

УДК 629.734.7

ЗАХАРІН Ф.М., провідний науковий співробітник, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник

ПОНОМАРЕНКО С.О., провідний науковий співробітник, кандидат технічних
наук, старший науковий співробітник

КОВТУН В.І., інженер науково-дослідного відділу

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ІНТЕГРОВАНИХ ІНЕРЦІАЛЬНО-СУПУТНИКОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Узагальнені тенденції удосконалення інтегрованих інерціально-супутникових навігаційних систем (ІСНС) літальних апаратів, коротко розкрита їх сутність та наведені переваги ІСНС над окремими підсистемами

Ключові слова: інтегровані інерціально-супутникові навігаційні системи, інерціальні навігаційні системи, супутникові навігаційні системи, гіроскопи, акселерометри, фільтр Калмана

Модернізація існуючих і створення нових літальних апаратів (ЛА) як військового, так і цивільного призначення, завжди передбачає вибір складу їх навігаційного комплексу (НК), рівень досконалості якого є логічним наслідком еволюції систем навігації і обчислювальної техніки. До складу НК сучасних, модернізованих і перспективних літальних апаратів будь-якого класу входять декілька навігаційних систем, зокрема інерціальні (ІНС) та супутникові (СНС) навігаційні системи [1, 2]. Оскільки ІНС і СНС функціонують за різними фізичними принципами, то вони можуть гармонійно доповнювати одна одну, забезпечуючи підвищення точності і завадозахищеності навігаційних вимірювань. Саме тому розробка і створення інтегрованих інерціально-супутникових навігаційних систем є важливою науково-технічною задачею, а вивчення тенденцій їх розвитку є актуальним напрямком досліджень.

Крім вимог до точності, до навігаційних систем в даний час ставляться вимоги з таких параметрів як цілісність, доступність і безперервність навігаційного забезпечення. Мірою цілісності є ймовірність виявлення виходу робочих характеристик системи (насамперед точності) за певні межі та повідомлення про це протягом заданого інтервалу часу. Доступність визначається ймовірністю одержання споживачем достовірної інформації в заданий момент часу з необхідною точністю. Безперервність характеризується ймовірністю забезпечення споживача достовірною інформацією на заданому інтервалі часу. Достовірність, у свою чергу, визначається як здатність навігаційної системи підтримувати з заданою ймовірністю свої характеристики в необхідних межах на визначеному інтервалі часу в якому-небудь районі. Забезпечення необхідного рівня цих показників найчастіше є більш складною задачею ніж забезпечення необхідної точності навігаційних вимірювань.

ІНС, як найбільш інформативні системи, дозволяють одержувати всю сукупність необхідних параметрів для керування ЛА, включаючи кутову орієнтацію. При цьому такі системи цілком автономні, тобто для їх нормального функціонування не потрібно використання будь-якої інформації від інших систем. Ще однією їх перевагою є висока швидкість надання інформації зовнішнім споживачам: швидкість відновлення кутів орієнтації складає до 100 Гц, навігаційної – від 10 до 100 Гц [2].

У складі ПСНС все частіше використовуються безплатформові інерціальні навігаційні системи (БІНС). Це обумовлюється їхньою підвищеною надійністю, меншою вагою і габаритами, меншим споживанням енергії. Відсутність платформи визначає, як правило, і менший час виставлення системи – обов'язкової процедури первинного визначення орієнтації осей чутливості акселерометрів й ініціалізації координат і швидкостей. Дослідження та практика експлуатації інтегрованих інерціально-супутникових навігаційних систем (ПСНС) показують, що найбільш перспективним засобом корекції БІНС є СНС, які мають найбільш високу точність і глобальність застосування.

Супутникові радіонавігаційні системи стали активно використовуватися як авіаційні системи навігації лише в останнє десятиліття і швидко завойовують місце в штатному складі бортового обладнання. Цьому сприяє, насамперед, їхня висока точність, що для відкритого каналу складає 10...15 м в звичайному режимі та 1...3 м в диференціальному режимі. Прогрес в супутниковій навігації різко прискорився в зв'язку зі створенням не тільки американської (GPS) і російської (ГЛОНАСС) супутникових систем, але і з підключенням країн Європейського Союзу до розвитку загальної мережі супутникових систем (проекти EGNOS, Galileo). За даними експертів в найближчі 15 років очікується суттєве підвищення точності глобальних СНС ГЛОНАСС та GPS – до рівня 15 см. Крім того, планується підвищити потужність супутникових радіонавігаційних сигналів (для GPS - в 100 разів), що безумовно призведе до підвищення завадозахищеності СНС. Але досвід експлуатації СНС показав, що при багатьох позитивних якостях СНС не можуть задовольнити всім сучасним вимогам з якісних характеристик навігаційного забезпечення [3, 4]. Основні переваги і недоліки ІНС і СНС узагальнено в табл. 1.

Таблиця 1

Узагальнені характеристики СНС і ІНС

| Тип системи | Основні переваги | Недоліки |
|-------------|---|--|
| СНС | Висока точність. Похибки не мають тенденції до росту. | Низька швидкість відновлення інформації (1...10 Гц). Відсутність інформації про кутову орієнтацію. Слабка завадозахищеність. |
| ІНС | Висока швидкість видачі інформації (до 100 Гц). Висока інформативність. Повна автономність. Висока завадостійкість та надійність навігаційного забезпечення. | Необмежене зростання похибок у часі. Необхідність знання моделі гравітаційного поля Землі. |

Недолік СНС, пов'язаний з відсутністю інформації про кутову орієнтацію, знімається в спеціалізованих супутникових приймачах із трьома і більшою кількістю антен.

Спільне використання ІНС і СНС дозволяє з одного боку обмежити зростання похибок ІНС, а з іншого боку знизити шумову складову похибок СНС, підвищити темп видачі інформації бортовим споживачам, істотно підняти рівень завадозахищеності. У табл. 2 наведені дані, що характеризують якості ПСНС у порівнянні з окремими традиційними бортовими системами. Ці дані переконливо свідчать про перспективність комплексування ІНС і СНС. Саме тому комітет ІКАО з перспективних навігаційних систем (*FANS- Future Air Navigation System*) прийняв рішення про обов'язкове використання СНС у поєднанні з ІНС. Тому в даний час у всіх галузях авіації основним інформаційним ядром сучасного ПНК повинні бути інтегровані інерціально-супутникові навігаційні системи [2].

Таблиця 2

Порівняльні характеристики ПСНС з окремими ІНС і СНС

| Фактори | Ступінь поліпшення |
|----------------------|-------------------------------|
| Точність | Для ІНС: багаторазово |
| Маса | Зменшення на 30-70% |
| Об'єм | Зменшення на 50-60% |
| Споживана потужність | Зменшення на 25-50% |
| Надійність | Збільшення \approx у 2 рази |
| Ступінь резервування | Збільшення на 50 % більше |
| Вартість | Зменшення на 30% і більше |

До основних тенденцій розвитку ПСНС ЛА можна віднести:

покращення характеристик точності інерціальних вимірювачів – гіроскопів і акселерометрів, зменшення їх вартості та мініатюризація;

використання у складі ПСНС безплатформових інерціальних навігаційних систем;

покращення таких параметрів ПСНС, як точність, цілісність, доступність, безперервність;

реалізація схеми можливого комплексування ІНС і СНС у напрямку підвищення рівня їх програмно-алгоритмічної інтеграції;

підвищення рівня уніфікації та потенційної завадозахищеності інтегрованих ПСНС.

Підвищення характеристики точності інерціальних датчиків (вимірювачів кутової швидкості та акселерометрів) є основним фактором росту точності ІНС. Слід зауважити, що стандартна за вимогами ІКАО точність ІНС літаків (1,85 км за годину польоту) забезпечується інерціальними датчиками з рівнем точності 0,01 град/год, 10 μ g та 0,01% (похибки масштабних коефіцієнтів). Характеристики перспективних ПСНС наведено в табл. 3 [5]. На сьогодні існує стійка тенденція зменшення розмірів вимірювачів кутової швидкості та акселерометрів і зменшення їх вартості. Хороші результати у покращенні цих характеристик отримані для волоконно-оптичних гіроскопів, вражаючих результатів мініатюризації вдалося

досягти для гіроскопів і акселерометрів на основі кремнієвих мікроелектромеханічних (МЕМС) технологій, рис. 3.

Таблиця 3

Структура похибок (1σ) та цін ІСНС найближчого майбутнього

| | Засоби управління польотом, зброя самонаведення | Тактичні ракети | | Крилаті ракети, ІНС літаків |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | | 4 |
| Тип акселерометра | Кремнієвий мікромеханічний | Кварцевий резонаторний або кремнієвий мікромеханічний | Кварцевий резонаторний або кремнієвий мікромеханічний | Кварцевий резонаторний або кремнієвий мікромеханічний |
| Стабільність зміщення нуля акселерометра, мкг (1σ) | 1000 | 200 | 100 | 50 |
| Тип гіроскопа | Кремнієвий мікромеханічний | Кремнієвий мікромеханічний або ВОГ | Волоконно-оптичний | Волоконно-оптичний |
| Стабільність швидкості дрейфу гіроскопа, град/год (1σ) | 10 | 1 | 0,1 | 0,01 |
| Вартість виробництва перспективних ІСНС, дол. США | 500 | 1000 | 10000 | 20000 |

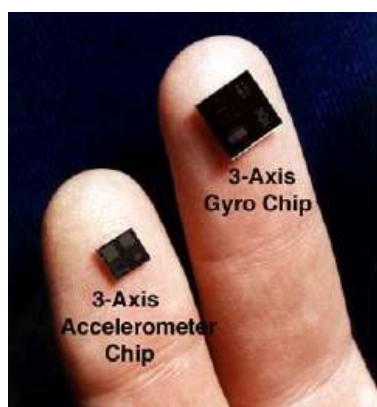


Рис. 3. Ілюстрація мініатюризації блоків МЕМС інерціальних датчиків

Подальшу мініатюризацію фахівці пов'язують із розвитком мікрооптичних або мікрооптико-електромеханічних (МОЕМС) датчиків і систем на їх основі, а у далекому майбутньому – із досягненнями квантової гіроскопії. Передбачається, що в таких системах будуть відсутні механічні елементи і вони будуть повністю твердотільними – одна система в одному чіпі [5].

У найближчому майбутньому передбачається масове використання МЕМС датчиків низької вартості у системах персональної навігації (солдат, пішохід), а також в наземних, повітряних і морських безпілотних системах. Характеристики перспективних ІСНС низької вартості наведено в табл. 4 [6].

В теперішній час розроблені схеми можливого комплексування ІНС і СНС у чотирьох основних варіантах (тут і в подальшому під СНС мається на увазі інтегрована СНС ГЛОНАСС/GPS) [2]:
роздільна схема;

слабкозв'язана схема;
жорсткозв'язана схема;
глибокоінтегрована схема.

Таблиця 4

Потенційні характеристики ІСНС низької вартості

| Призначення | Кількість ІСНС | Гранична вартість (тис. дол.) | Характерний об'єм, см ³ |
|---------------------------------|----------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| Персональні навігаційні системи | Сотні тисяч | < 1 | < 5 |
| Наземні роботи | Десятки- сотні тисяч | < 5 | < 25 |
| БпЛА | Тисячі | < 10 | < 25 |
| Морські роботи | Тисячі | <10 | < 25 |

Роздільна або розімкнута схема – це найбільш простий варіант спільного використання ІНС і СНС. Тут обидві системи працюють незалежно одна від одної, але, оскільки похибки ІНС з часом зростають, то необхідно періодично або безперервно проводити корекцію ІНС за даними СНС. Така архітектура комплексування на етапі розв'язання навігаційної задачі (на етапі вторинної обробки інформації) забезпечує незалежність систем (крім моментів перезапуску або корекції) й інформаційну надмірність сукупної структури. Вихідна інформація двох систем може піддаватися комплексній обробці з використанням калманівської фільтрації. В цілому комплексна система має більш високу точність як за координатами та швидкістю, так і за кутовою орієнтацією. Крім того, для створення архітектури такої інтегрованої ІСНС потрібні мінімальні зміни в апаратних засобах і програмному забезпеченні вже існуючого обладнання ЛА.

Наступною за глибиною зв'язку ІНС і СНС є слабозв'язана система. Тут інерціальна система та приймач СНС як і раніше виробляють незалежні навігаційні вимірювання, однак з'являється з'єднувальний блок – обчислювач ІНС/СНС, у якому формується оцінка координат і швидкості польоту, виробляється корекція даних, отриманих від ІНС. В цій схемі передбачається можливість як роздільного функціонування ІНС і СНС протягом тривалого періоду, так і їх сумісного функціонування в інтегрованому режимі. Інформація про наявні псевдодальності та псевдошвидкості використовується в алгоритмах навігаційного обчислювача для отримання координат і швидкості споживача, а також виправлень до еталона часу та частоти приймача СНС. При наявності надмірності з метою підвищення точності зчислення навігаційних параметрів здійснюється їхнє спільне оцінювання, зокрема з використанням оптимальної калманівської фільтрації. За результатами оцінювання здійснюється корекція вихідної інформації ІНС. Корекція роботи самої ІНС у слабозв'язаних системах не передбачається. Але в ІНС передбачається можливість компенсації інструментальних похибок вимірювальних елементів за апріорними даними (наприклад, за паспортними даними системи) або за значеннями оцінок цих похибок, що отримані в обчислювачі ІНС/СНС. В результаті в основний алгоритм ІНС передаються скориговані показання датчиків кутової швидкості і акселерометрів.

Як видно, у слабозв'язаній системі навігаційні параметри, так само як і в роздільній схемі, виробляються незалежно як у ІНС так і в СНС, причому, як уже відзначалося, до складу приймача включена схема оцінювання (як правило, фільтр

Калмана). Така схема зветься „каскадною” через два послідовно включених фільтри Калмана. Перевагою такої схеми є висока надійність інтегрованої системи, а недоліком – взаємна кореляція похибок оцінок першого фільтра (фільтра супутникового приймача) і їх відмінність від білих шумів. Надходячи з виходу СНС на вхід другого фільтра Калмана, і стаючи для нього шумами вимірювань, вони порушують умови оптимальної роботи цього фільтра. Крім цього, у такій схемі необхідно здійснювати заходи синхронізації вимірювань ІНС і приймача СНС.

Підвищений рівень автономності ІНС (передбачається, що підсистема ІНС може працювати автономно протягом 1-ї години) вимагає значної точності інерціальних датчиків (датчиків кутових швидкостей і акселерометрів) і застосування досить складних алгоритмів інерціальної навігації. Тому такі системи досить дорогі та складні. Такі системи доцільно застосовувати в ПНК високої та середньої точності, але, наприклад для БПЛА, вони занадто дорогі.

Третій варіант інтеграції систем – жорстко (сильно) зв'язана схема. У жорсткозв'язаних системах ступінь автономності ІНС значно менший, ніж у слабкозв'язаних системах: допускається автономна робота протягом від декількох секунд до декількох десятків секунд. Практично в цих системах ІНС найчастіше є додатком для СНС. У таких системах роль ІНС зводиться лише до виміру первинних параметрів поступального й обертального рухів, наприклад проєкцій уявного прискорення й абсолютної кутової швидкості обертання об'єкта. З цієї причини в схемах такого типу ІНС являють собою лише блоки інерціальних вимірників (акселерометри і гіроскопи). Основна навігаційна інформація виробляється в СНС, у той час як ІНС інтерполює значення навігаційних параметрів у період між двома сусідніми тактами надходження інформації від СНС.

Компенсація похибок датчиків, відповідно до моделей цих похибок, виконується в блоці компенсатора похибок від розширеного фільтра Калмана. Інтегрування кінематичних рівнянь обертального руху та поступального руху виконується з урахуванням скоригованих координат. Тобто в у жорсткозв'язаних системах виконується одночасно процедури оцінювання (фільтрації) і коригування ІНС.

Фільтр Калмана, на відміну від попереднього випадку, повинен бути дуже швидкодіючим. Це пов'язано з тим, що зв'язок блока фільтра Калмана з контурами приймача СНС значно більш жорсткий, ніж у попередньому випадку, оскільки відмінною рисою жорсткозв'язаної схеми є використання контурами слідкування за затримкою і фазою інформації про розрахункові псевдодальності і псевдошвидкості (або про їхні збільшення), які надходить саме від фільтра Калмана. Використання цієї інформації дозволяє істотно поліпшити стійкість слідкування і знизити час відновлення роботи приймача у випадку втрати сигналів супутників.

Жорсткозв'язані системи забезпечують більшу точність рішення навігаційної задачі в порівнянні з попередніми, при цьому фільтр Калмана дозволяє оптимально використовувати всі доступні супутники. Однак, наявність лише одного фільтра Калмана призводить до втрати надмірності системи, тому що стає доступним лише одне спільне рішення.

До інших переваг такої схеми можна віднести:

відсутність проблеми взаємної кореляції шумів вимірів і їхніх відмінностей від білих шумів;

відсутність проблеми синхронізації вимірів БІНС і СНС, тому що використовується один формироваель тактових частот;

можливість виявлення і відбраковування «поганих» вимірів псевдодальностей по їхнім прогнозованим значенням, що зформовані з використанням даних від БІНС.

До недоліків жорстко зв'язаних систем можна віднести:

необхідність розробки спеціальної апаратури споживача (приймача);

використання складних співвідношень для вимірів;

погіршення надійності, тому що відмовлення БІНС приводить до відмовлення системи в цілому.

Основні відмінності жорсткозв'язаної схеми від слабкозв'язаної полягають у наступному:

використання вихідної інформації ІНС про прискорення в контурі стеження за кодом і доплеровским зсувом несущої частоти. Це дозволяє звузити смугу пропущення контурів стеження і підвищити швидкодію і точність настроювання;

використання вимірів псевдодальностей і псевдошвидкостей (а не координат і швидкостей) для оцінювання погрішностей ІНС.

Так звані глибоко інтегровані системи є ще більш складними і менш гнучкими з огляду організації їхньої структури, мають жорстку організацію зв'язків і єдиний вихід. Обчислювач ІНС/СНС реалізує алгоритми безплатформної ІНС й алгоритми оптимальної оцінки параметрів. Всі оцінки виробляються в інтегральному фільтрі Калмана, а приймач СНС ГЛОНАСС/GPS ще більш спрощується. У цій схемі він складається тільки з високочастотного каналу прийому і первинної обробки інформації, що включає високочастотний прийомний тракт, генератор коду, корелятори і схему „захоплення”. Виходи кореляторів є входами для інтегрального фільтра Калмана, де обчислюються не тільки похибки ІНС, але й оцінки псевдодальностей і псевдошвидкостей, які передаються в приймач для поліпшення характеристик „захоплення” сигналу. Таким чином, традиційні контури слідкування за кодом і доплерівською частотою включаються в загальний інтегральний фільтр комплексної системи. У такій схемі фільтр повинен мати двадцятий-сороковий порядок, і для його реалізації потрібна БЦОМ із високою швидкодією.

У табл. 5 узагальнені основні особливості перелічених схем ІНС/СНС.

Таблиця 5

Характеристики основних схем інтеграції СНС і ІНС

| Тип системи | Основні особливості |
|-----------------|--|
| Роздільна | Надмірність, обмеженість похибок оцінок місця розташування і швидкості, наявність інформації про орієнтацію і кутову швидкість, висока швидкість видачі інформації, мінімальні зміни в бортовій апаратурі. |
| Слабко зв'язана | Усі перераховані особливості роздільних систем, плюс більш швидке відновлення слідкування за кодом і фазою сигналів СНС, виставлення та калібрування БІНС у польоті, як наслідок – підвищена точність під час відсутності сигналу СНС. |

| Тип системи | Основні особливості |
|---------------------|--|
| Жорстко зв'язана | Подальше поліпшення точності навігації і калібрування, підвищена стійкість слідування за сигналами СНС при маневрах ЛА, підвищена завадостійкість. |
| Глибоко інтегрована | Переваги: єдиний фільтр усуває проблему „каскадного” включення фільтрів, компактність, знижені вимоги з енергозабезпечення. Недоліки: вектор стану містить до 40 компонентів, тому фільтр складно реалізувати; необхідність розробки спеціальних датчиків. |

Аналіз показує, що рівень потенційної завадозахищеності інтегрованих ПСНС суттєво підвищується з збільшенням глибини інтеграції. Так, для окремого приймача СНС з С/А кодом завадозахищеність складає близько 30 Дб, для ПСНС з Р кодом, інтегрованої по жорсткозв'язаній схемі, цей показник вже складає близько 55 Дб, для глибокоінтегрованої ПСНС з Р кодом – 75 Дб, а для глибокоінтегрованої ПСНС з М кодом – 95 Дб [6].

Важливим аспектом впровадження інтегрованих ПСНС для військових авіаційних об'єктів є створення уніфікованих рядів таких систем. Можливу методику уніфікації наведено в [7]. Проведені дослідження показали, що в близькій перспективі (до 5 років) потреби військової авіації задовольнить уніфікований ряд ПСНС із трьох зразків, а в середньостроковій перспективі (10...15 років) – ряд з двох зразків.

Таким чином, інтегровані інерціально-супутникові навігаційні системи літальних апаратів розвиваються у напрямку підвищення рівня інтеграції інерціальної та супутникової частин, використання малогабаритних та низьковартісних інерціальних датчиків, підвищення завадозахищеності, а також створення уніфікованих рядів таких систем для широкого кола літальних апаратів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации. Под ред. В.Г. Пешехонова. Санкт-Петербург, 2004. – 235 с.
2. Захарін Ф.М., Синеглазов В.М., Філяшкін М.К. Алгоритмічне забезпечення інерціально-супутникових систем навігації. Київ. «НАУ-друк», 2011. – 320 с.
3. Бабак В.П., Конін В.В., Харченко В.П. Супутникова радіонавігація. Київ, «Техніка», 2004. – 328 с.
4. Соловьев Ю.А. Спутниковая навигация и ее приложения. М. ЭКО-ТРЕНДЗ, 2003. – 326 с.
5. Бабур Н., Шмидт Дж. Направления развития инерциальных датчиков. Гироскопия и навигация, № 1(28), ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 2000. – С. 16-23.
6. Neil Barbour, Inertial MEMS System Applications. Low-Cost Navigation Sensors and Integration Technology, RTO Lecture Series Supporting Papers, AGARD. – 2011, p.p. 2.1-2.28.

7. Захарін Ф.М., Самойленко О.В., Карнаух Т.І. Методичні аспекти уніфікації інтегрованих інерціально-супутникових навігаційних систем для авіаційних об'єктів. Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації, Випуск 8 (15), Київ, 2012. – С. 59-64.

Надійшла до редакції 14.10.2013