

СРАВНЕНИЕ ДАТЧИКОВ МЭМС И ВОГ

Д.В. Шелаев («ГНСС плюс»)

В 2009 г. окончил геодезический факультет МИИГАиК по специальности «космическая геодезия». После окончания университета работает в ООО «ГНСС плюс», в настоящее время — ведущий инженер.

Можно предполагать, что инновационная идея в будущем станет востребованной, но всегда неожиданно, когда одна технология занимает место другой. В конце концов, телевидение все-таки привело к значительному снижению популярности радио.

В области навигационных технологий волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) в настоящее время используются гораздо шире, чем гироскопы, основанные на микроэлектромеханических системах (МЭМС). Но успехи в промышленном изготовлении датчиков, основанных на МЭМС, делают их кандидатами на применение в высокоточных навигационных приложениях. Микроэлектромеханические системы постепенно занимают место волоконно-оптических гироскопов в области инерциальной навигации [1].

▼ **Высокоточные ГНСС/ИНС приложения**

Инерциальные навигационные системы (ИНС) использовались задолго до того, как были разработаны глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS. Начиная с 1950-х гг., ИНС служили для решения задач позиционирования в наземных, морских и авиационных приложениях. Изначально в них применялись платформенные и бесплатформенные механические системы. В 1970–1980-х гг. были разработаны лазерные гироскопы (ЛГ) и интерферометрические волоконно-оптические гироскопы, которые позволили значительно увеличить точность угловых измерений [1].

Новым витком развития инерциальных технологий стало появление около 20 лет назад микроэлектромеханических систем, которые составляют все большую конкуренцию традиционным инерциальным датчикам. Например, МЭМС-акселерометры устанавливаются в системах безопасности автомобилей, где необходимо детектировать резкие изменения ускорения. Также они применяются в таких устройствах, как мобильные телефоны и игровые приставки, для определения положения дисплея или обеспечения взаимодействия между пользователем и устройством.

Однако использование МЭМС для навигации развивается по другому сценарию. В первую очередь, это связано с повышением точности определяемых ими параметров, повышением стабильности работы при изменении температуры, влажности и других характеристик окружающей среды, расширением диапазона измерений и увеличением их вычислительной мощности, что позволило значительно расширить их возможности при интегрировании с другими системами и учете модели ошибок датчика.

Технология МЭМС обладает значительными перспективами, особенно в области внедрения в уже существующие навигационные комплексы и устройства, построенные на датчиках ВОГ, предназначенные для точного земледелия, высокоточного управления автомобильным транспортом и беспилотными аппаратами [1].

▼ **Ценовые изменения. Преимущества использования**

Все приложения, связанные с управлением удаленными объектами, требуют наличия системы, с помощью которой диспетчер или оператор понимает, какие действия необходимо произвести с объектом в том или ином случае. Высокоточные навигационные комплексы основываются на инерциальных датчиках, традиционно изготовленных по технологии ВОГ или ЛГ. И компании несут затраты приблизительно в 30 000 дол. на покупку подобных систем, потому что они в 20 раз точнее и надежнее, чем системы, основанные на МЭМС, которые стоят около 500 дол.

Но что, если навигационные комплексы, основанные на МЭМС, теряют в точности всего 20–30% по сравнению с комплексами, основанными на ВОГ? В пользу какой из систем тогда будет принято решение о приобретении?

Рассмотрим сегмент рынка, связанный с высокоточным земледелием. Чаще всего здесь применяются многоантенные спутниковые устройства, предназначенные для определения элементов ориентирования. Такие системы значительно дороже, чем одноантенные, по причине необходимости закупки дополнительного оборудования. Но даже в этом случае они стоят гораздо меньше, чем ГНСС/ИНС комплексы (спутниковые навигационные комплексы, интегрированные с инерциальными датчиками), основанные на ВОГ.

Навигационные устройства для автомобильного транспорта

разделяются на встроенные и мобильные. Из-за высокой стоимости инерциальные системы, основанные на ВОГ, никогда не смогут найти широкого распространения в автомобильном сегменте рынка, за исключением комплексов, которые используются как эталоны для разработки и улучшения устройств, основанных на МЭМС.

Встроенные навигационные устройства в большинстве случаев работают совместно с другими датчиками автомобиля, включая одометр, которые снабжают их вспомогательной информацией, обеспечивая возможность движения в отсутствии сигналов ГНСС. Подобные устройства также способны использовать данные, получаемые от датчиков МЭМС, что снижает общую стоимость навигационных устройств.

В мобильных навигационных устройствах применяются датчики МЭМС для восстановления траектории движения во время кратковременных срывов слежения за навигационными спутниками. Хотя подобные устройства и не могут соперничать по точности со встроенными, они обладают определенным спросом, благодаря достаточно низкой стоимости. Устройства для автомобильной навигации, основанные на датчиках МЭМС, активно разрабатываются и совершенствуются, при этом оборудование, основанное на ВОГ и ЛГ, используется в качестве эталона для проведения сравнительного анализа.

Еще одной областью применения высокоточных инерциальных систем, в особенности устройств, основанных на технологии МЭМС, являются приложения для управления беспилотными аппаратами (наземными, авиационными, подводными и др.). Это связано с жесткими ограничениями по энергоемкости и стоимости датчиков, применяемых в данной области. Но, к сожалению, использовать эти

инерциальные системы для решения подобных задач невозможно, так как они не могут обеспечить необходимую высокую скорость измерений.

▼ ГНСС/ИНС в навигационных комплексах

Для исследований технических характеристик навигационных комплексов, включающих приемник ГНСС, интегрированный с различными типами ИНС, были разработаны две модели. Причем в обеих из них использовались одинаковые приемники ГНСС, МЭМС-акселерометры, МЭМС-магнетометры, МЭМС-барометры и фильтры обработки измерений. Единственное отличие состояло в следующем: в одной — использовался волоконно-оптический гироскоп, а в другой — микроэлектромеханический гироскоп.

Навигационные комплексы проектировались с целью обеспечения элементами ориентирования устройства стабилизации антенной решетки, размещаемой на крыше автомобиля и предназначенной для установления и поддержания связи с геостационарным спутником (рис. 1).

Оба навигационных комплекса были выполнены в виде бесплаформенного ГНСС/ИНС устройства, которое имело возможность определения координат и составляющих скорости с высокой дискретностью, а элементов ориентирования — с частотой не меньше 300 Гц.

В разработанных навигационных комплексах данные от инерциального блока поступали в фильтр обработки с частотой 1024 Гц и использовались для прогнозирования значений координат, составляющих скорости и элементов ориентирования. Эти значения, полученные из ГНСС-решения двухантенного устройства, применялись для обновления навигационного фильтра. Для получения вспомогательной информации при

вычислении высотной составляющей в системе предназначался барометр.

Помимо этого в комплексы был включен магнитометр, результаты измерений которого использовались для задания начального значения направления движения и его обновления во время длительного отсутствия сигналов от навигационных спутников. Параллельно с навигационным фильтром применялись специальные модели ошибок, которые корректировали данные магнитометра, ошибки двухантенного устройства, связанные с погрешностями в установке антенн для приема сигналов ГНСС.

Навигационные комплексы были разработаны в двух конфигурациях.

Первая — содержала два ВОГ (для определения значений азимута и тангажа), МЭМС-гироскоп (для определения значения крена), трехосевой МЭМС-акселерометр, трехосевой МЭМС-магнитометр и МЭМС-барометр (рис. 2, в центре). Общая стоимость комплектующих этого комплекса составила около 8000 дол.

Вторая конфигурация содержала три МЭМС-гироскопа (для определения всех элементов ориентирования), идентичные первой конфигурации трехосевой МЭМС-акселерометр, трехосевой МЭМС-магнитометр и МЭМС-барометр (рис. 2, справа).



Рис. 1
Общий вид антенн ГНСС, установленных на крыше автомобиля



Рис. 2

Общий вид инерциальных блоков навигационных комплексов: тактического класса (слева), на ВОГ (в центре) и на МЭМС-гироскопах (справа)

Общая стоимость комплектующих этого комплекса составила приблизительно 1000 дол. [2].

Цена комплектующих может изменяться в зависимости от рыночных условий и объемов закупок, но крайне важно помнить, что стоимость навигационного комплекса, основанного на ВОГ, всегда будет в 6–8 раз больше, чем комплекса, основанного на МЭМС.

▼ Компоненты навигационных комплексов

Представленные в статье навигационные комплексы были разработаны компанией Trusted Positioning (Канада) на основе следующих компонентов: приемник ГНСС Trimble BD982; инерциальный блок ADIS16385 компании Analog Devices (США); волоконно-оптический гироскоп u-FORS-6U компании Litef (Германия); барометр MS5803-01 компании Measurement Specialties (США); магнитометр

HMC5883L компании Honeywell Aerospace (США) [2].

Для отображения траекторий движения на местности использовались картографические материалы сервиса Google Earth. Для обработки измерений применялся процессор AM3703 с тактовой частотой 1 ГГц компании Texas Instruments (США).

▼ План испытаний

С целью выявления уровня точности измерений разработанными навигационными комплексами были проведены испытания при следующих условиях [2].

1. «Открытое небо» — уверенный прием сигналов спутников ГНСС для оценки точности измерения элементов ориентирования.

2. Прерывистое слежение за спутниками ГНСС с наличием эффекта многолучевости, как в случае выполнения измерений в районах с плотной городской застройкой, где наблюдается низкое качество получения ГНСС-решения или его полная потеря в результате «затенения» неба высокими зданиями. Задачей данного испытания было оценить качество ГНСС/ИНС фильтра.

3. Позиционирование только по датчикам ИНС для выявления возможностей работы устройств в случае полного отсутствия данных ГНСС. В этих условиях навигационные комплексы начинают работать только после введения координат исходной точки. Такой сценарий применим в военных приложениях, где данные ГНСС могут оказаться искусственно загробленными, или в случае, когда измерительный комплекс не может определить свое исходное положение по навигационным спутникам, например при запуске системы в ангаре. Также данное испытание было проведено для наглядной демонстрации различий в возможностях двух исследуемых инерциальных систем.

В качестве эталона для проведения сравнительного анализа за двух навигационных комплексов применялся инерциальный блок тактического класса (рис. 2, слева), данные которого использовались вместе с дифференциальным ГНСС-решением в режиме реального времени. Результаты этих измерений были обработаны с помощью сглаживающего алгоритма Rauch-Tung-Striebel (RTS) для получения решения «прямо-обратно». Точность эталонных измерений составила $0,03^\circ$ для элементов ориентирования и несколько сантиметров для координат за все время исследований.

▼ Результаты испытаний в условиях «открытого неба»

В условиях, когда слежение за спутниками ГНСС было непрерывным, навигационные устройства показали схожие результаты по определению координат. Составляющие вектора скорости, которые были определены в основном приемниками ГНСС и акселерометрами, также не выявили значительных различий. Поэтому сравнение проводилось по азимуту, крену и тангажу, так как точность этих параметров в большей части зависит от качества гироскопов.

Было проведено два тестирования: на дороге с ровным покрытием и в условиях бездорожья. Это было сделано для сравнения элементов ориентирования двух инерциальных систем, полученных с разной динамикой.

На дороге с ровным покрытием навигационное устройство, основанное на ВОГ, продемонстрировало более высокую точность (табл. 1). Но это преимущество составило всего 5% от СКП [2].

Испытания, проведенные в условиях бездорожья (табл. 2), включали: резкое начало движения и торможение, крутые повороты и искусственные заносы.

Здесь комплекс, основанный на ВОГ, показал себя немного лучше, так как средняя квадратическая погрешность (СКП) определения элементов ориентирования с помощью МЭМС-гироскопов сильно увеличилась, особенно для значений крена, который подвергался наибольшему изменению.

У обоих исследуемых инерциальных систем оказались сопоставимые результаты при определении углов ориентирования. Дискретность измерений для ВОГ составила 1000 Гц, для МЭМС-гироскопов — 330 Гц. На практике для всех навигационных приложений дискретность выдачи измерений в 330 Гц более чем достаточна для получения точности элементов ориентирования порядка 0,15°, за исключением приложений с высокой динамикой, где значения крена могут резко изменяться. Для применения в подобных приложениях лучше подходят волоконно-оптические гироскопы, позволяющие получать точные результаты благодаря более высокому значению дискретности выдачи измеренных значений и более низкому уровню шума.

▼ Результаты испытаний в условиях плохого приема сигналов спутников ГНСС

Испытания проводились в центре города с многочисленными узкими проездами и участками с высокими строениями, где перемещение было возможно только с низкой скоростью из-за плотного движения.

В данном исследовании в качестве эталона использовались координаты траектории движения, полученные только по измерениям приемника ГНСС, так как в координаты, измеренные навигационным комплексом в период отсутствия сигналов с навигационных спутников, вносились поправки, определенные гироскопами.

Погрешность определения элементов ориентирования на дороге с ровным покрытием

Таблица 1

Тип ИНС	Средняя квадратическая погрешность, °			Средняя квадратическая погрешность <0,3°, %		
	Крен	Тангаж	Азимут	Крен	Тангаж	Азимут
ВОГ	0,15	0,08	0,15	95,60	97,95	98,38
МЭМС	0,08	0,09	0,16	98,04	95,70	87,90

Погрешность определения элементов ориентирования при движении по бездорожью

Таблица 2

Тип ИНС	Средняя квадратическая погрешность, °			Средняя квадратическая погрешность <0,3°, %		
	Крен	Тангаж	Азимут	Крен	Тангаж	Азимут
ВОГ	0,09	0,07	0,11	95,75	99,49	95,06
МЭМС	0,19	0,13	0,19	93,07	92,16	81,25

На рис. 3 можно наблюдать скачки траектории, вызванные срывами сигналов от навигационных спутников, составляющие десятки метров.

На рис. 4 и 5 видно, что траектории движения для обоих комплексов являются стабильными. Однако погрешность определения координат навигационным комплексом с использованием ВОГ не превысила 5 м, а МЭМС-гироскопов — 9 м.

Для анализа различия конфигурации траекторий они были наложены друг на друга в более крупном масштабе (рис. 6). Зеленым цветом изображена траектория, полученная с помощью МЭМС-гироскопов.

Красным цветом — траектория, полученная с помощью ВОГ, она ближе к реальному маршруту движения. Однако обе траектории сопоставимы друг с другом по качеству, особенно, если принять во внимание сложные условия для приема сигналов спутников ГНСС и разницу в стоимости датчиков. СКП элементов ориентирования, полученная при проведении данного исследования, для обоих комплексов не превысила 0,4°. Заметное преимущество навигационного комплекса, основанного на ВОГ, было отмечено только при определении азимута (СКП для ВОГ составило 0,25°, для МЭМС-гироскопов — 0,39°).

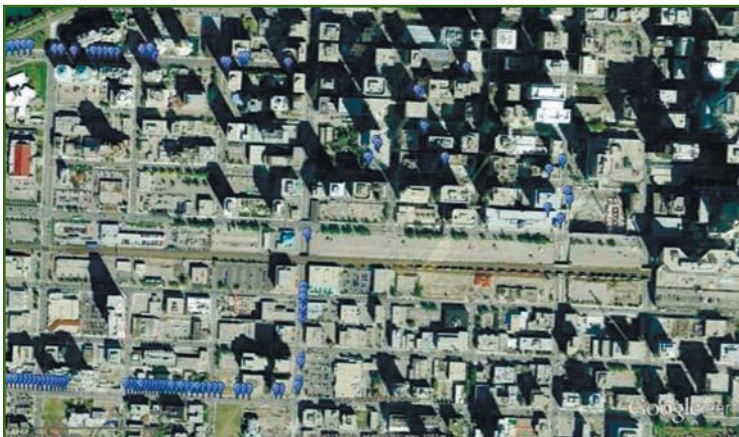


Рис. 3

Траектория движения по данным ГНСС



Рис. 4
Траектория движения по данным навигационного комплекса с использованием ВОГ

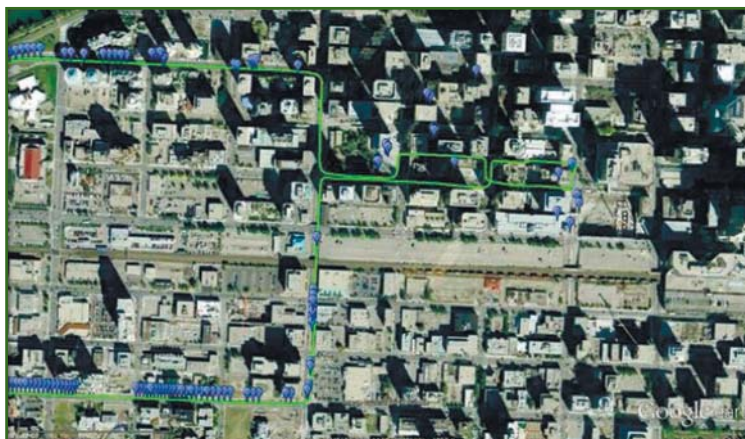


Рис. 5
Траектория движения по данным навигационного комплекса с использованием МЭМС



Рис. 6
Совмещенные траектории движения в крупном масштабе

Значения СКП определения крена и тангажа были близки для двух комплексов и составили $0,2-0,25^\circ$ [2].

Далее в процессе тестирования была проведена серия искусственных срывов слежения за навигационными спутниками

продолжительностью 10, 60 и 90 с. Результаты для обоих исследуемых устройств приведены в табл. 3.

Таким образом, можно сделать вывод, что для условий с прерывистым слежением за навигационными спутниками и эффектом многолучевости исследуемые устройства, основанные на ВОГ и МЭМС-гироскопах, показали схожие по качеству результаты. Поэтому преимущество по результатам этих испытаний следует отдать комплексу, основанному на МЭМС-гироскопах, благодаря его низкой стоимости по сравнению с комплексом на ВОГ.

▼ Результаты позиционирования по датчикам ИНС

Наибольшая разница в результатах между исследуемыми навигационными устройствами была получена при проведении испытания с использованием данных только инерциальных систем. Начальная точка позиционирования в этом случае была задана принудительно, а направление движения — получено с помощью встроенного МЭМС-магнитометра с погрешностью не более 5° . Испытания проводились в условиях бездорожья на протяжении около 20 минут без использования вспомогательной информации от спутниковых навигационных систем. Длина траектории составила приблизительно 12 км.

На рис. 7 изображены: опорная траектория (зеленый цвет), траектория по данным ВОГ (красный цвет) и траектория по данным МЭМС-гироскопов (синий цвет). Финальное смещение для комплекса на ВОГ составило около 750 м, на МЭМС-гироскопах — около 900 м.

Очевидно, что траектория движения, полученная комплексом, основанным на ВОГ (рис. 8), гораздо ближе к опорной траектории в начальном периоде измерений [2].

Решения, полученные с помощью исследуемых навига-

онных комплексов, были достаточно близки друг к другу к концу испытания, потому что данные магнитометра, используемые в качестве вспомогательной информации для определения азимута направления движения, оказывали одинаковое влияние на позиционирование с

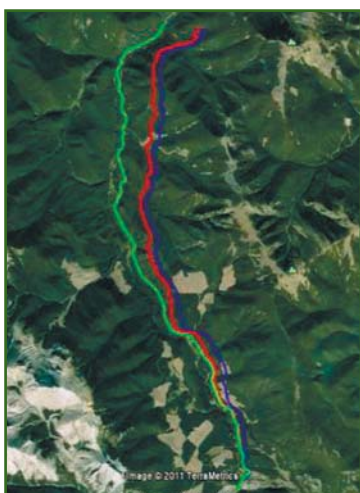


Рис. 7
Траектории движения,
полученные по данным ИНС

помощью обоих комплексов, что, в конечном счете, и привело к схождению траекторий.

В последнем исследовании очевидно преимущество комплекса, основанного на ВОГ, особенно в точности определения значений крена и тангажа. Точность определения значений азимута для обоих навигационных комплексов зависела в первую очередь от точности измерений магнитометра.

По результатам данного исследования также было определено, что уход значений координат на 20–30% меньше у навигационного устройства, основанного на ВОГ. Результаты измерений значений элементов ориентирования в этом случае в 2 раза точнее, чем у устройства, основанного на МЭМС-гироскопах. В значительной степени это произошло из-за того, что при измерениях наблюдалось несколько уходов гироскопа, которые было крайне сложно спрогнозировать

Погрешность определения элементов ориентирования для серии искусственных срывов

Таблица 3

Срыв, с	СКП крена, °		СКП тангажа, °		СКП азимута, °	
	ВОГ	МЭМС	ВОГ	МЭМС	ВОГ	МЭМС
10	0,06	0,10	0,09	0,10	0,07	0,10
60	0,07	0,20	0,15	0,20	0,15	0,19
90	0,10	0,27	0,20	0,27	0,20	0,30

и учесть в модели ошибок без использования внешней вспомогательной информации.

Данные магнитометра позволили снизить влияние дрейфа гироскопа, отвечающего за измерение значений азимута, тогда как данные акселерометров обеспечивали учет дрейфа гироскопов, измеряющих значения крена и тангажа. Однако некоторые погрешности ухода МЭМС-гироскопов не были учтены, что и вызвало ухудшение качества измерений данным навигационным комплексом по сравнению с комплексом, основанным на ВОГ.

Но это не означает, что ВОГ устарели и больше не найдут применения. Они все еще остаются востребованными в приложениях, где необходима повышенная надежность и точность измерений, что оправдывает их высокую стоимость.

Если на основании полученных результатов провести анализ по показателю цена/качество для навигационных устройств, то выбор, безусловно, будет за микроэлектромеханическими системами. Но и волоконно-оптические гироскопы до сих пор незаменимы в некоторых навигационных приложениях.

В настоящее время уже разрабатываются решения, которые через 10–15 лет заменят МЭМС, а может быть и ВОГ. Это создаст новый революционный скачок в области инерциальных технологий.

▼ Список литературы

1. Распопов В.Я., Матвеев В.В. Основы построения платформенных инерциальных навигационных систем. — СПб: ГНЦ РФ ОАО Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2009.
2. INS Face Off MEMS versus FOGs, Chris Goodall, Sarah Carmichael, Naser El-Sheimy, Bob Scannell, Inside GNSS, июль/август, 2012.



Рис. 8
Начальный участок
траекторий, полученных
по данным ИНС

Результаты проведенных исследований позволили сделать вывод, что в большинстве случаев МЭМС могут широко применяться в пользовательских приложениях с минимальной потерей точности, при этом значительно снижая стоимость оборудования.

RESUME

Two directions of the inertial navigation development — fiber optic gyros and MEMS — are considered. The review of their possible use is given. A comparative analysis is introduced for the real time operation of the positioning systems based on these technologies.