очередь, входят в состав AHRS и INS, представляющих собой комбинации акселерометров и гироскопов с другими типами датчиков, включая инклинометры, датчики температуры, магнитометры, а также с обрабатывающей электроникой. Так как уровень характеристик современных МЭМС-акселерометров выше, чем у гироскопов, то сложилась практика сравнительной характеристики IMU прежде всего по характеристикам гироскопов. Впрочем, блоки инерциальных измерений представляют собой устройства системного уровня, что означает также возможность получить эффект системного уровня по улучшению точности измерения положения, скорости и ориентации большой, чем тот, которого можно было бы достичь посредством дискретных датчиков инерции со спецификациями, аналогичными встроенным датчикам IMU. Для комплексной оценки датчиков необходимо принимать во внимание и уровень интеграции, и соответствие применению.

По уровню заявленных характеристик для комбинированных данного типа лидирующие позиции сейчас занимает компания Sensoror. Она выпускает STIM300 (рис. 4) — 24-битный блок инерциальных измерений, объединяющий три высокоточных МЭМС-гироскопа, три высокостабильных акселерометра и три инклинометра.

Каждая ось (степень свободы) каждого из датчиков откалибрована в плане смещения и скомпенсирована по температуре. Заявленные характеристики гироскопа, входящего в состав инерциального модуля, следующие: нестабильность смещения — 0,5 °/ч, а показатели шума — порядка 0,15 °/√ч. Температурный дрейф смещения составляет 10 °/ч, а измерительный диапазон первой модели — 400 °/с. Уровень характеристик гироскопа позволяет отнести устройство в целом к тактическому классу.

Полный входной диапазон акселерометра составляет ±10g, а нестабильность смещения, вычисленная по методу Аллана, равна 0,05 мг. Входной диапазон инклинометра — ±1,7 мг, а нестабильность смещения по методу Аллана — также 0,05 мг.

Таблица 3. Параметры гироскопов и инерциальных модулей Sensoror

Наименование	STIM210	STIM300	
	1-, 2-, 3-осевой гироскоп	3-осевой гироскоп	3-осевой акселерометр
Компонент	гироскоп	акселерометр	инклинометр
Корпус	Прочный алюминиевый, 44,8×38,6×21,5 мм, 55 г, IP67		
Способ подключения	15-выводной micro-Dsub		
Интерфейс	RS-422, 1,843 Мбит/с		
Частота опроса (max), Гц	2000		
Полоса пропускания, Гц	16, 33, 66, 131, 262		
Нестабильность смещения	0,5 °/ч	0,5 мг	0,6 мг
Диапазон измерений	±400 °/с (динамическая перегрузка до 5000)	±10g (до 80)	±1,7g
Дрейф нуля в температурном диапазоне	9–10 °/ч (СКЗ)	±2 мг (СКЗ)	±2 мг (СКЗ)
Угловой случайный уход	0,15 °/√ч	0,06 м/с/√ч	0,08 м/с/√ч
Чувствительность (масштабный коэффициент)	24 бит, 0,22 °/ч	24 бит, 1,9 мг	24 бит, 0,2 мг
Температурное смещение чувствительности, %	±0,05	±0,03	±0,05
Нелинейность, ppm	±25...±50	±100	±500
Диапазон рабочих температур, °C	–40...+85		
Стойкость к ударам, g	1500 (синусоидальная, 0,5 мс)		
Стойкость к вибрации (СКЗ), g	MIL-STD-810 E 514.4 (в полосе 20–2000 Гц)		
Время включения, с	1/<5		
Напряжение питания, В	4,5–5,5		
Потребляемый ток, mA	300	400 (max)	

Устройство с интерфейсом RS422 имеет небольшие размеры (38,6×44,8×21,5 мм) и вес (<55 г).

Прочие характеристики представлены в таблице 3.

Компании NovAtel и LiDAR USA (Fagerman Technologies, Inc.) уже сообщили об интегрировании модуля STIM300 в свои продукты для инерциального измерения.

Sensorog предлагает клиентам различные конфигурации датчиков STIM300:

- ± 400 °/с; ± 2 , ± 5 , ± 10 , ± 30 , ± 80 g;
- ± 800 °/с; ± 5 , ± 10 , ± 30 , ± 80 g.

Для удобства работы с модулями компания Sensorog с 2014 году поставляет USB отладочные наборы STIM210/STIM300 Evaluation Kit USB, которые не требуют предварительной установки драйверов для работы в ОС Windows: необходимое ПО будет установлено на компьютере автоматически.

Менее точные и дорогие МЭМС-блоки инерциальных измерений в широком ассортименте предлагают другие компании — Silicon Sensing, Systron Donner, Xsens, VectorNav и др. Впрочем, ряд предложений заслуживает особого внимания и в плане достижения ими более высокого уровня интеграции различных типов датчиков между собой, воплощения большего числа функциональных признаков посредством одного компонента благодаря встроенному слиянию и обработке данных.

Обратим внимание на еще одно важнейшее событие — официально объявленный компанией Silicon Sensing в мае 2014 г. выпуск нового блока динамических инерциальных измерений DMU10 с шестью степенями свободы. DMU10 (рис. 5) характеризуется способностью не только 3-осевых измерений угловой скорости и линейного ускорения, но и включает два независимых датчика температуры.

DMU10 производится на основе технологии Silicon Sensing МЭМС-гироскопов VSG55-го поколения пьезоэлектрического (PZT) типа. Модуль включает три гироскопа семейства Orion с диапазонами измерения по ± 300 °/с для каждой оси и шесть емкостных акселерометров — по два на ось, цель — повысить точность и снизить шум датчика. Акселерометры проводят измерения в динамическом диапазоне ± 10 g для каждой оси. Температурный дрейф смещения гироскопов с температурной калибровкой специфицирован в 0,25 °/с, акселерометров — в ± 10 мг.

Типичные кривые Аллана гироскопов и акселерометров приведены на рис. 5в.

Два независимых датчика температуры, установленных в модуле, рассчитаны на диапазон измерений температур $-55 \dots +100$ °С.

Выходные данные датчика передаются по стандартному интерфейсу RS422. Объявлено, что DMU10 будет отличаться низким уровнем потребления мощности — до 60 мА при напряжении питания 3,3–5 В. Предполагается выпускать модуль в двух вариантах. Это бескорпусной DMU10-01 — OEM-плата с габаритными размерами 22×37×11 мм и корпусной DMU10-02 — в прочном анодированном алюминиевом корпусе с габаритами 25×45×16 мм.

Silicon Sensing также сообщила о своих планах выпуска малогабаритного недорогого 11-компонентного модуля для измерения параметров движения [6]. Помимо включения в состав модуля собственных гироскопов семейств PinPoint, Orion и акселерометров Gemini, компания Silicon Sensing планирует добавить к ним электронный компас (магнитометр) и барометрический датчик давления.

Заключение

Оглядываясь на прошедшие два десятилетия, можно наблюдать значительную динамику улучшения характеристик МЭМС-датчиков инерции. Десятилетие спустя после демонстрации первых функциональных МЭМС-датчиков инерции были разработаны автомобильные акселерометры, а еще спустя десятилетие — low-end тактические МЭМС-акселерометры, гироскопы и блоки инерциальных измерений. Предложения МЭМС-компонентов для high-end сегмента последних лет показывают возможность дополнительного улучшения

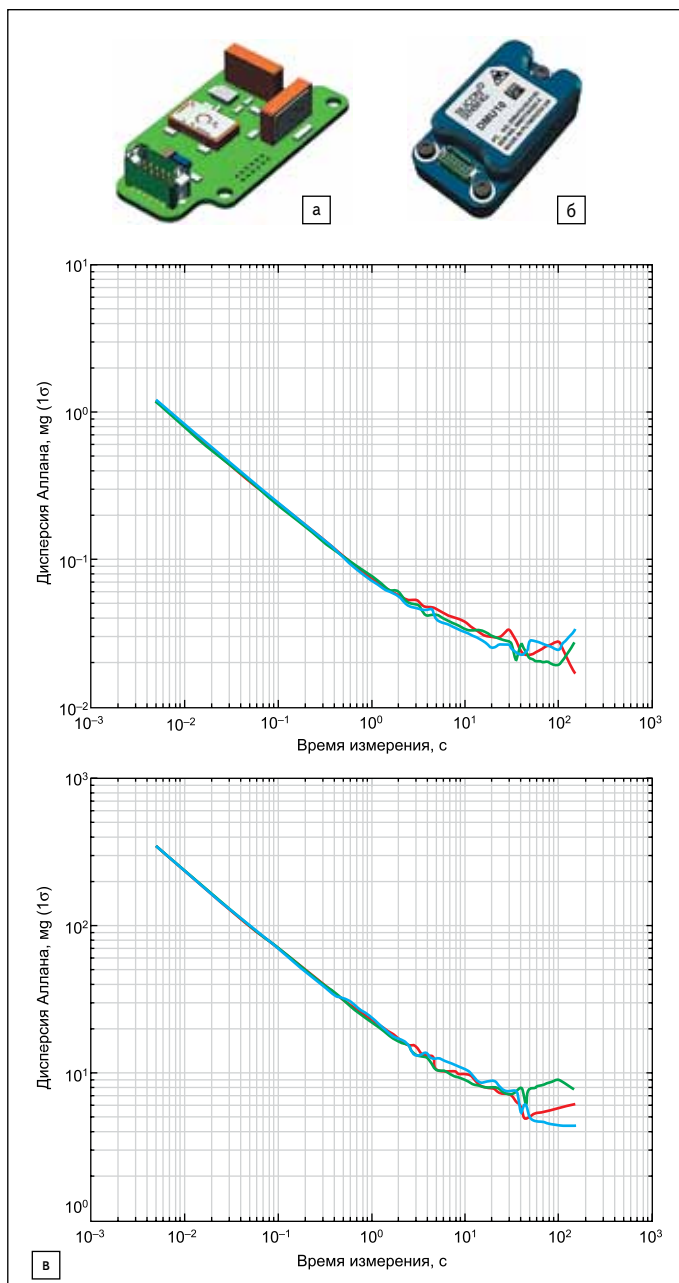


Рис. 5. Блок инерциальных измерений DMU10 Silicon Sensing: а) внешний вид бескорпусного датчика; б) внешний вид корпусного датчика; в) кривые Аллана для гироскопов и акселерометров

характеристик, потенциально в течение следующего десятилетия они изменятся еще на порядок. В ближайшие годы, скорее всего, произойдет включение МЭМС-датчиков инерции в тактический класс и выход за его пределы. Этому способствует одновременное совершенствование технологий микропроизводства, корпусирования и электронных схем обработки сигнала с ПО.

Многие ведущие производители high-end МЭМС-датчиков инерции сообщают о достижении ими более высоких уровней фактических характеристик и устанавливают новые планки для их преодоления в самое ближайшее время.

Выход МЭМС-акселерометров на тактический уровень состоялся несколько раньше, чем для гироскопов, и теперь ведущие производители high-end МЭМС-акселерометров, например Colibrys, уже публикуют информацию о расширении пределов своих достижений до навигационного класса. МЭМС-гироскопы существенно отставали по уровню характеристик от акселерометров, и именно они

определяли общий уровень развития современной технологии МЭМС инерциальных измерений.

Сегодня на переднем фронте этого сегмента — компании Silicon Sensing и Sensoror, которые продемонстрировали значительный отрыв в плане характеристик гироскопов от ближайших конкурентов. Лидирующие характеристики МЭМС-гироскопов, заявленные компанией Silicon Sensing, показывают абсолютную реальность достижения технологией МЭМС тактического класса, а широкий спектр новых предложений МЭМС-

датчиков инерции и более высокие уровни интеграции открывают для технологии инерциальных МЭМС-датчиков в прямом смысле новые навигационные горизонты. ■

Литература

1. Сысоева С. С. Введение в High-End сегменты применений МЭМС-технологии. Ч. 1 // Компоненты и технологии. 2010. № 10.
2. Сысоева С. С. Введение в High-End сегменты применений МЭМС-технологии. Ч. 2 // Компоненты и технологии. 2010. № 11.
3. Сысоева С. С. Введение в High-End сегменты применений МЭМС-технологии. Ч. 3 // Компоненты и технологии. 2010. № 12.
4. Сысоева С. С. Ключевые сегменты рынка МЭМС-компонентов. Инерциальные системы — от low-end до high-end сегментов // Компоненты и технологии. 2010. № 5.
5. Сысоева С. С. Теоретические основы инерциальной навигации // Компоненты и технологии. 2011. № 2.
6. Бекмачев А. МЭМС-гироскопы и акселерометры Silicon Sensing: английские традиции, японские технологии // Компоненты и технологии. 2014. № 4.