



УДК 623.4.084

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.579.581

# ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ СОВРЕМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

## TRENDS IN MODERN INERTIAL MICROMECHANICAL SENSORS DEVELOPMENT

ТИМОШЕНКОВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

Porcuapa@gmail.com

TIMOSHENKOV ALEXEY S.

Porcuapa@gmail.com

ООО «Лаборатория микроприборов»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

Laboratory of Microdevices Ltd.

6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia

В работе описаны результаты разработки, исследований и внедрения на рынок перспективных инерциальных МЭМС отечественного производства. Проанализированы ключевые преимущества и возможности, которыми могут обладать микромеханические датчики. Дано аналитическое обоснование предельной механической прочности, стойкости и точности упомянутых приборов.

*Ключевые слова:* инерциальные микроэлектромеханические датчики; датчик линейного ускорения; датчик угловой скорости; предельные акселерометры; комплексированная навигационная система.

The paper describes the results of research and development of inertial MEMS, analyzing their key advantages and opportunities. The analytical substantiation of ultimate mechanical strength of the mentioned devices has been given.

*Keywords:* inertial MEMS; sensors; MEMS gyro; shock sensors.

Лаборатория микроприборов специализируется на разработке инерциальных микромеханических датчиков и сопутствующих технологий. Основными продуктами компании являются микромеханические гироскопы, акселерометры и инерциальные системы. Фирма основана в 2012 году и на сегодняшний день сумела поставить на рынок более 5000 осей инерциальных датчиков. В компании существует две концепции разработок, которые не противостоят друг другу, но развиваются независимо, иногда дополняя друг друга. Первая — концепция элементов МЭМС, согласно которой разрабатываются и совершенствуются одноосевые акселерометры и гироскопы, пороговые датчики движения и положения, совершенствуются технологии получения трехмерных кремниевых структур. Вторая концепция — создание инерциальных измерительных приборов, способных решать задачи ориентации, навигации, инклинометрии, гирокомпасирования, стабилизации и управления движением. Ярким успехом компании в области создания элементов и приборов можно назвать пороговый датчик удара КМ1-200 и инерциальный измерительный модуль ГКВ-11. На примере этих изделий проанализированы ключевые преимущества и возможности, которыми могут обладать микромеханические инерциальные датчики и системы: предельная механическая прочность, миниатюрность и относительная дешевизна.

Одним из важнейших факторов развития современных микроэлектронных технологий является масштаб. С уменьшением размеров элемента, вполне очевидно, требуется меньше исходного материала для изготовления: существует ряд факторов, коррелирующих с размерами элементов в микроэлектронике, они, в частности, сформулированы в знаменитом законе Мура. Но в отношении инерциальных МЭМС целесообразно рассматривать фактор прочности конструкции как наиболее

плотно коррелирующий с размером элемента. Рассмотрев балку, закрепленную горизонтально с одной стороны, имеющую форму параллелепипеда и квадратную в сечении, можно сделать важный вывод о прочности этой конструкции к собственному весу. Если в первоначальном состоянии балка была достаточно прочной, чтобы не ломаться под собственным весом в гравитационном поле, то с бесконечным увеличением габаритов балки и с сохранением пропорций неизбежно наступит момент, когда балка сломается. Произойдет это по причине того, что масса балки растет в кубе от ее линейного размера, а прочность соответствует площади поперечного сечения, которая прирастает квадратично. Если рассматривать такую аналогию в микромасштабе, становится очевидным важное качество инерциальных МЭМС: миниатюрная конструкция способна выдержать большее инерциальное воздействие, нежели подобная ей макроконструкция. Благодаря данному качеству с их помощью можно измерять высочайшие угловые скорости и перегрузки. Одновременно с этим можно сделать предположение о том, что точность инерциальных микромеханических датчиков зависит от габаритов чувствительных элементов прямо пропорционально, поскольку энергия полезного сигнала пропорциональна массе и моменту инерции и резко падает с уменьшением размеров. В то же время энергия шумов системы съема сигнала датчиков (наиболее распространена емкостная) пропорциональна квадрату характерного размера чувствительного элемента (ЧЭ) и убывает медленнее с уменьшением его габаритов.

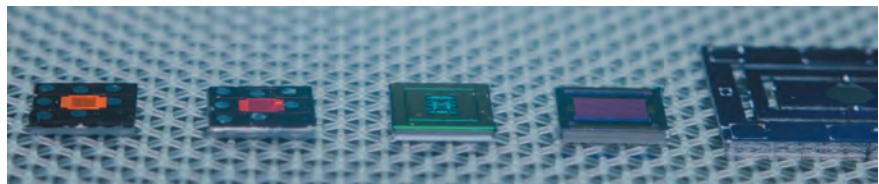


Рис. 1. Фотографии некоторых чувствительных элементов ООО «ЛМП»



Другая задача, которая стоит перед разработчиком инерциальных МЭМС, — обеспечение точности измерений. Погрешности микромеханических датчиков делятся на случайные и систематические. Систематические погрешности в основном вызваны технологическими факторами и температурными возмущениями в условиях установившихся тепловых процессов в конструкциях чувствительных элементов. Случайные погрешности вызваны в основном электронными компонентами, входящими в состав электрической части.

В модели погрешности учитывают наиболее существенные возмущающие факторы (внешние и внутренние), действие которых приводит к существенному отклонению показаний датчика от истинных.

В общем случае чем полнее модель погрешностей и чем больше возмущающих факторов она учитывает, тем адекватнее она будет соответствовать датчику. В реальных условиях невозможно учесть абсолютно все факторы, поэтому рассмотрению подлежат только те факторы, без учета которых ошибки показаний датчика не будут удовлетворять требованиям к каналам измерения и обработки.

Моделирование случайных погрешностей (стохастическое моделирование) включает: моделирование остаточной погрешности (после компенсации и начальной выставки) и погрешности «в запуске», которую трудно наблюдать и компенсировать на фоне других случайных эффектов. Параметры стохастической модели могут быть включены в оценку (например, фильтра Калмана) состояний. Следует отметить, что в результате модели погрешностей являются стохастическими по природе и не могут быть использованы для уменьшения погрешностей датчика. Полученные результаты используются для определения статистических ограничений на выходной сигнал датчиков, т. е. ожидаемых погрешностей на выходе, вызванных остаточными (после калибровки) и неучтенными погрешностями.

При моделировании случайных погрешностей микромеханических датчиков основной акцент делается на стохастическом характере смещения. В связи с тем что изменение масштабного коэффициента от времени является незначительным по сравнению со смещением, масштабный коэффициент можно считать независимым от времени, а построение стохастической модели для масштабного коэффициента является нецелесообразным.

Погрешность смещения легко определить после включения датчика. Основное внимание в этой работе уделено модели стохастической составляющей случайного дрейфа смещения (остаточное смещение после калибровки, термин «дрейф» обусловлен изменением параметра от времени), которая существенно выражена для микромеханических датчиков.

Модель стохастической составляющей случайного дрейфа смещения имеет несколько источников ошибки [3]. Моменты этих стохастических ошибок, таких как случайное блуждание, со временем возрастают, что приводит к накоплению ошибки со временем.

До процедуры калибровки в первую очередь необходимо определить источники ошибки. Для моделирования случайного дрейфа смещения обычно используются четыре способа [4]: построение модели автокорреляционной функции [5], по спектральной плотности мощности [6], по анализу во временной области [7] и по вариации Аллана [3].

Если сравнивать модели случайного дрейфа смещения, построенные указанными выше способами, то они имеют

схожие характеристики. Входными данными для моделирования являются данные, полученные при отсутствии воздействия на датчик, т. е. при нулевом выходном сигнале.

Временной подход построения модели является более точным в соответствии с [8]. Также в соответствии с [8] анализ по спектральной плотности мощности (Power spectral density — PSD) и вариации Аллана являются предпочтительными методами идентификации и моделирования стохастической погрешности инерциальных датчиков.

Необходимо отметить, что если предполагается температурная компенсация, целесообразно производить набор данных с учетом термокомпенсации при изменяющейся температуре, в связи с тем что стохастическая модель должна учитывать остаточные погрешности, в том числе и после термокомпенсации.

Принимаются во внимание следующие основные типы шумов инерциальных датчиков.

#### 1) Шум квантования (Quantization Noise)

Шум квантования вызван разницей между мгновенным значением амплитуды исходного и оцифрованного сигналов при аналого-цифровом преобразовании [10].

Хотя шум квантования является производной от белого шума в плане угловой скорости и ускорения, с точки зрения пространственной ориентации и скорости шум квантования является белым шумом [9].

#### 2) Случайное блуждание угла (Angle Random Walk — ARW)

Основным источником этой ошибки являются спонтанные электронные колебания в датчике, а также остальные высокочастотные составляющие шума, которые имеют время корреляции значительно меньше, чем время выборки [11]. *ARW* имеет рациональный спектр и моделируется как белый шум.

#### 3) Нестабильность нуля (Bias Instability)

Происхождение этого источника шума обусловлено электронными или другими компонентами, создающими фликкершум. Из-за своей низкой частотной природы шум появляется как колебание смещения нуля.

Существует много различных моделей, разработанных для неустойчивости нуля. Для связи методов стохастического анализа по вариации Аллана и автокорреляционного целесообразно использовать модель Гауссо-Марковского процесса 1-го порядка.

#### 4) Случайное блуждание скорости (Rate Random Walk — RRW)

Это случайный процесс неизвестного происхождения, возможно, являющийся предельным случаем экспоненциально коррелированного шума с очень большим временем корреляции.

*RRW* имеет рациональный спектр, так что его модель может быть получена при помощи спектральной плотности мощности.

#### 6) Линейно изменяющийся шум (Rate Ramp Noise — RN)

*RN* представляет собой квадратичный рост выходного сигнала акселерометров и гироскопов [12]. Этот шум можно приблизительно описать как Гауссо-Марковский процесс 2-го порядка.

#### 7) Синусоидальный шум (Sinusoid Noise — SN)

Синусоидальный шум характеризуется выраженными частотами от общего шума и в большинстве случаев проявляется только при длительном времени работы.

Таким образом, разработчикам инерциальных МЭМС приходится находить компромисс между миниатюрностью элементов, их механической прочностью, точностью, качеством, затратами на их производство и т. д.

Особого внимания заслуживают предельные характеристики, которых удается достичь, разумно фокусируя внимание на наиболее важных качествах при разработке. Так, при создании датчика удара перед коллективом «Лаборатории микроприборов» ставилась цель получить предельную ударопрочность конструкции, способной при минимальном энергопотреблении идентифицировать факт наличия перегрузки свыше 200 g. Прочность, при которой датчик не должен выходить из строя, составляет не менее 30 000 g. Из этих основных требований после нескольких лет разработки появился датчик удара КМ1-200. Чувствительный элемент датчика: инерциальная масса порядка единицы нанограмма подвешена на спицах с габаритом сечения порядка 30 нм. Практические эксперименты подтверждают прочность конструкции к перегрузкам в 40 000 g.

Другим успешным продуктом компании является инерциальный измерительный модуль ГКВ-11, созданный при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предпринимательства в научно-технической сфере. Отличительными особенностями этого серийного изделия являются его высокая прочность к механическим и температурным воздействиям, сравнительно высокая точность, малые габариты и цена. Еще 10 лет назад едва ли можно было найти серийный микромеханический модуль, способный грубо решать задачу гирокомпасирования или достаточно точно решать задачу автономной ориентации объекта инерциальными датчиками при постоянном воздействии вибраций и перегрузок исчисляемыми сотнями g. Сегодня это возможно, в частности, с ИИМ ГКВ-11.

Известно, что задача автономной инерциальной навигации требует периодической коррекции от различных источников. Такими источниками могут быть скоростные корректоры от спидометра или одометра наземного транспортного средства, курсовые или скоростные корректоры от спутниковой навигационной системы. ИИМ ГКВ-10 содержит в своем составе триаду гироскопов, триаду акселерометров и мощный вычислитель, способный комплексировать инерциальную информацию с внешними источниками, поступающими по специальному, отдельно выделенному каналу RS422. ИИМ ГКВ-11, помимо всех качеств ГКВ-10, обладает встроенным приемником СНС и имеет частотный разъем для подключения внешней антенны.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Shalimov A., Timoshenkov S., Korobova N., Golovinskiy M., Timoshenkov A., Zuev E., Berezueva S., Kosolapov A. *Comb structure analysis of the capacitive sensitive element in MEMS — accelerometer* // Proceedings of SPIE. Int. Soc. for Opt. Eng. January 2015, 9467, 94672W.



Рис. 2. Внешний вид инерциальных измерительных модулей ГКВ-10 (слева) и ГКВ-11 (справа)

2. Belousov E., Krouglov Y., Timoshenkov A. *Current Driver for MEMS Angular Sensor* // 2015 Internet Technologies and Applications (ITA) Proceedings of the Sixth International Conference (ITA 15). P. 349–351.
3. IEEE STD 647, 2006, IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Laser Gyros. P. 68–80.
4. Han Songlai, Wang Jinling, Knight Nathan. *Using Allan variance to determine the calibration model of inertial sensor for GPS / INS integration*, 2009.
5. Brown R. G., Hwang, Patrick Y. C. *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering with Matlab Exercises and Solutions*. John Wiley & Sons, New York, 1997. P. 105–111, 299–304.
6. IEEE STD 1293, 1998, IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Linear, Single-Axis, Nongyroscopic Accelerometers. P. 166–181.
7. Nassar S. *Improving the Inertial Navigation System Error Model for INS and INS / DGPS Applications*, Doctor Thesis, University of Calgary, 2003.
8. IEEE STD 952-1997 Guide and Test Procedure for Single Axis Interferometric Fiber Optic Gyros // IEEE, 1997. P. 63.
9. Savage P. G., 2002, *Analytical Modeling of Sensor Quantization in Strapdown Inertial Navigation Error Equations* // Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 25(5): 833–842.
10. *Calibration and Stochastic Modelling of Inertial Navigation Sensor Errors*. Mohammed El-Diasty and Spiros Pagiatakis. Dept. of Earth & Space Science & Engineering, York University, Canada, Journal of Global Positioning Systems (2008). Vol. 7. № 2: 170–182.
11. Saini Vaibhav, Rana S. C. and Kuber M. M. *Online estimation of state space error model for mems imu* // Journal of Modelling and Simulation of Systems, 1:219–225, 2010.



**ТЕХНОСФЕРА**  
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

[www.technosphere.ru](http://www.technosphere.ru)

ЭЛЕКТРОНИКА

НАНОИНДУСТРИЯ

ФОТОНИКА

ПЕРВАЯ МИЛЯ

Аналитика

СТАННОИНСТРУМЕНТ

Цифровая экономика