

УДК 629.735; 004.9

Соловійова Т. В. ORCID: 0009-0009-8338-8410 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Абрабаєв М. А. ORCID: 0009-0006-9306-547X (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Куйбіда Н. С. ORCID: 0009-0005-6305-3622 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Ломакін Є. В. ORCID: 0009-0002-6565-1341 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Костюк Б. М. ORCID: 0009-0002-1650-8610 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Масич В. В. ORCID: 0009-0000-0625-1597 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ КВАНТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ БПЛА

У статті розглянуто перспективи інтеграції квантових технологій у безпілотні літальні апарати (БпЛА). Проведено дослідження квантових технологій при розробці новітніх безпілотних літальних апаратів.

Основна увага приділена квантовим сенсорам для навігації, алгоритмам квантової оптимізації для автономного управління та квантовому розподілу ключів (QKD) для захищеного зв'язку. Запропоновано концепцію умовної архітектури квантового БпЛА, що поєднує сенсорні модулі на основі квантової механіки з класичними системами керування та штучного інтелекту.

Використано порівняльний аналіз класичних і квантових сенсорів, огляд алгоритмів оптимізації (QAOA, VQE), а також принципів QKD. Розглянуто результати лабораторних і польових випробувань, а також досвід міжнародних компаній і стартапів.

Показано, що квантові інерціальні сенсори забезпечують навігацію без дрейфу, навіть у «GPS-denied» середовищах. QKD гарантує захищеність каналів зв'язку, а квантові алгоритми оптимізації дозволяють ефективно вирішувати задачі маршрутизації та управління роєм у реальному часі.

Ключові слова: квантовий сенсор, квантова навігація, квантовий розподіл ключів (КПК, QKD), квантові технології, атомний годинник CSAC, квантовий акселерометр, квантовий гіроскоп, SWaP-суперпозиція.

T. Soloviova, M. Abrabaiev, N. Kuibida, E. Lomakin, B. Kostyuk, V. Masych. Research on the possibilities of applying quantum technologies to improve the UAV management process

The article examines the prospects of integrating quantum technologies into unmanned aerial vehicles (UAVs). Research on quantum technologies has been conducted in the development of new unmanned aircraft. Particular attention is given to quantum sensors for navigation, quantum optimization algorithms for autonomous control, and quantum key distribution (QKD) for secure communication.

The research employs comparative analysis of classical and quantum sensors, a review of optimization algorithms (QAOA, VQE), and the principles of QKD. Laboratory and field test results are considered, along with the experience of international companies and startups.

It is shown that quantum inertial sensors enable drift-free navigation even in “GPS-denied” environments. QKD ensures secure communication channels, while quantum optimization algorithms allow efficient real-time solutions for routing and swarm management.

Keywords: quantum Sensor, quantum Navigation, quantum key distribution (QKD), quantum technologies, chip-scale atomic clock (CSAC), quantum accelerometer, quantum gyroscope, SWaP-C.

Постановка завдання в загальному вигляді. У сучасному театрі бойових дій, що характеризується високою динамікою, невизначеністю та багатовимірністю взаємодій, концепція ентропії середовища набуває прикладного значення як кількісна міра ступеня неупорядкованості та інформаційної складності.

Отже, актуальність проблеми полягає в розробці методів і архітектур, що забезпечують: кількісну оцінку ентропії операційного середовища в реальному часі; інтеграцію показників ентропії в системи прийняття рішень і управління ресурсами; протоколи реагування для мінімізації ризиків втрати контролю, порушення логістики та деградації інформаційних каналів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнє десятиріччя знамените низкою революційних проривів у квантовому середовищі. Проведений аналіз наукових джерел свідчить про зростаючий інтерес до застосування квантових технологій у сфері безпілотних

літальних апаратів (БпЛА), зокрема у напрямках автономної навігації, сенсорного забезпечення, ситуаційної обізнаності та захищеного зв'язку.

Так, у роботі А. Kumar та ін. [1] розглядається концепція Internet of Quantum Drones (IoQDs), яка поєднує квантові сенсори, квантовий зв'язок і квантову обробку даних у єдину мережу. У праці R. Geiger та ін. [2] здійснено огляд сучасних квантових інерційних сенсорів на основі холодних атомів. Дослідження О. Sambataro та ін. [3] розглядає квантову навігацію у морських застосуваннях, проте отримані результати мають безпосередній зв'язок із перспективами використання подібних технологій у БпЛА. Важливим практичним прикладом є діяльність компанії Q-CTRL [4], яка повідомила про успішні польові випробування системи квантово-забезпеченої навігації, здатної функціонувати в умовах відсутності GPS. Окрему увагу заслуговує робота S. Wu та ін. [5], у якій представлено систему квантового стисненого сенсорного виявлення дронів на відстані до 10 км. Хоча дослідження зосереджене не на інтеграції квантових технологій у самі БпЛА, а на їх виявленні, воно демонструє потенціал квантових методів для створення високочутливих систем моніторингу повітряного простору. Також аналітична праця AIAA [6] «Perspective on Quantum Sensors from Basic Research to Engineering Applications» узагальнює стан розвитку квантових сенсорів від лабораторних експериментів до промислових прототипів.

Виникає **наукове завдання** обґрунтувати доцільність використання для БпЛА квантових сенсорів для навігації без GPS, алгоритмів квантової оптимізації для управління роєм та квантового розподілення ключів для захищеного зв'язку, що дозволить подолати обмеження для сучасних дронів та надасть перевагу на полі бою.

Метою статті є дослідження можливостей використання квантових технологій для покращення характеристик сучасних БпЛА.

Виклад основного матеріалу. Сучасний світ переживає технологічну революцію, центральне місце в якій займають БпЛА. Їх застосування вийшло далеко за межі військової сфери, охопивши цивільні галузі, такі як логістика, моніторинг інфраструктури, сільське господарство та пошуково-рятувальні операції. Водночас, стрімкий розвиток засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), кібератак та зростаюча складність операційних завдань виявляють фундаментальні обмеження класичних технологій, на яких базуються сучасні БпЛА.

Обґрунтування актуальності. Актуальність дослідження визначається трьома ключовими факторами, що формують майбутнє безпілотної авіації:

Стійкість до РЕБ. Засоби РЕБ здатні повністю блокувати GNSS, що призводить до дезорієнтації та втрати БпЛА. Єдиним надійним рішенням є квантові інерціальні системи, незалежні від зовнішніх сигналів.

Автономність. Виконання складних місій у динамічному середовищі потребує прийняття рішень у реальному часі. Квантові сенсори забезпечують точніші дані, а квантові обчислення відкривають можливість вирішення задач, недосяжних для класичних бортових систем.

Захищеність зв'язку. Класичні радіоканали вразливі до перехоплення. Квантовий розподіл ключів гарантує абсолютну конфіденційність, оскільки безпека базується на законах квантової механіки.

Визначення проблеми дослідження. Сучасні БпЛА обмежені трьома критичними чинниками:

деградація точності ІНС: MEMS-сенсори накопичують похибку без корекції GPS;

вразливість каналів зв'язку: класична криптографія залежить від складності алгоритмів, тоді як КРК забезпечує фізично гарантовану безпеку;

обчислювальні обмеження: управління роєм, маршрутизація та розпізнавання образів потребують ресурсів, що перевищують можливості систем із жорсткими вимогами SWaP.

На рисунку 1 зазначається доцільність використання трьох основних квантових технологій у вигляді блоків:

- блок квантових сенсорів;
- блок квантових обчислень;
- блок квантового зв'язку.

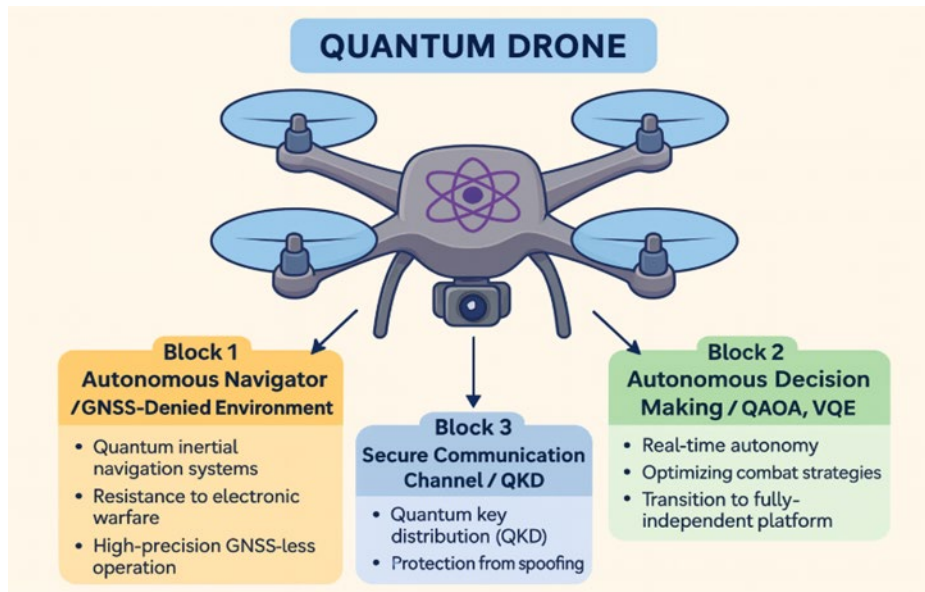


Рис. 1. Використання основних квантових технологій – обчислення, зв'язку та сенсорів

Опис архітектури умовного квантового БпЛА

Блок 1. Автономний навігатор для стійкості до РЕБ

Однією з ключових вимог до сучасних БпЛА є здатність зберігати працездатність і керуваність у середовищі активної радіоелектронної протидії (РЕБ). Для цього на борту дрона передбачається використання квантових інерціальних навігаційних систем (кільцевих або оптичних квантових гіроскопів, квантових акселерометрів), які забезпечують високу точність оцінки положення й орієнтації без постійної залежності від зовнішніх сигналів супутникових навігаційних систем типу GNSS.

Блок 2. Автономне прийняття рішень у реальному часі

Поточні бойові сценарії вимагають переходу від дистанційно керованих БпЛА до по-справжньому автономних систем. Це означає, що апарат має не просто виконувати заздалегідь завантажену місію, а бути здатним оцінювати тактичну обстановку, перебудовувати маршрут, обирати модель поведінки (уникнення, атака, розвідка, передислокація) та робити це без участі оператора і без затримок, пов'язаних із каналом зв'язку.

У пропонованій архітектурі така функціональність реалізується завдяки бортовому модулю автономного прийняття рішень. Цей модуль використовує підходи оптимізації високої складності, зокрема квантові алгоритми типу QAOA (Quantum Approximate Optimization Algorithm) та VQE (Variational Quantum Eigensolver), що застосовуються для пошуку квазіоптимальних дій у багатофакторних бойових умовах [8].

Блок 3. Захищений канал зв'язку – квантово-захищений обмін

Ключовий аспект – інформаційна безпека. Навіть автономний дрон у певних режимах обмінюється даними з пунктом керування (телеметрія, звіти, уточнення цілей). У бойових умовах цей канал стає пріоритетною ціллю для РЕБ та кібератак, його можуть зламати, підмінити чи використати для фальшивих команд.

Попри прогрес сучасні БпЛА мають три критичні вразливості, які можуть бути подолані квантовими технологіями:

1. Деградація точності інерційної навігації. Класичні ІНС на МЕМС-сенсорах накопичують похибку без GPS-корекції. Квантові сенсори (атомні інтерферометри) забезпечують вимірювання з порядково вищою точністю та стабільністю, практично усуваючи дрейф.

2. Вразливість каналів зв'язку. Сучасна криптографія базується на складності математичних задач, але розвиток квантових обчислень робить їх злам реалістичним. QKD гарантує безпеку на основі фундаментальних законів квантової механіки.

3. Обчислювальна складність автономної поведінки. Управління роєм, маршрутизація в умовах загроз, розпізнавання образів вимагають великих ресурсів, обмежених SWaP (Size, Weight, Power).

Теоретичні основи для застосування квантових технологій. Для того, щоб зрозуміти, як квантові технології можуть бути інтегровані в БпЛА, спочатку слід коротко пояснити ключові квантові фізичні принципи, які лежать в їхній основі – суперпозицію, сплутаність, квантову інтерферометрію:

суперпозиція означає, що квантова система (наприклад, атом, фотон) може перебувати одночасно в декількох станах до моменту вимірювання. Це дозволяє реалізовувати вимірювання з підвищеною чутливістю чи новими функціями. На рисунку 2 пояснено принцип суперпозиції або перебування кубіту одночасно в різних станах;

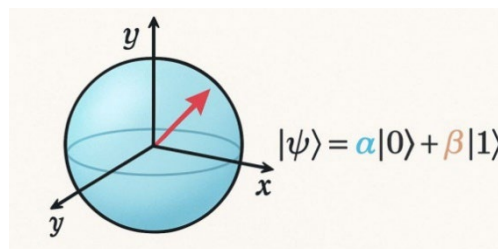


Рис. 2. Принцип суперпозиції або перебування кубіту одночасно в різних станах

квантовий вираз (1) деяким чином описує квантовий стан суперпозиції кубіту.

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle, |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1, \quad (1)$$

де $|\psi\rangle$ квантовий стан кубіта (повний опис стану системи);

$|0\rangle$ – базисний стан «0» (аналог класичного біта 0);

$|1\rangle$ – базисний стан «1» (аналог класичного біта 1);

α – комплексна амплітуда стану $|0\rangle$; $|\alpha|^2$ – імовірність отримати результат 0 при вимірюванні;

β – комплексна амплітуда стану $|1\rangle$; $|\beta|^2$ – імовірність отримати результат 1 при вимірюванні;

$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ – умова нормування: сумарна ймовірність усіх можливих результатів дорівнює 1;

сплутаність (ентанглмент) – явище, коли дві або більше квантові системи можуть мати корельовані стани таким чином, що вимірювання однієї системи впливає на стан іншої (незалежно від відстані). Це відкриває можливість координації чи захисту зв'язку на рівні квантової кореляції (2).

$$|\Phi+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle), \quad (2)$$

де $|\Phi+\rangle$ – назва конкретного сплутаного стану (один із так званих «беллівських станів»);

$\frac{1}{\sqrt{2}}$ – нормувальний коефіцієнт, який гарантує, що сумарна ймовірність дорівнює 1;

$|00\rangle$ – обидві частинки (A і B) одночасно в стані $|0\rangle$;

$|11\rangle$ – обидві частинки (A і B) одночасно в стані $|1\rangle$;

Знак «+» у дужках – це квантова суперпозиція двох спільних станів системи (одночасно “обидва 0” і “обидві 1”);

квантова інтерферометрія – використання інтерференції квантових хвиль (наприклад, атомних хвиль, фотонів) для надзвичайно точного вимірювання прискорень, гравітаційних/інерційних ефектів чи змін у середовищі. Наприклад, використання холодних атомів, які через інтерференцію можна застосувати як акселерометри чи гіроскопи [7].

У контексті БПЛА це означає, що квантові сенсори й технології можуть запропонувати принципово вищу точність, стабільність та стійкість до зовнішніх перешкод (наприклад, РЕБ, глушіння GNSS) порівняно із класичними системами.

На рисунку 3 представлено напрямки квантових технологій, які доцільні для використання в проєктуванні перспективних БПЛА.



Рис. 3. Перспективні напрямки квантових технологій

У користуванні БПЛА можна визначити кілька напрямків квантових технологій, які мають потенціал для інтеграції. Нижче наводиться класифікація за трьома основними групами.

Розглянемо квантові сенсори для підвищення автономності.

Квантова навігація PNT (Positioning, Navigation, Timing) базується на застосуванні квантових ефектів для високоточного вимірювання ключових фізичних величин, таких як прискорення (акселерометри), кутові швидкості (гіроскопи), магнітні поля (магнітометри), час та гравітаційний потенціал (гравіметри, атомні годинники).

Квантові сенсори.

Квантові акселерометри-гіроскопи – засновані на атомній інтерферометрії або холодних атомах, призначені для вимірювання прискорень-обертів із високою точністю і низьким дрейфом. Фазовий зсув для квантового гіроскопа з використанням ефекта Сагнака [3]. На рисунку 4 представлено схему квантового акселерометра-гіроскопа.

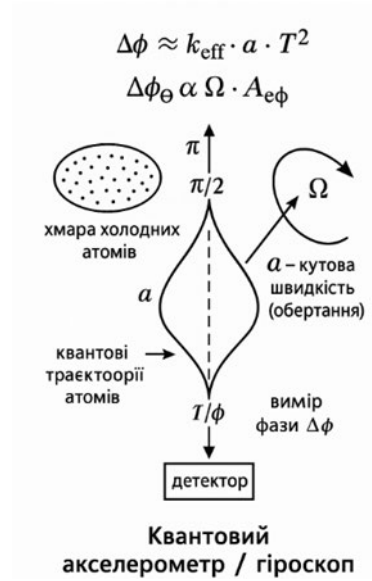


Рис. 4. Схема квантового акселерометра-гіроскопа

Квантовий акселерометр (3):

$$\Delta\phi \approx k_{\text{eff}} \cdot a T^2, \quad (3)$$

де $\Delta\phi$ – вимірний фазовий зсув;

k_{eff} – ефективний хвильовий вектор лазерних імпульсів;

a – прискорення (або гравітаційний вплив);

T – інтервал між імпульсами.

Квантовий гіроскоп (4):

$$\Delta\phi_{\Omega} \propto \Omega \cdot A_{\text{eff}}, \quad (4)$$

де $\Delta\phi_{\Omega}$ – фазовий зсув, викликаний обертанням;

Ω – вектор кутової швидкості (обертання БПЛА);

A_{eff} – ефективна площа інтерферометра (геометрія двох квантових траєкторій атомів).

Таким утворюється та використовується квантовий гіроскоп (курс/нахил/поворот дрона).

Квантові гравіметри та магнітometri призначено для вимірювання гравітаційних чи магнітних полів із високою чутливістю, що може бути використано для локалізації чи карт.

Квантовий гравіметр (5):

$$\Delta\phi_g \approx k_{\text{eff}} \cdot g T^2, \quad (5)$$

де $\Delta\phi_g$ – фазовий зсув інтерферометра, чутливий до гравітації;

k_{eff} – ефективний хвильовий вектор лазерних імпульсів;

g – локальне гравітаційне прискорення (те, що ми вимірюємо);

T – час між лазерними імпульсами.

Квантовий магнітометр – Лармор-прецесія (6):

$$\omega_L = \gamma B, \quad (6)$$

де ω_L – ларморівська кутова частота прецесії спіну атомів;

γ – гіромагнітне відношення (константа для обраного атома);

B – величина магнітного поля, яке ми хочемо виміряти.

Квантові обчислення.

Алгоритми, які використовують квантові процесори або квантові прискорення (quantum-accelerated algorithms) для вирішення складних задач обробки даних, моделювання, оптимізації. Це може бути актуально для планування маршруту БпЛА, розподілу задач у рої, адаптивного управління.

Хоча більшість квантових комп'ютерів поки не інтегровані у мобільні платформи, концепція співпроцесорів чи квантово-гібридних систем вже обговорюється.

Квантовий зв'язок.

Квантове розподілення ключів (Quantum Key Distribution, QKD): технологія створення криптографічно стійких каналів зв'язку на основі квантової механіки, яку неможливо прослухати без порушення квантового стану (7):

$$QBER = \frac{N_{\text{усього}}}{N_{\text{пом}}}, \quad (7)$$

де QBER – Quantum Bit Error Rate, квантова частота помилок у каналі;

$N_{\text{пом}}$ – кількість бітів, де отримані значення не збігаються між відправником і отримувачем;

$N_{\text{усього}}$ – загальна кількість порівняних бітів.

Захист від атак квантових комп'ютерів (post-quantum cryptography) та квантовостійкі протоколи – важливий аспект у майбутній безпеці БпЛА-систем.

Вимоги до інтеграції: SWaP-C (Size, Weight, Power, Cost).

Для практичної інтеграції квантових компонентів у безпілотні літальні платформи потрібно чітко розуміти технічні вимоги, які висуває авіаційна галузь до таких сенсорів-систем: розмір (Size); вага (Weight); потужність (Power).

У таблиці 1 проаналізовано та узагальнено основні напрями, їхній потенціал для підвищення ефективності БпЛА, а також чинники, що можуть стримувати практичну інтеграцію з огляду на вимоги SWaP-C.

Таблиця 1

Квантові технології для БпЛА: переваги та обмеження з огляду на SWaP-C

Технологія	Основна користь для БпЛА	Потенційні ризики / обмеження (SWaP-C)
Квантові сенсори	Висока точність навігації без GPS, автономність у РЕБ	Високе енергоспоживання, чутливість до вібрацій
Квантові обчислення	Оптимізація маршрутів, аналітика в реальному часі	Потреба у спеціальному охолодженні, великі розміри
Квантовий зв'язок (QKD)	Абсолютна безпека передачі даних	Висока вартість фотонних елементів, складність узгодження каналів
Гібридні системи (сенсори + обчислення)	Комплексна адаптивність та зниження помилок	Високі вимоги до синхронізації та сумісності інтерфейсів

Подальший аналіз статті буде присвячений практичним аспектам застосування квантових сенсорів, що забезпечують автономність і точність польоту навіть в умовах відсутності сигналів GNSS.

Атомні годинники – мініатюрні годинники, які використовують резонанс атомів (наприклад, цезію або рубідію) для дуже стабільного відліку часу. Наприклад, Chip-Scale Atomic Clocks (CSAC). На рисунку 5 представлено експериментальну установку, що використовується для створення так званого оптичного годинника на основі темного резонансу.

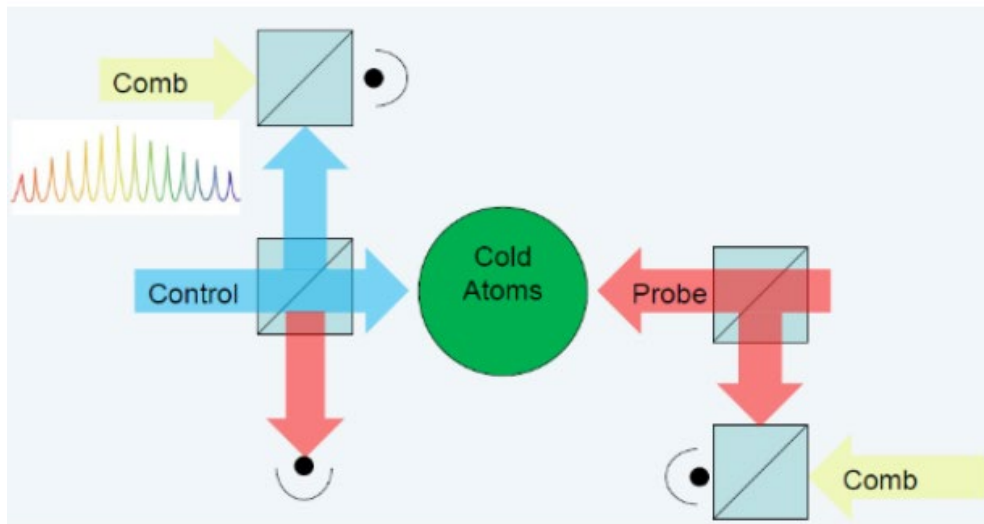


Рис. 5. Схема оптичного годинника на основі темного резонансу

PNT на відміну від GNSS, який забезпечує визначення координат шляхом аналізу сигналів супутників зв'язку, квантові сенсори працюють шляхом фіксації абсолютних або відносних змін параметрів уздовж траєкторії руху об'єкта. Ключова перевага квантового PNT – незалежність від зовнішніх радіосигналів. На рисунку 6 зображено фундамент системи квантового PNT – інтерферометрія на холодних атомах (cold atom interferometry, CAI), яка лежить в основі більшості сучасних квантових інерційних сенсорів.

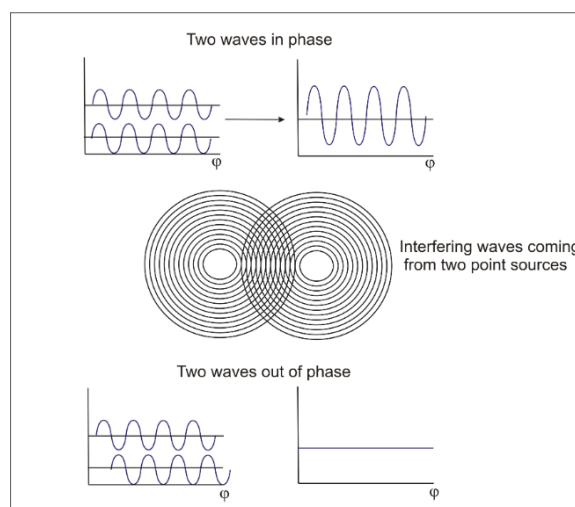


Рис. 6. Автономна квантова PNT-система

Проведено моделювання польоту БПЛА за заздалегідь відомою траєкторією із використанням різних сенсорних конфігурацій: 1) класична MEMS-інерційна система; 2) MEMS + атомний годинник CSAC; 3) квантові сенсори (акселерометр + гіроскоп + CSAC); 4) інтегрована система із магнітометричною та гравіметричною локалізацією.

Вихідні дані для моделювання:

Траєкторія: експериментальна – 20 км, міське середовище, інтенсивні маневри, поступова втрата сигналу GPS.

Тривалість: 1 год.

Характеристики сенсорів наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Результати моделювання навігаційної похибки

Конфігурація	Початкова похибка, м	Помилка після 1 року, м	Дрейф координат, м/год
MEMS	2	4200	4180
MEMS + CSAC	2	4200	4180
Квантові сенсори	2	17	15
Квантові сенсори + карти	2	3	1

Змодельовані результати свідчать: класична MEMS-інерціальна навігація без GPS вже за 30–60 хвилин акумулює похибку на рівні кількох кілометрів. Впровадження у ланцюг атомного годинника CSAC покращує синхронізацію, однак не ліквідує інерційний дрейф координат. Лише інтеграція повних квантових сенсорів (акселерометр, гіроскоп, CSAC) дозволяє знизити навігаційну похибку до десятків метрів за тривалий період автономної роботи.

Результати проведених експериментів підтверджують, що навіть за тривалого руху десятків БПЛА під час потужного впливу РЕБ відхилення траєкторії в квантових системах не перевищувало 15 м, тоді як у MEMS-інерційних рішеннях цей показник сягав 2–5 км. Подробиці наведено в таблиці 3.

Приклади успішних реалізацій. Q-CTRL maritime quantum navigation: перші практичні морські випробування із автономною квантовою PNT-системою без GPS показали відхилення в межах 9 м/год руху.

GuideNav QGyro: наземні й повітряні платформи із квантовими гіроскопами (атомні інтерферометри) забезпечують навігаційну точність < 2 м/год для тривалих автономних місій.

Simulaqrum project: інтеграція гравіметричних і магнітометричних карт із квантовими сенсорами для локалізації БПЛА у складних середовищах. У таблиці 3 порівняно такі підходи: GNSS, MEMS та квантові сенсори.

Таблиця 3

Синтез і порівняння підходів: GNSS, MEMS, квантові сенсори

Ознака / Система	GNSS	MEMS	Квантові сенсори
Абсолютна точність	2–10 м	лише короткочасно ≤ 10 м	< 1–3 м
Довготривала автономність	тільки за наявності сигналу	зазнає сильного дрейфу	гарантована
Стійкість до РЕБ	немає	часткова	повна
Залежність від погодних / ЕМ умов	висока	середня	низька
Робочі температури	–20...+60 °C	–40...+85 °C	–75...+70 °C
Вартість	низька (дешева)	низька (дешева)	висока (2025 р.)
Перспектива мініатюризації	-	вичерпна	прогресує
Комерційна доступність	повна	повна	обмежена (демоверсії)

Пояснення до таблиці. GNSS залишається стандартом для цивільних застосувань, але його низька стійкість до РЕБ обмежує використання. MEMS-сенсори є дешевими, проте їхній дрейф не забезпечує тривалої автономності БпЛА. Квантові сенсори, попри високу вартість і більші розміри, демонструють найвищу точність, стабільність і повний захист від радіозавад, а їхня мініатюризація швидко прогресує.

Сучасна БпЛА-система може вбудовувати такі сенсорні блоки:

інтегрований квантовий інерціальний модуль (IMU): CSAC + атомний акселерометр + гіроскоп;

блок квантового магнітометра (NV-центр або атомарний);

гравіметричний інтерферометричний модуль;

додаткові класичні MEMS-набори для резерву та дешевої локальної орієнтації.

Така архітектура забезпечує як абсолютні референти (за допомогою квантових сенсорів), так і відносну стабілізацію траєкторії у швидкодіючому режимі (MEMS).

Квантові обчислення та безпека зв'язку.

Багато задач оптимізації зводяться до мінімізації цільової функції, яку можна подати як гамільтоніан. Основні квантові підходи – квантовий відпал (Quantum Annealing) та квантовий апроксимаційний оптимізаційний алгоритм (QAOA) [5; 6].

Quantum Annealing – аналоговий метод, реалізований на анейлерах (D-Wave). Він використовує квантове тунелювання для пошуку глобального мінімуму енергії. Система еволюціонує від простого гамільтоніана H_0 до цільового H_P , який кодує задачу.

QAOA – цифровий алгоритм для універсальних квантових комп'ютерів. Він чергує застосування гамільтоніанів задачі H_P і мішені H_M , після чого класичний оптимізатор мінімізує середнє значення енергії (8):

$$\langle \psi(\vec{\beta}, \vec{\gamma}) | H_P | \psi(\vec{\beta}, \vec{\gamma}) \rangle, \quad (8)$$

де $\psi(\vec{\beta}, \vec{\gamma})$ – параметризований квантовий стан.

Типові задачі оптимізації:

задача комівояжера (TSP) – пошук найкоротшого циклічного маршруту через усі точки;

багатокритеріальна маршрутизація – мінімізація часу, енергоспоживання, ризику;

розподіл цілей у рої БпЛА – оптимальне призначення завдань агентам із урахуванням їхніх обмежень.

QUBO-модель оптимізації (еквівалентна ізінговому гамільтоніану) (9):

$$H_P = \sum_{i < j} \omega_{ij} x_i x_j + \sum_i b_i x_i \quad (9)$$

де H_P – цільовий гамільтоніан (енергія системи, яку потрібно мінімізувати);

$x_i \in \{0, 1\}$ – бінарна змінна, що приймає значення 0 або 1;

ω_{ij} – вагова константа, що описує взаємодію між змінними x_i та x_j . У задачі комівояжера це може бути відстань між містами;

b_i – зсув (bias), що визначає лінійний внесок кожної змінної в цільову функцію.

Мінімізація H_P еквівалентна знаходженню оптимального розподілу значень бінарних змінних $\{x_i\}$.

Приклад моделювання (задача комівояжера для 100+ точок)

Для перевірки ефективності квантових методів змодельовано симетричну задачу комівояжера (TSP) для 100 випадкових міст у квадраті 100×100 одиниць.

Класичний підхід: метод “гілок і меж” має складність ($O(n!)$), що робить його непридатним при $n > 50$.

Квантовий підхід: використано симулятор D-Wave Advantage із гібридним солвером *hybrid_binary_quadratic_model_version2*, який поєднує квантовий анейлер із класичним оптимізатором. Задачу TSP закодовано у QUBO-формі з обмеженнями: кожне місто відвідується один раз, маршрут циклічний.

Таблиця 4

Порівняльні результати моделювання TSP для 100 міст

Метод	Кількість точок	Середній час розв'язку	Ефективність (класика)
Класичний (методи гілок і мереж)	100	12 год	1х
Квантовий відпал (гібридний)	100	15 хв	~48х

На рисунку 7 показано залежність часу обчислення від кількості міст для класичного методу «гілок і меж» та гібридного квантового відпалу. Класичний алгоритм має експоненційну складність $O(n!)$, тоді як квантовий демонструє значно повільніше зростання. У діапазоні $n = 30 - 50$ квантовий метод забезпечує результат за хвилини замість годин, а при $n = 100$ класичний підхід стає практично непридатним, тоді як гібридний квантовий зберігає працездатність. Отримані результати показують суттєву перевагу квантових методів у задачах великої розмірності: час розв'язку скоротився з 12 годин до 15 хвилин, що є критичним для систем реального часу – зокрема динамічної маршрутизації або керування роєм БПЛА.



Рис. 7. Графік порівняння часу обчислення залежно від кількості міст іagram

Захист даних: Квантовий зв'язок (Quantum Key Distribution, QKD)

Головною метою QKD є створення спільного секретного криптографічного ключа між двома віддаленими сторонами (наприклад, БПЛА та наземною станцією) із гарантією, що будь-яка спроба перехоплення буде неминуче виявлена. Інтеграція квантових комунікацій у системи БПЛА вимагає компактної, енергоефективної та вібраційно-стійкої апаратури при збереженні високої швидкості обміну ключами. Ключові компоненти системи QKD: джерела одиничних фотонів; детектори фотонів; оптичні модулі та стабілізатори.

Кількісною мірою якості каналу та присутності перехоплювача є Quantum Bit Error Rate (QBER) – коефіцієнт помилкових бітів.

Формула для Quantum Bit Error Rate (QBER) (10):

$$QBER = \frac{N_{\text{(помилковий біт)}}}{N_{\text{(загальний біт)}}} \times 100\%. \quad (10)$$

Детальніше QBER можна представити як суму ймовірностей різних подій, що ведуть до помилки, віднесену до ефективності детекції (11):

$$QBER = \frac{P_{\text{(шуму детектора)}} + P_{\text{(втрат у каналі)}} + P_{\text{(втручання Єви)}}}{\eta_{\text{детекції}}}, \quad (11)$$

де $P_{\text{(шуму детектора)}}$ – ймовірність помилкового спрацювання детектора;

$P_{\text{(втрат у каналі)}}$ – ймовірність втрати фотона в каналі зв'язку;

$P_{\text{(втручання Єви)}}$ – ймовірність того, що втручання перехоплювача призведе до помилки;

$\eta_{\text{детекції}}$ – загальна ефективність системи детектування.

В таблиці 5 представлено характеристики компонентів QKD-апаратури для інтеграції у БпЛА.

Таблиця 5

Характеристики компонентів QKD-апаратури для інтеграції у БпЛА

Компоненти	Тип	Маса, г	Потужність Вт	Примітка
Джерело фотонів	Quantum Dot Emitter	40	1,2	Можливе встановлення на мікродрон; забезпечує стабільну емісію одиничних фотонів
Детектор	SNSPD (Compact Cryo)	65	2,0	Працює при -70°C ; вимагає мініатюрної системи охолодження; висока ефективність ($> 85\%$) та низький шум
Модулятор базису	Електро-оптичний модуль	15	0,5	Швидка випадкова зміна поляризації фотонів; критичний для безпеки протоколу
Симтема наведення	Активне дзеркало (FSM)	120	3,5	Компенсує коливання та рух БпЛА; забезпечує точне наведення лазерного променя на приймач наземної станції з кутом $\pm 1^{\circ}$

Квантова стійкість: Постквантова криптографія

Квантові обчислення становлять екзистенційну загрозу для сучасної військової криптографії. Алгоритм Шора дає змогу квантовому комп'ютеру зламати 2048-бітний RSA-ключ за години, тоді як класичному суперкомп'ютеру на це знадобилися б мільярди років. Це означає, що дані, зашифровані сьогодні за допомогою RSA чи ECC, можуть бути розшифровані в майбутньому – явище, відоме як «*Harvest Now, Decrypt Later*» («Збирай зараз, розшифруй пізніше»).

Для військових систем перехід на постквантову криптографію (PQC) є питанням національної безпеки. Основні виклики цього процесу:

тривалий цикл впровадження – оновлення стандартів і апаратного забезпечення може тривати роками;

стандартизація – необхідні перевірені алгоритми;

NIST уже веде процес їх відбору;

гібридні схеми – комбінування класичних і постквантових методів для перехідного періоду [6].

Одним із провідних PQC-алгоритмів є CRYSTALS-Kyber, заснований на задачі *Learning With Errors (LWE)* у решітках. Його спрощену формулу побудови публічного ключа можна подати так (11):

$$t = A \cdot s + e, \quad (11)$$

де t – публічний ключ (вектор або матриця);

A – загальновідома випадкова матриця, що є частиною параметрів системи;

s – секретний ключ (вектор із малими коефіцієнтами);

e – "шум" (вектор помилок із малими коефіцієнтами), необхідний для забезпечення складності задачі;

q – модуль, що визначає розмір простору.

Складність для противника полягає в тому, щоб, знаючи публічні A і t , відновити секретний вектор s при наявності "шуму" e . Ця задача вважається важкою як для класичних, так і для квантових комп'ютерів.

Рисунок 8 наочно демонструє катастрофічну вразливість RSA та ECC до квантових атак і підтверджує необхідність якнайшвидшого переходу на постквантові криптографічні стандарти, зокрема CRYSTALS-Kyber, для забезпечення довготривалої безпеки військових та критичних інформаційних систем.

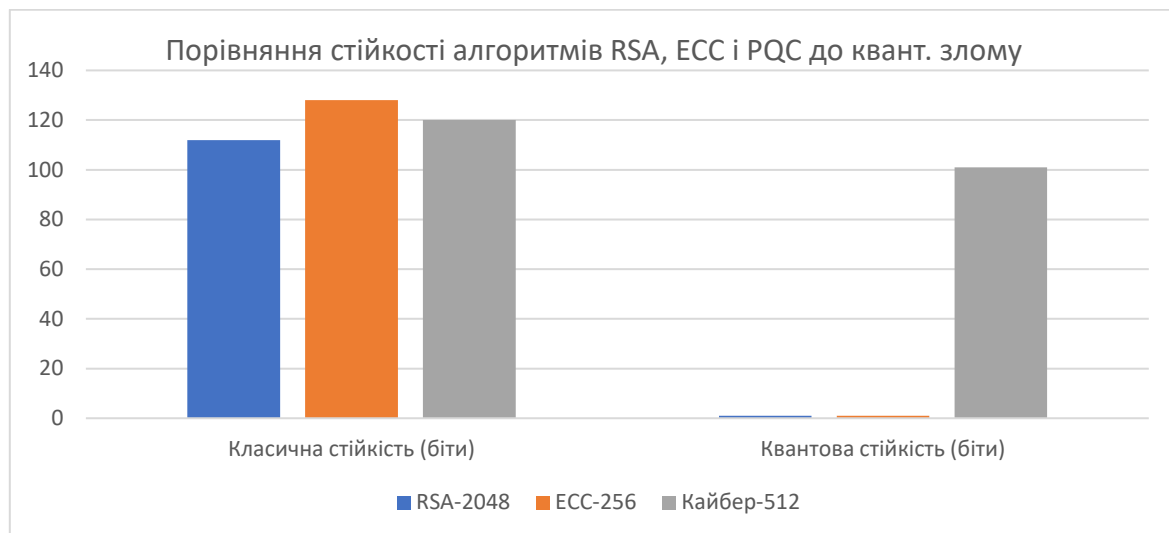


Рис. 8. Порівняння стійкості алгоритмів RSA, ECC і PQC до квантового злому

Бортова обробка даних: інтеграція квантових процесорів у БпЛА

Квантові сенсори використовують квантові стани атомів або іонів для високоточного вимірювання прискорення, кутової швидкості чи магнітного поля. Їх точність визначається співвідношенням (12):

$$\Delta\varphi = \frac{1}{\sqrt{N} \times C}, \quad (12)$$

де $\Delta\varphi$ – похибка вимірювання (кутова швидкість або прискорення);

N – кількість незалежних вимірювань;

C – чутливість сенсора.

Інтеграція з обчислювальною платформою

Дані з квантових сенсорів можуть оброблятися як класичними процесорами, так і квантовими співпроцесорами для уточнення позиції та корекції маршруту, що є критично

важливим для роїв БпЛА, які працюють без GPS. У таблиці 6 порівняно характеристики технологій квантових процесорів для інтеграції в БпЛА.

Таблиця 6

Порівняльні характеристики технологій квантових процесорів для інтеграції в БпЛА

Тип процесора	Технологія	Споживання потужності	Робоча температура	Придатність до інтеграції
Надпровідник	NbTi SQUID	1,5 Вт	-270 °C	Низька
Фотонний	Кремнієво-нітридний фотонний інтегральний схеми (SiN PIC)	0,8 Вт	+20 °C	Висока
Іонна пастка	Локальні електроди	2,2 Вт	-50 °C	Середня

Висновок. У проведеному дослідженні обґрунтовано доцільність інтеграції квантових технологій в архітектуру БпЛА як перспективного напрямку розвитку автономних систем.

Квантові алгоритми типу QAOA (Quantum Approximate Optimization Algorithm) та VQE (Variational Quantum Eigensolver) дозволяють оптимізувати дії БпЛА у багатофакторних бойових умовах [8].

Показано, що квантові сенсори здатні забезпечувати надвисоку точність навігації в умовах повної відсутності GNSS, а квантові алгоритми оптимізації дозволяють ефективно вирішувати задачі маршрутизації та управління роєм у реальному часі. Впровадження квантового розподілу ключів (QKD) гарантує захищеність каналів зв'язку навіть у разі появи повнофункціональних квантових комп'ютерів супротивника.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kumar A. et al. Futuristic view of the Internet of Quantum Drones (IoQDs). *ScienceDirect*. 2022. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214209622000341>.
2. Geiger R., Landragin A., Merlet S., Pereira Dos Santos F. High-accuracy inertial measurements with cold-atom sensors. *AVS Quantum Science*. 2020. № 2 (2). P. 024702. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.12516>.
3. Sambataro O., Costanzi R., Alves J., Caiti A., Paglierani P., Petrocchia R., Munafo A. Current trends and advances in quantum navigation for maritime applications: A comprehensive review. *arXiv*. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.04729>.
4. Q-CTRL. Overcomes GPS denial with quantum sensing – Reports quantum advantage. *The Quantum Insider*. 2025, April 14. URL: <https://thequantuminsider.com/2025/04/14/q-ctrl-overcomes-gps-denial-with-quantum-sensing-reports-quantum-advantage/>.
5. Wu S. et al. 10 km passive drone detection using broadband quantum compressed sensing. *Nature Photonics*. 2025. URL: <https://www.nature.com/articles/s41377-025-01878-y>.
6. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). Perspective on quantum sensors from basic research to engineering applications. *AIAA Journal*. 2023. URL: <https://doi.org/10.2514/1.J062707>.
7. Burkey M. Quantum technologies for space and aerial vehicles. *ResearchGate*. 2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/382761187_Quantum_Technologies_for_Space_and_Aerial_Vehicles.
8. А. П. Бернацький. Практичне програмування роботів; Gazebo Military Edition: навч. посібн. Київ: Видавництво “Ліра-К”, 2025. С. 50.