

Оцінка надійності та точності гібридних квантових навігаційних систем: сучасні підходи та методології

У статті розглядаються сучасні методології та підходи до оцінки надійності та точності гібридних квантових навігаційних систем (КНС), які поєднують класичні інерційні вимірювальні одиниці з квантовими сенсорами на основі атомної інтерферометрії. Описані ключові принципи роботи та причини задіяння КНС у цивільній авіації.

Розгляд потенційних причин удосконалення систем навігації

У сучасних умовах швидкого розвитку авіаційної індустрії та впровадження новітніх технологій для забезпечення високої точності і надійності навігації, особливої уваги набувають гібридні квантові навігаційні системи (КНС). Ці системи поєднують традиційні інерційні вимірювальні одиниці з квантовими сенсорами, які базуються на атомній інтерферометрії, що дозволяє значно підвищити точність вимірювань та зменшення кількості накопичених похибок під час польоту літака. В умовах сучасних викликів у галузі авіації, таких як необхідність у безперерйній навігації в умовах зниженої доступності супутникових сигналів, квантові навігаційні технології стають все більш актуальними.

За даними міністерства іноземних справ Балтійських країн, на їх територію були скоєні численні гібридні атаки глушіння сигналів GPS, від яких постраждали десятки тисяч пасажирських літаків під час виконання польотів впродовж декількох місяців. Звісно, що це вплинуло і на звичайних користувачів GPS в регіоні. В таких ситуаціях зрозуміло, що цивільна авіація найперша хто отримує удар при систематичних перешкодах сигналу GPS і тому зобов'язана мати вихід або науково-розроблену «опору» в ситуаціях з навмисно скоєними глушіннями сигналів навігаційних супутників.

Підходи до оцінки надійності та точності гібридних КНС

Гібридні квантові навігаційні системи поєднують традиційні інерціальні навігаційні системи з квантовими датчиками, такими як атомні інтерферометри, що базуються на охолоджених атомах (наприклад, рубідію чи цезію). Ключовим елементом таких систем є квантові сенсори, здатні вимірювати гравітаційні збурення, швидкість, напрямок руху, використовуючи принципи когерентної маніпуляції з атомами. Ці датчики забезпечують високу точність за рахунок вимірювання змін фаз атомних хвиль, що дозволяє виявляти навіть незначні зміни положення чи орієнтації.

Принцип роботи квантових датчиків ґрунтується на інтерференції атомних хвиль, що збуджуються лазерними імпульсами. Цей процес включає:

- Лазерне охолодження атомів до мікрокельвінових температур.

- Імпульсне маніпулювання лазерним випромінюванням для створення суперпозиції станів атомів.
- Інтерференцію атомів у гравітаційному або інерційному полі, що дозволяє визначити їх рух з високою точністю.

Атомні інтерферометри використовують дуже точні квантові ефекти, які дозволяють вимірювати дуже малі зміни руху. Квантові властивості атомів змінюються дуже передбачувано під дією зовнішніх сил, що робить їх ідеальними для точних вимірювань прискорення або обертання. Це дозволяє гібридній квантовій системі навігації бути набагато точнішою і стабільнішою, ніж класичні інерційні системи. Атоми для квантових навігаційних систем зазвичай отримують з газових балонів або контейнерів, де вони зберігаються у формі елементарних елементів (як рубідій або цезій). Ці атоми випускаються у вакуумну камеру, охолоджуються лазерами і використовуються для точних вимірювань. Таким чином, атоми завжди підготовлюються "на місці" у самій системі, де проходять усі етапи маніпуляції і вимірювання.

Для гібридних квантових навігаційних систем краще використовувати чисті елементи, такі як рубідій або цезій, оскільки вони мають оптимальні властивості для лазерного охолодження, маніпуляції квантовими станами і точного вимірювання.

Метрика надійності гібридних КНС

Надійність гібридних КНС визначається їх здатністю функціонувати в умовах реальних експлуатаційних середовищ, таких як турбулентність, температурні коливання та вплив електромагнітних полів. Вимірювання надійності проводиться через наступні метрики:

- Час безвідмовної роботи (MTBF): Статистичний показник, що оцінює середній час безвідмовної роботи системи.
- Імовірність відмови (Pfd): Визначає ймовірність відмови системи в заданий проміжок часу.
- Індекс відновлення (MTTR): Відображає час, необхідний для відновлення системи до функціонального стану після відмови.

Точність гібридних КНС може бути оцінена за допомогою кількох методів, серед яких:

- Середньоквадратична похибка (RMS): Визначає середнє відхилення від реального положення об'єкта.
- Абсолютна похибка (AE): Оцінює максимальне відхилення між вимірним і реальним положенням.
- Відносна похибка (RE): Співвідношення між абсолютною похибкою та реальним значенням вимірювання, що дозволяє врахувати масштаби вимірюваних величин.

Виклики та перспективи розвитку

Основними викликами для впровадження гібридних КНС є:

- Складність інтеграції квантових сенсорів у існуючі навігаційні платформи через високі вимоги до температурного контролю та стабільності лазерних систем.
- Висока вартість виробництва та експлуатації таких систем у порівнянні з традиційними рішеннями.
- Потреба в розробці нових методів калібрування та синхронізації.
- Сертифікація та регуляції: Будь-яка нова навігаційна система має пройти сертифікацію відповідно до стандартів міжнародних (ІКАО) та національних (FAA, EASA) авіаційних регуляторів. Цей процес може бути тривалим і дорогим, оскільки потребує обширного тестування та документування надійності та безпеки квантових сенсорів у реальних умовах.

Висновки

Гібридні квантові навігаційні системи мають значний потенціал для підвищення точності і надійності навігації в авіаційній галузі, особливо в умовах обмеженого доступу до супутникових сигналів. Однак для їх масового впровадження необхідно подолати низку технічних і економічних викликів, включаючи інтеграцію в існуючі платформи, оптимізацію вартості та розробку нових методів оцінки ефективності. Подальші дослідження повинні бути зосереджені на удосконаленні квантових сенсорів, а також на розробці методів їх адаптації до потреб цивільної авіації.

Список літератури

1. FAA TSO-C129/C196/C145/C146
2. ICAO Annex 10, Volume I
3. FAA AC 20-138D
4. <https://thequantuminsider.com/2024/05/13/uk-reports-successful-test-of-un-jammable-quantum-navigation-system/>
5. Bongs, K., et al. (2019). "Quantum sensors for the future of navigation." *Nature Reviews Physics*, 1, 731–739.
6. Peters, A., et al. (2001). "High-precision gravity measurements using atom interferometry." *Metrologia*, 38(1), 25-61.