

Гіроскопи в прецизійних навігаційних системах: яку технологію обрати?

Кріс Гудалл (Chris Goodall), Сара Кармайкл (Sarah Carmichael), Боб Цаннелл (Bob Scannell)

У волоконно-оптичних гіроскопів (ВОГ), які раніше були недорогими аналогами гіроскопів інших типів, зокрема кільцевих лазерних гіроскопів (КЛГ), з'явився новий конкурент — гіроскопи на основі мікроелектромеханічних систем (МЕМС), які поступово забирають частку ринку у традиційних ВОГ. Сьогодні полем битви між МЕМС-гіроскопами і ВОГ стали такі сфери застосування, як системи стабілізації антенних решіток, системи управління сільськогосподарськими машинами, а також системи навігації цивільних транспортних засобів.

Для того, щоб виявити схожі риси між обома технологіями під час їхньої експлуатації в навігаційних системах, було виконано порівняння високоякісних МЕМС-гіроскопів із бюджетними ВОГ. Навігаційне програмне забезпечення та відповідні випробування дали змогу отримати результати, які дали змогу провести аналіз і з'ясувати, чи справді МЕМС-гіроскопи можна встановлювати в навігаційних системах тактичного рівня.

ВСТУП

В останні кілька років у сфері розроблення навігаційних систем спостерігається зростання популярності МЕМС-гіроскопів завдяки їхній меншій похибці вимірювання, високій стабільності характеристик за умови зміни умов довкілля, ширшій смузі, нижчій чутливості до лінійного прискорення (g-чутливості) і вбудованим обчислювальним функціям, за допомогою яких можна реалізувати алгоритми узагальнення даних і моделювання помилок датчиків.

Сьогодні дедалі більше розширюється сфера застосування прецизійних точних інерціальних навігаційних систем (ІНС), при цьому МЕМС-пристрої також успішно захоплюють ринки, на яких раніше домінували ВОГ. У сфері систем стабілізації антенних решіток перехід від технології ВОГ до технології МЕМС стає найбільш очевидним.

Застосування МЕМС-гіроскопів у системах керування машинами та механізмами також може дати низку

переваг. Традиційно користувачі надавали перевагу навігаційним системам на основі ВОГ або КЛГ вартістю понад \$30 000, оскільки такі рішення були у 20 разів точнішими та надійнішими, ніж стандартні навігаційні системи на основі МЕМС-гіроскопів вартістю \$1 000. Системи точного землеробства, а також різні системи наземного і повітряного безпілотного транспорту — дві показові галузі, де застосування навігаційних систем на основі недорогих МЕМС-гіроскопів дасть значні переваги.

НАВИГАЦІЙНЕ ОБЛАДНАННЯ, ЩО ПРАЦЮЄ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Систему навігації, що описується в цьому матеріалі, було розроблено з метою отримання даних про просторове положення з високою швидкістю, що передаються в електропривод, який зі свого боку стабілізував встановлену на даху транспортного засобу антенну

решітку. Завданням антенної решітки було підтримання зв'язку з геостаціонарним супутником.

Цю навігаційну систему використовували як безплатформний навігатор на основі ІНС/GNSS, що забезпечує швидке передавання інформації про положення і швидкість. Відомості, отримані від інерціального вимірювального модуля, надходили в навігаційний фільтр із частотою 1 000 Гц, і ці пакети даних призначалися для прогнозування місця розташування, швидкості та просторової орієнтації. Дані від приймача GNSS про координати, швидкість і напрямок, отримані від здвоєних антен, використовували як оновлювані значення для навігаційного фільтра. Коли дані від приймача GNSS не були доступні, для визначення курсу (напрямку руху) застосовували магнітометр, а для визначення висоти — барометр.

Паралельно з роботою навігаційного фільтра виконувалися спеціальні процедури калібрування. За допомогою цих процедур здійснювалося калібрування магнітометра, калібрування зсуву положення здвоєної антени, калібрування зсуву положення інерціального вимірювального модуля і калібрування рівня вібрації транспортного засобу з метою визначення статичного періоду.

Система була створена для роботи з двома варіантами апаратної реалізації. Перша реалізація складалася з двох ВОГ (для визначення тангажу і курсу), одного МЕМС-гіроскопа (для визначення крену), тривісного МЕМС-акселерометра, тривісного МЕМС-магнітометра і МЕМС-барометра, водночас загальна вартість сенсорного обладнання становила приблизно \$8 000.

Друга реалізація містила три МЕМС-гіроскопи (для визначення всіх кутів просторової орієнтації), а також тривісний МЕМС-акселерометр, тривіс-

ний MEMC-магнітометр і MEMC-барометр, передбачені і в попередній реалізації, при цьому загальна вартість обладнання становила близько \$1 000. Ціни на ці системи можуть коливатися залежно від ринкових умов і обсягів закупівель, але, як правило, системи на основі BOG у 8–10 разів дорожчі, ніж системи на основі MEMC.

MEMC-гіроскопи та MEMC-акселерометри, які використовуються в цій системі, вірізняються дуже високою стабільністю зміщення, ортогональністю, низькою чутливістю до лінійного прискорення та широкою смугою пропускання в межах свого цінового сегмента. Основне обмеження цієї системи — вимога до забезпечення широкої смуги пропускання. Багато MEMC-акселерометрів мають широку смугу пропускання, але у MEMC-гіроскопів, як правило, смуга пропускання становить 100 Гц або менше. Такі показники оптимальні для застосування в стандартному автомобільному навігаційному обладнанні, але обладнання, для якого було розроблено цю систему, повинно керувати антенною решіткою з високою швидкістю. Крім того, деякі MEMC-гіроскопи забезпечують хорошу стабільність зміщення, але мають вузьку смугу пропускання або високий рівень шуму. MEMC-гіроскопи, що використовуються в цій системі, мають збалансоване співвідношення між шириною смуги пропускання і робочими характеристиками. Фактичні характеристики обраного MEMC-пристрою наведено в таблиці 1.

Швидкість поширення інерційних MEMC-пристроїв неухильно зростає. У результаті в розвиток цієї технології було вкладено значні кошти.

В основі MEMC-гіроскопів, що використовуються в такій системі, лежить багатоядерна архітектура, що забезпечує оптимізований баланс між стабільністю, шумовими характеристиками, лінійністю та чутливістю до лінійного прискорення. Ця архітектура поєднує повністю диференціальні зчетверені резонатори з вбудованою високоякісною схемою узгодження сигналів, унаслідок чого потрібний діапазон відгуку резонатора лежить в ділянці, яка характеризується високою лінійністю, водночас також забезпечується високий ступінь придушення вібрацій.

У багатовісних інерціальних вимірювальних модулях (рис. 1) із вбудованими MEMC-гіроскопами та MEMC-акселерометрами потенційно домінантним джерелом помилок стає ортогональ-

Таблиця 1. Характеристики інерціального вимірювального модуля на основі MEMC (ADIS16485)

	Параметр	Значення
Гіроскопи	Смуга пропускання	330 Гц
	Нестабільність зміщення	6.25°/год
	Випадкове блукання кутової швидкості	0.3°/√год
	Чутливість до лінійного прискорення	0.009°/c/g
Акселерометри	Смуга пропускання	330 Гц
	Нестабільність зміщення	32 мкг
	Випадкове блукання швидкості	0.023 м/с/√год

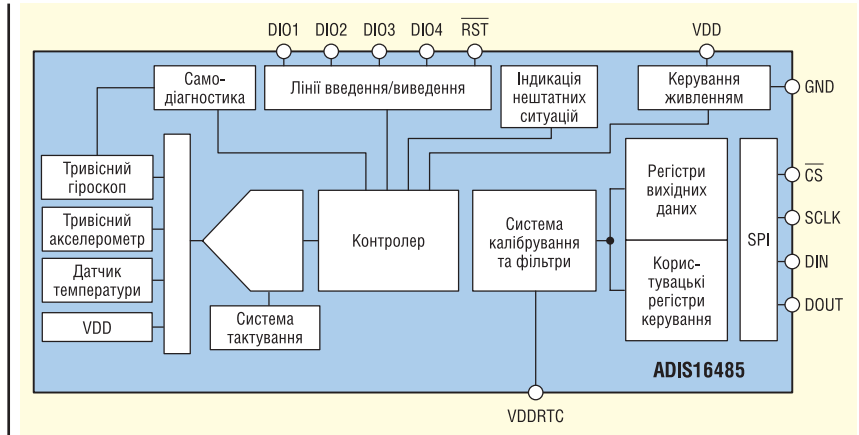


Рис. 1. Блок-схема інерціального вимірювального модуля (ADIS16485)

ність датчиків за осями X, Y, Z. Зазвичай цей параметр позначається або як чутливість за поперечною віссю, або як кутове відхилення. Досить часто в технічній документації на різні MEMC-компоненти можна побачити значення чутливості за поперечною віссю, що дорівнює $\pm 2\%$. Інерціальний вимірювальний модуль, який використовується в цій системі, має чутливість за поперечною віссю, що дорівнює 0.087% (ортогональність 0.05°). Що ще більш важливо, ця характеристика залишається постійною при зміні температури завдяки спеціальному калібруванню пристрою, що виконується на фабриці. Для заданої швидкості обертання, наприклад за віссю нишпорення, швидкість за ортогональними осями має визначатися як добуток чутливості за поперечною віссю на швидкість за віссю нишпорення, навіть коли немає обертання за осями крену і тангажу. За похибки за поперечною віссю, що дорівнює 2%, як правило, сумарний позаосьовий шум на порядок перевищує власний шум гіроскопа, але чутливість інерціального вимірювального модуля, що становить 0.087%, у цьому

разі оптимально збалансовано з власним рівнем шуму гіроскопа.

У багатоосьових пристроях не менш важливими є такі параметри, як доступна смуга пропускання і пов'язана з нею можливість узгодження фаз за всіма. Деякі гіроскопи мають обмежену смугу пропускання, зумовлену необхідністю придушення сумарного шуму, в той час як інші мають обмежену смугу пропускання (зазвичай нижче 100 Гц) через вбудовані схеми оброблення сигналів, що використовуються в контурі зворотного зв'язку. Це може призвести до появи додаткових фазових помилок, що виникають у тракці проходження сигналу, особливо у фільтрі Калмана. Використовуваний у цьому разі інерціальний вимірювальний модуль, що має смугу пропускання 330 Гц і настроювану систему фільтрації, дає змогу мінімізувати вплив джерел помилок і оптимізувати системні помилки за допомогою вбудованих функцій фільтрації навіть у польових умовах.

Основні датчики, передбачені в такому інерціальному вимірювальному модулі, характеризуються високою якістю придушення сигналів вібрації та

Таблиця 2. Характеристики BOG (uFors-6U)

	Параметр	Значення
Гіроскопи	Ширина смуги пропускання	1 000 Гц
	Нестабільність зміщення	3°/год
	Випадкове блукання кутової швидкості	0.1°/√год

високою лінійністю, що робить їх не тільки придатними для застосування у високодинамічних системах, а й високонадійними та передбачуваними під час роботи в екстремальних умовах навколишнього середовища.

ВОГ, що використовуються в цій системі, були обрані на основі поєднання ціни, робочих характеристик і розмірів. Смуга пропускання, стабільність зсуву і рівень шуму цих ВОГ стали визначальними факторами при остаточному виборі датчиків. Їхні основні характеристики наведено в таблиці 2. У ВОГ порівняно з МЕМС-гіроскопом менша нестабільність зсуву і менша величина випадкового блукання кутової швидкості.

НАВІГАЦІЙНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Програмне забезпечення для навігації в реальному часі обробляло дані системи з частотою 1000 Гц і функціонувало на основі класичного механізму безплатформної інерціальної навігаційної системи (БІНС) з оновленнями значень вимірювань. Оновлені значення вимірювань надходили від різних джерел, і до цих оновлюваних параметрів належать:

- дані про положення і швидкість, отримані від приймача GNSS;
- оновлені дані про напрямок руху, отримані від здвоєної антени;
- оновлені дані про напрямок руху, отримані від магнетометра;
- оновлені дані про висоту, отримані від барометра;
- додаткові оновлені дані про швидкість, отримані від системи діагностики автомобіля OBDII.

Кожне оновлене значення використовувалося для корекції відхилення траєкторії рішення на основі ІНС, але передача самих оновлюваних значень могла перериватися, або вони могли бути неточними.

Оновлені дані про напрямок від здвоєної антени характеризуються високою точністю, але схильні до впливу багатопроменевого поширення. Таким чином, оновлені дані про напрямок від здвоєної антени можуть бути надійними тільки під час роботи системи на відкритому просторі. Те ж саме справедливо і для даних про положення і швидкість, одержуваних від приймача GNSS, що використовує систему диференціальної корекції.

Дані про напрямок, що надходять від магнітометра, можуть бути неточ-

ними через великі кути нахилу, що виникають через погану вертикальну видимість під час калібрування.

Точність магнітометрів також може погіршуватися під час роботи поблизу інших металевих об'єктів — наприклад, під час руху поруч з іншими транспортними засобами. Таким чином, магнітометр використовувався для того, щоб надавати дані системі в ті моменти, коли дані від приймача GNSS були недоступні, або для того, щоб зменшити відхилення від дійсної траєкторії під час дуже тривалих періодів простою приймача GNSS (наприклад, протягом 20 хв).

Для визначення висоти у випадках, коли дані від приймача GNSS були недоступні або неточні, використовувався барометр. Щоб не допустити відхилення за швидкістю за відсутності оновлених даних від GNSS, особливо під час прямого руху вперед, використовували оновлені значення швидкості, які також підвищили точність визначення положення цього рішення, що, своєю чергою, дало змогу відмітати неточні оновлені дані про місцезнаходження від приймача GNSS. Це навігаційне програмне забезпечення було створено для забезпечення точних результатів у будь-яких умовах роботи приймача GNSS.

ВИПРОБУВАННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Для порівняння обох реалізацій навігаційної системи було розроблено три методи випробувань на рівні системи:

- Випробування на відкритому просторі з хорошим сигналом GNSS для оцінювання точності даних за всіяма крену і тангажу, а також даних про курс.
- Випробування, за якого можливе багатопроменеве поширення сигналів GNSS, наприклад, в умовах щільної забудови в центрі міста, де приймач GNSS може видавати неточні дані через високі будівлі. Мета цього випробування — порівняння відфільтрованих даних про положення, які також надають інформацію про похибки вимірювання кутового просторового положення і швидкості.
- Випробування роботи тільки ІНС для оцінки дрейфу цієї системи під час визначення положення, що також дасть інформацію про швидкість і кутове просторове положення.

Таблиця 3. Результати випробування на відкритому просторі

Середн. кв. похибка вимірювання	ВОГ	МЕМС
Крену	0.08°	0.1°
Тангажу	0.08°	0.1°
Курсу	0.13°	0.14°

РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАННЯ НА ВІДКРИТОМУ ПРОСТОРІ

За умови доступності даних GPS і прямої видимості системою кількох супутників результати позиціонування та вимірювання швидкості були порівнянними між обома системами. Параметри кутового просторового положення — крен, тангаж і курс — були основними параметрами для аналізу якості функціонування навігаційної системи, оскільки вони значною мірою визначаються робочими характеристиками гіроскопа (табл. 3).

ПОГІРШЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ ВІД GNSS

Наступне випробування було призначене для порівняння якості роботи двох систем при багатопроменевому поширенні сигналів GNSS. Автомобіль переміщався центром Калгарі, де було кілька дуже вузьких провулків, при цьому автомобіль рухався повільно в потоці машин і в оточенні високих будівель.

Тепер до основних параметрів для аналізу якості роботи навігаційної системи відносяться і результати визначення місцезнаходження, оскільки гіроскопи можуть істотно коригувати дані про місцезнаходження за відсутності якісних даних від приймача GNSS. Результати випробування показують, що дві системи видають більш-менш однакові показники, хоча система на основі ВОГ була приблизно на 20–30% точнішою.

На рисунку 2 показано траєкторію руху системи тільки з використанням даних від GPS. На роботу високоточного приймача GPS, що застосовувався в рамках цього випробування, впливали численні відбиті сигнали під час руху в щільній міській забудові в центрі міста. Рішення на основі GPS мало похибку визначення місцезнаходження до 100 м.

Траєкторія руху рішення з інтегрованим ВОГ, показана червоним кольором (рис. 3), чітко відображає шлях, пройдений автомобілем у центрі міста, з точністю до 10 м або вище.



Рис. 2. Результати визначення місцезнаходження, що надаються рішенням на основі GPS з багатопроменевим поширенням

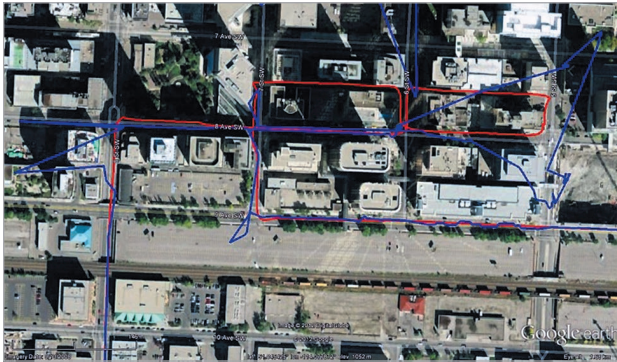


Рис. 3. Траєкторія руху рішення на основі BOG і GPS (червоним кольором показано траєкторію з працюючими BOG і приймачем GPS, синім кольором — тільки з працюючим приймачем GPS)

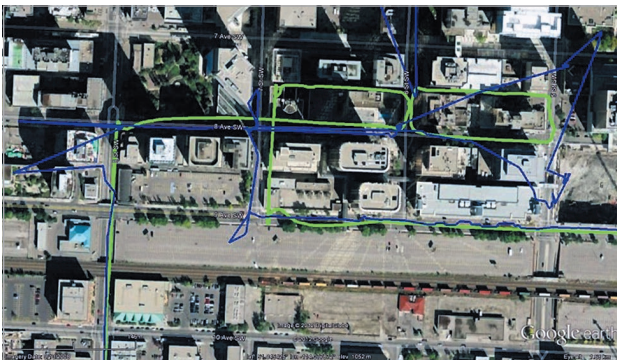


Рис. 4. Траєкторія руху рішення на основі MEMS і GPS (зеленим кольором показано траєкторію з працюючими MEMS і приймачем GPS, синім кольором — тільки з працюючим приймачем GPS)

Точність позиціонування рішення на основі MEMS-компонентів із траєкторією, показаною на рисунку 4 зеленим кольором, завжди перебуває в межах 15 м. Формування результатів вимірювань цього рішення було більш «затягнутим» через неточні оновлені дані про місцезнаходження від GNSS внаслідок меншої значущості прогнозних значень, які надходили від ІНС.

Щоб допомогти рішенням на основі MEMS у роботі з неточними оновлюваними даними від приймача GPS, було використано додаткові датчики. На рисунку 5 показано траєкторію із застосуванням додаткових даних від діагностичної системи автомобіля OBDII, яка дає змогу визначати швидкість автомобіля.

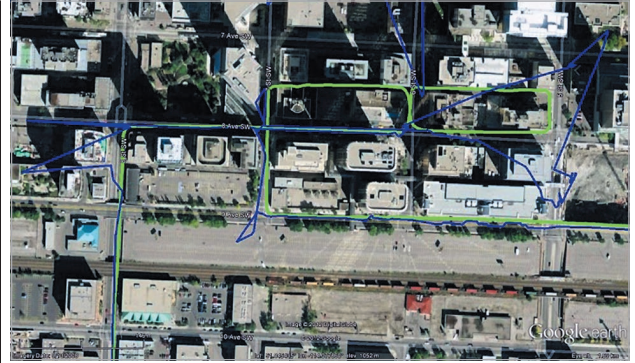


Рис. 5. Траєкторія руху рішення на основі MEMS, GPS і OBDII (зеленим кольором показано траєкторію з працюючими MEMS, приймачем GPS і системою OBDII, синім кольором — тільки з працюючим приймачем GPS)



Рис. 6. Траєкторія системи на основі MEMS з OBDII (показана зеленим кольором), траєкторія системи на основі BOG без OBDII (показана червоним кольором) і траєкторія системи тільки з працюючим приймачем GPS (показана синім кольором)

Точність рішення на основі MEMS завжди перебуває в межах 10 м і може бути навіть трохи вищою за точність системи на основі BOG без використання OBDII, як показано у збільшеному масштабі на рисунку 6.

РЕЗУЛЬТАТИ, ЩО НАДАЮТЬСЯ РІШЕННЯМ ТІЛЬКИ З ПРАЦЮЮЧОЮ ІНС: ПРИКЛАД І КОНТРОЛЬНІ ПОКАЗНИКИ

Останнє випробування — порівняння якості дії двох рішень тільки з працюючими ІНС. При цьому також використовувалися оновлювані дані від приймача GNSS під час роботи на відкритому просторі. Під час випробування антени, що приймає дані від супутників, було вимкнено в обох випадках на 4.5 хв, унаслідок чого було отримано зміщені траєкторії руху, за якими можна судити про якість роботи навігаційної системи. Пройдена відстань за цей час становила приблизно 5 500 м.

На рисунку 7 показано всю траєкторію. Дивлячись на пряму синю лінію, можна зрозуміти, коли було вимкнено приймач GPS (у правому нижньому кутку) і коли його було знову ввімкнено (у лівому верхньому кутку).

Як видно на рисунку 8, у цей період із вимкненим приймачем GNSS система на основі BOG працювала дуже добре і максимальне відхилення траєкторії становило 7 м. Типове відхилення системи на основі BOG після 5 хв роботи стано-

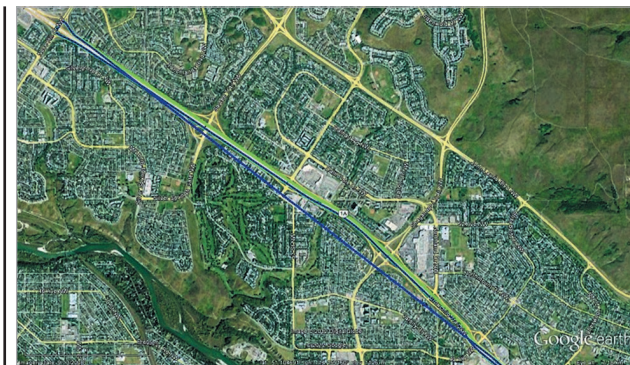


Рис. 7. Траєкторія під час роботи однієї лише ІНС



Рис. 9. Відхилення траєкторії системи на основі MEMC

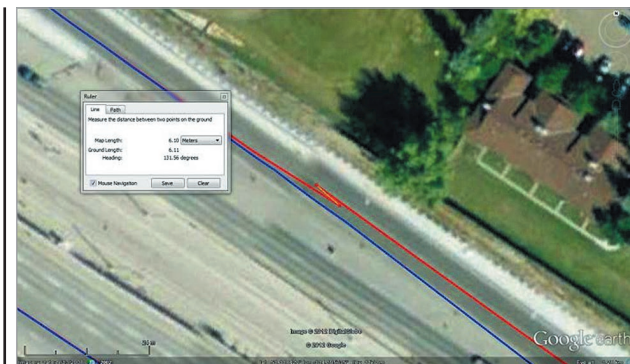


Рис. 8. Відхилення траєкторії системи на основі ВОГ



Рис. 10. Відхилення траєкторії системи на основі MEMC з OBDII

вило 25 м, тому конкретний «відхід» від дійсного місця розташування був трохи кращим, ніж типове відхилення.

Відхилення для системи на основі MEMC становило 75 м після 4.5 хв без надходження оновлених даних від GNSS (рис. 9). Здебільшого таке відхилення зумовлюється лінійним відхиленням від курсу, яке проявляється під час роботи акселерометрів. Після 5 хв без надходження оновлених даних від GNSS відхилення для системи на основі MEMC становило 75 м, що приблизно в 3 рази більше, ніж у випадку з системою на основі ВОГ.

Для підвищення точності системи на основі MEMC було під'єднано діагностичну систему OBDII, водночас відхилення від дійсної траєкторії становило менше ніж 10 м, що еквівалентно точності рішення на основі ВОГ. Типове відхилення для системи на основі MEMC з OBDII становило приблизно 30 м після 5 хв без надходження оновлених даних від GNSS (рис. 10), що також еквівалентно результатам, отриманим під час випробування системи на основі ВОГ.

ми ведеться дуже напружено, особливо зараз, коли характеристики MEMC-пристроїв наближаються до характеристик волоконно-оптичних гіроскопів тактичного рівня. ВОГ все ще мають вищу точність, але вони в 10 разів дорожчі, ніж MEMC-пристрої.

У випадках, коли доступні дані від GNSS і система повинна працювати на відкритому просторі, MEMC-гіроскопи можуть замінити деякі бюджетні волоконно-оптичні гіроскопи. У випадках, коли дані від приймача GNSS є неточними і періодичними, то MEMC-пристроями також можна замінити деякі ВОГ, якщо припустимо зниження точності на 20–30%.

Під час автономної роботи інерціальної навігаційної системи ВОГ все ще характеризуються вищою точністю, але якщо до системи надходять також оновлені значення швидкості транспортного засобу або платформи, то система на основі MEMC може працювати приблизно з тією самою точністю, що й автономна система на основі ВОГ.

Якщо враховувати послідовний розвиток технології MEMC, конкурентоспроможні ціни та можливість використання додаткових датчиків (наприклад, датчиків системи OBDII), то можна припустити, що вже в найближчому майбутньому велика кількість волокон-

но-оптичних гіроскопів буде замінена MEMC-пристроями.

Література:

1. Gelb A. *Applied Optimal Estimation*. The M.I.T. Press. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts, USA, 1974.
2. Grewal M. S. Weill L. R. Andrews A. P. *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. John Wiley and Sons, Inc., USA, 2001.
3. Groves P.D. *Principles of GPS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. Artech House, 2008, Boston, USA.
4. Meditch J. S. *Stochastic Optimal Linear Estimation and Control*. McGraw-Hill, Inc., USA, 1969.
5. Niu X., Nassar S., Syed Z., Goodall C., El-Sheimy N. *The Development of an Accurate MEMS-Based*. 2006.
6. *Inertial/GPS System for Land-Vehicle Navigation Applications*. Proceedings of the ION GNSS 2006. Fort Worth, Texas, USA, September 26–29, 2006.
7. Schmidt G.T. *INS/GPS Technology Trends*. NATO RTO Lecture Series, RTOEN-SET. Massachusetts, USA, 2010.
8. Skog I. *Low-Cost Navigation Systems — A Study of Four Problems*. Doctoral Thesis in Signal Processing. KTH Electrical Engineering. Stockholm, Sweden, 2009.

ВИСНОВОК

Боротьба між MEMC-гіроскопами і волоконно-оптичними гіроскопа-