

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Математична модель динамічної зміни
параметрів drone

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи СПМ-22-4
Самойленко Є.О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системне програмування
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Піскарьов О.М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

Коваленко А.А.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 123 «Комп'ютерна інженерія» _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-наукова _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Системне програмування _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Самойленку Єгору Олексійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Математична модель динамічної зміни параметрів drone _____

затверджена наказом по університету від “ 01 ” квітня 2024 р. № 257Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 15 червня 2024 р.

3. Вхідні дані до роботи _____ 1) провести огляд сучасних систем визначення місцезнаходження drones; 2) провести дослідження методів обробки параметрів руху drone; 3) провести дослідження методів одночасної локалізації та картографування; 4) провести дослідження математичної моделі зміни параметрів drone.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

1) огляд літератури за темою роботи;

2) аналіз предметної області;

3) вибір та обґрунтування методики дослідження;

4) проведення експериментальних досліджень;

5) висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) _____

Слайд-презентація – 21 слайд

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою роботи	04.04.24 - 07.04. 24	
2	Вибір та обґрунтування методики дослідження	08.04.24 - 13.04.24	
3	Вибір інструментальних засобів	14.04.24 - 18.04.24	
4	Проведення експериментів	19.04.24 - 03.05.24	
5	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	04.05.24 - 09.05.24	
6	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	10.05.24 - 11.05.24	
7	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	10.06.24 - 13.06.24	

Дата видачі завдання 03 квітня 2024 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Лебедєв О.Г.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 63 с., 15 рис., 1 дод., 14 джерел.

АЛГОРИТМ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, УПРАВЛІННЯ РУХОМ, ФІЗИЧНЕ НЕОРГАНІЗОВАНЕ СЕРЕДОВИЩЕ, «SWARM-BOT»-SYSTEM, SWARM DRONES

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження математичної моделі динамічної зміни параметрів drone для її застосування в системах навігації та управління рухом drones, що входять до складу однієї "Swarm - bot" - system у physical unorganized environment.

Підвищити точність визначення параметрів руху drones при груповій взаємодії можна за допомогою комплексування даних відносних параметрів swarm drones. Виникає завдання спільної обробки інформації, отриманої від різних систем виміру параметрів руху swarm drones. У кваліфікаційній роботі досліджується динамічна модель зміни параметрів drone. Це необхідно підвищення точності визначення параметрів руху drone при високих похибках вимірювань чи нестабільній роботі супутникових систем позиціонування з допомогою комплексної обробки власних і взаємних оцінок координат і швидкостей swarm drones.

ABSTRACT

Master's thesis: 64 pages, 15 figures, 1 appendices, 14 sources.

ALGORITHM, MATHEMATICAL MODEL, MOTION CONTROL,
PHYSICAL DISORGANIZED ENVIRONMENT, «SWARM - BOT» - SYSTEM,
SWARM DRONES

The purpose of the qualification work is to study the mathematical model of the dynamic change of drone parameters for its application in navigation systems and control the movement of drones, which is part of one "Swarm - bot" - system in a physical unorganized environment.

It is possible to increase the accuracy of the determination of drone movement parameters during group interaction using data integration of relative parameters of swarm drones. The task of joint processing of information obtained from various systems for measuring the movement parameters of swarm drones arises. The qualification work examines the dynamic model of drone parameter changes. This is necessary to increase the accuracy of determining drone movement parameters in case of high measurement errors or unstable operation of satellite positioning systems with the help of complex processing of own and mutual estimates of coordinates and speeds of swarm drones.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОЗИЦІОНУВАННЯ DRONES, ЩО ВХОДЯТЬ ДО СКЛАДУ ОДНІЄЇ «SWARM - BOT» - SYSTEM.....	10
1.1 Супутникові системи визначення координат та швидкостей	12
1.3 Принцип дії інерційних систем визначення місцезнаходження	20
1.4 Оптичні системи визначення координат та швидкостей	23
1.4.1 Кореляційно-екстремальні системи позиціонування	24
1.4.2 Системи одночасної локалізації та картографування	27
2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ПАРАМЕТРІВ РУХУ DRONE	31
2.1 Огляд супутникових методів визначення позиціонування та параметрів руху drone.....	31
2.2 Обчислення позиціонування та параметрів руху drone в інерційних системах	37
3 ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДИНАМІЧНОЇ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ DRONE	44
ВИСНОВКИ.....	49
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	50
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	53

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

АК – апаратура користувача

ГСП – гіростабілізовані платформи

КЕСН – кореляційно-екстремальні системи навігації

ОВС – опорні вимірювальні станції

ОНС – оптична навігаційна система

СРНС – супутникові радіонавігаційні системи

SLAM – системи одночасної локалізації та картографування (англ.,
Simultaneous Location And Mapping)

ВСТУП

За допомогою сучасного рівня розвитку елементної бази виконується проектування drones, які здатні з високою ефективністю виконувати моніторингові та інші завдання. При проектуванні таких систем закладається можливість бортових підсистем drones забезпечувати політ без участі людини за умов функціонування, що змінюються в physical environment (наприклад, погодній обстановці).

При відсутності сигналів супутникових навігаційних систем GPS або ГЛОНАСС для підвищення точності місцезнаходження drones застосовують інерційні навігаційні системи або системи оптичної навігації.

Останнім часом все більший інтерес викликає застосування платформ «Swarm - bot» - system, які дозволяють підвищити надійність виконання поставлених завдань та досягти мети. Крім того, використання декількох drones, що входять до складу однієї «Swarm - bot» - system, дозволяє значно скоротити час виконання завдання, наприклад:

- картографування місцевості;
- патрулювання території;
- дій при надзвичайних ситуаціях.

Розв'язання swarm завдань стикається з низкою особливостей, характерних для організації взаємодії між drones, що входять до складу однієї «Swarm - bot» - system. Серед таких особливостей виділяють, наприклад, наступні підзадачі:

- формування ладу drones;
- управління swarm drones.

Підвищити точність визначення параметрів руху drones при груповій взаємодії можливо за допомогою комплексування даних відносних параметрів swarm drones. Виникає завдання спільної обробки інформації, отриманої від різних систем вимірювання параметрів руху swarm drones. У

кваліфікаційній роботі досліджується динамічна модель зміни параметрів drone. Це необхідно для підвищення точності визначення параметрів руху drone при високих похибках вимірювань або нестабільній роботі супутникових систем позиціонування за рахунок комплексної обробки власних та взаємних оцінок координат та швидкостей swarm drones.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОЗИЦІОНУВАННЯ DRONES, ЩО ВХОДЯТЬ ДО СКЛАДУ ОДНІЄЇ «SWARM - BOT» - SYSTEM

Нині затребуваним стало вирішення завдань, спрямованих на підвищення ефективності систем керування платформами «Swarm - bot» - system. Одним із найважливіших критеріїв побудови оптимальної системи управління «s-bots», що входять до складу однієї «Swarm - bot» - system, є точне визначення місцезнаходження інтелектуальних мобільних «s-bots» у просторі. До таких пристроїв можуть належати:

- повітряні «s-bots»;
- наземні «s-bots»;
- надводні «s-bots»;
- підводні «s-bots».

У кваліфікаційній роботі в якості повітряного «s-bots», розглядається drone (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Приклад drone

До особливостей управління drones відносять їх порівняно високу швидкість переміщення, а також високу залежність від впливу зовнішніх

факторів *physical environment* (наприклад, погодної обстановки). В останні роки зріс інтерес до управління не окремим *drone*, а до платформ «*Swarm - bot*» - *system* (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Приклад платформи «*Swarm - bot*» - *system*

Рішення *swarm* задач стикається з рядом явищ, характерних для організації взаємодії між *drones*, що входять до складу однієї «*Swarm - bot*» - *system*. Тому огляд, аналіз та дослідження алгоритмів визначення позиціонування *swarm drones* є актуальними завданнями.

У кваліфікаційній роботі виконано аналіз сучасних засобів визначення параметрів руху, які застосовуються як до одиночного *drone*, так і до *swarm drones*. Розглядаються можливості підвищення точності визначення позиціонування *swarm drones*.

Для вирішення поставленої задачі необхідно розглянути джерела параметрів руху *swarm drones*, особливості виникнення помилок визначення параметрів руху *swarm drones* та методи комплексування даних від різних джерел.

1.1 Супутникові системи визначення координат та швидкостей

В основі роботи супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) лежить принцип беззапитових далекомірних вимірювань між космічними супутниками та споживачем та передачі у складі сигналу інформації про координати супутників (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Приклад супутникової радіонавігаційної системи

Одночасно з цим проводяться вимірювання відстаней до космічних супутників, які засновані на обчисленні тимчасових затримок сигналу, що приймається від супутника. Принцип дії супутникових систем описують наступним чином.

Космічні апарати, обертаючись навколо Землі строго заданими орбітами і траєкторіями, формують «сузір'я» з кількох супутників, що знаходяться в зоні технічної видимості пристроїв біля земної поверхні.

Кожен із супутників формує та відправляє у бік Землі радіодалекомірний сигнал та повідомлення, що містить інформацію про місцезнаходження (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Приклад «сузір'я» з кількох супутників

Прийнявши і розпізнавши сигнали та повідомлення від супутників, станції, що слідкують, відправляють отриману інформацію на провідну станцію. Обчислювальні пристрої на провідній станції здійснюють:

- оцінювання отриманої інформації;
- зіставлення поточних координат супутників із заданою траєкторією;
- порівняння показників атомного годинника супутників з часом еталонного годинника на станції.

Потім формується навігаційне повідомлення, що включає інформацію про всі супутники системи, які знаходяться на орбітах, сигнал корекції, прогнозоване положення кожного з супутників. Сформоване повідомлення прямує від провідної станції до завантажувальних станцій, засобами яких відбувається передача інформації кожному із супутників видимого «сузір'я».

Враховуючи всі поправки, отримані від наземного сегмента, на кожному супутнику формується повідомлення, що містить координати положення супутника та час формування повідомлення, і відправляється у бік Землі одночасно з радіодалекомірним сигналом на заданих частотах. Устаткування споживача при включенні сканує радіоефір у певному діапазоні на наявність сигналів, що транслюються супутниками (рисунок 1.5).

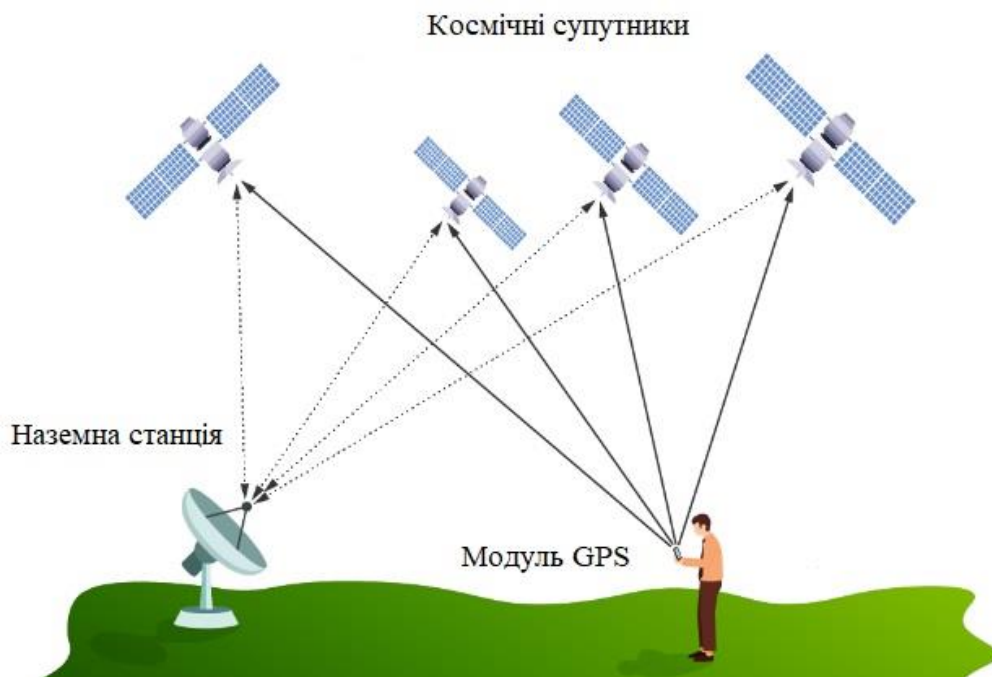


Рисунок 1.5 – Приклад взаємодії обладнання споживача із космічними супутниками

Визначення розташування обладнання споживача здійснюється обчислювальним пристроєм на підставі координат супутників і тимчасових міток, що містяться в повідомленнях від супутників, та показників радіодалемірних сигналів. В даний час у світі повноцінно функціонує глобальна супутникова система позиціонування – GPS (США). Близькі до завершення роботи з розгортання глобальних супутникових радіонавігаційних систем GALILEO (Євросоюз) та BEIDOU (Китай). Розробкою та реалізацією регіональних супутникових систем позиціонування

займаються Японія – QZSS та Індія – NAVIC.

В системі GPS (Global Positioning System – Глобальна система позиціонування) Існує так званий диференціальний режим роботи. Такий режим необхідний у випадках, коли пред'являють особливі вимоги до точності визначення місцезнаходження drone. Диференціальний режим дозволяє значною мірою виключити вплив помилок на визначення місцезнаходження датчиками супутникових систем позиціонування.

Склад супутникової системи позиціонування доповнюється у наземному сегменті опорними вимірювальними станціями (ОВС) (рисунок 1.6).

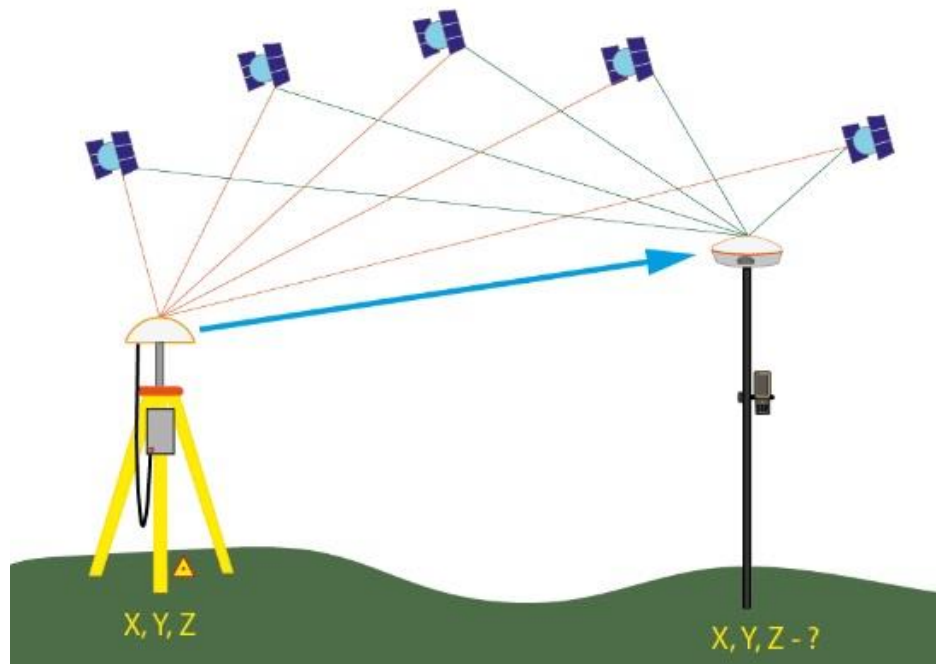


Рисунок 1.6 – Приклад опорних вимірювальних станцій

Робота методу ґрунтується на відносно постійному рівні похибок вимірювань у часі та просторі. Базовим фактором функціонування систем у диференціальному режимі є наявність крім апаратури споживача однієї або кількох наземних стаціонарних станцій, які здійснюють вимірювання дальностей до космічних супутників, що знаходяться у зоні видимості. У разі

знаходження апаратури споживача у відносній близькості до наземної опорної вимірювальної станції, можна визначити величину повільно змінюваних складових похибок вимірювань дальностей і швидкостей, спричинених переважно метеорологічними явищами в атмосфері. На підставі розрахованих похибок формується сигнал, що містить диференціальні поправки, які передаються на приймач апаратури споживача. В якості каналів передачі повідомлень від опорних вимірювальних станцій до пристроїв користувача застосовують:

- радіорелейні;
- супутникові;
- стільникові або інші спеціалізовані системи зв'язку.

За територіальним охопленням дії диференціальні системи поділяють на:

- широкозонні;
- регіональні;
- локальні.

Широкозонні диференціальні підсистеми функціонують у радіусі близько 2500 км від контрольно-коригуючої станції. Прикладами таких підсистем є європейська система EGNOS та американська WAAS. Передбачувана точність визначення координат становить від 2,5 до 5 м. Діаметр робочої зони регіональних диференціальних підсистем становить 400 - 2000 км, а центр обробки даних може містити як одну, так і кілька контрольно-коректуючих станцій.

Регіональні підсистеми застосовуються для підвищення точності позиціонування у гірських, прибережних районах, а також у зонах із вузькими морськими протоками та каналами. Основним представником регіональних підсистем є обладнання Starfix, що забезпечує точність навігації 1 - 2 м на відстані до 1000 км і похибка менше 3 метрів при відстані до 2000 км.

Локальні диференціальні системи застосовують для визначення

місцезнаходження і швидкостей в акваторіях портів і гаваней, забезпечення заходу на посадку і посадку літальних апаратів, і навіть для точних геодезичних і землемірних робіт. Радіус дії підсистеми навколо контрольно-коригуючої станції не перевищує 200 км. Для рухомих об'єктів точність позиціонування становить 2 - 4 м з високим ступенем надійності та доступності системи. Для геодезичних робіт похибка не перевищує 1 м, причому до показників надійності застосовуються значно менші вимоги. Представниками локальних диференціальних підсистем визначення місцезнаходження для літальних апаратів є системи D920/D930 фірми DASA (Німеччина).

Існує три основні ознаки класифікації різновидів диференціального режиму визначення параметрів руху:

- ознака № 1 – за типом вимірів. Розрізняють вимірювання фази коду або фази несучої частоти сигналу;
- ознака № 2 – по виду корекції. По виду корекції режими поділяють на корекцію псевдодальності та псевдошвидкості або корекцію значень координат, швидкостей та іншої інформації. Здійснення корекції може відбуватися в апаратурі споживача або в контрольно-коректуючій станції;
- ознака № 3 – включає різновиди засобів передачі коригуючої інформації.

Перевагою диференційованого режиму роботи супутникових радіонавігаційних систем є значне підвищення точності визначення позиціонування. З недоліків можна виділити залежність поширення коригувального сигналу від метеорологічних умов, можливість накладання сигналів від кількох супутників в умовах щільної міської забудови або втрата супутників з видимості при польотах у тунелях чи ущелинах.

1.2 Інерційні системи визначення координат та швидкостей

Інерційна система позиціонування являє собою сукупність датчиків і

механізмів, swarm drones, за допомогою яких обробляються отримані дані (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Приклад застосування сучасних інерційних модулів

Основним призначенням системи є автоматичне визначення параметрів руху, що включають місцезнаходження по:

- широті;
- довготі;
- висоті.

Також система обчислює швидкість переміщення щодо Землі та кути орієнтації об'єкта (курс, тангаж, крен). В інерційній навігаційній системі (ІНС) розв'язання задачі пошуку параметрів руху об'єкта полягає в обробці інформації, яка поділяється на (рисунок 1.8):

- первинну;
- початкову;
- вихідну.

Первинна інформація визначається як дані про поступальний рух об'єкта та обертальний рух базових напрямків. Джерелами первинної інформації є датчики лінійного прискорення – акселерометри і кутової швидкості – гіроскопи. Значення вихідних сигналів таких датчиків можуть змінюватись протягом усього періоду спостережень.



Рисунок 1.8 – Приклад сучасної інерційної навігаційної системи

Початкова інформація представляє собою відомості про рух об'єкта і обертальний рух базових напрямків, щодо показань в перший момент дії системи позиціонування. Початкова інформація формується у обчислювальних пристроях, робота яких заснована на інтегруванні показань акселерометрів та гіроскопів.

Вихідною інформацією прийнято вважати всі дані, необхідні для вирішення завдання визначення місцезнаходження, задані до початку роботи системи. Зазвичай така інформація записана в енергонезалежну пам'ять обчислювальних пристроїв і може містити, наприклад, алгоритм перерахунку координат.

Інерційні системи позиціонування у загальному випадку поділяють на два типи:

- платформні, що мають у своєму складі гіростабілізовану платформу;
- безплатформні.

Платформні інерційні системи позиціонування включають такі типи систем:

- напіваналітичні – системи, в яких осі чутливості гіроскопів та акселерометрів орієнтовані по осях будь-якої системи координат;
- аналітичні – системи, у яких осі чутливості гіроскопів та акселерометрів орієнтовані по осях геоцентричної системи координат;
- геометричні – системи, в яких осі чутливості гіроскопів орієнтовані по осях геоцентричної системи координат, а осі чутливості акселерометрів – по осях будь-якої горизонтальної системи координат.

Принциповою відмінністю платформних інерційних систем позиціонування від безплатформних інерційних систем позиціонування є наявність спеціальної прецизійної гіростабілізованої платформи (ГСП), що включає датчики первинної інформації, осі яких орієнтовані на осі однієї або декількох систем координат.

Недоліками таких інерційних систем позиціонування є наявність гіростабілізованої платформи, що впливає на масу, габарити, вартість інерційних систем позиціонування. Схема безплатформних інерційних систем має на увазі безпосередній зв'язок гіроскопів та акселерометрів з корпусом рухомого об'єкта. У таких системах, у складі яких відсутня гіростабілізована платформа, завдання визначення кутової орієнтації об'єкта виконується обчислювальним пристроєм. Стрімкий розвиток цифрової обчислювальної техніки дозволив визначати засобами обчислювальних пристроїв не тільки місце розташування та швидкості об'єкта, а й кутову орієнтацію об'єкта, що рухається.

Зменшення кількості механічних елементів інерційної системи позиціонування сприяло швидкому переходу від платформних інерційних систем позиціонування до безплатформних інерційних систем позиціонування.

1.3 Принцип дії інерційних систем визначення місцезнаходження

Принцип дії інерційних систем визначення місцезнаходження визначення місцезнаходження полягає в комплексній обробці обчислювальним пристроєм інформації, що отримується від акселерометрів і гіроскопів. Акселерометри за структурним складом можуть бути одно-, дво- та тривісними, осі яких розташовані по осях системи координат. Робота акселерометра полягає у перетворенні діючого прискорення на пропорційний йому електричний сигнал. Сформований електричний сигнал проходить процедуру інтегрування в першому інтеграторі, на виході якого виходить значення швидкості переміщення об'єкта по осі координат, перпендикулярно до якої розташована вісь акселерометра.

Пройшовши процедуру інтеграції у другому інтеграторі, електричний сигнал несе інформацію про пройдений шлях по одній з осей системи координат. Інтегруючи показання двох або трьох акселерометрів, отримуємо частину первинної інформації, що містить переміщення та зміну швидкості об'єкта у фіксованому інтервалі часу. Гіроскопи з трьома ступенями свободи застосовуються для визначення кутового положення об'єкта по гірогоризонту, гіровертикалі та гіронапівкомпасу, тобто для визначення кутів крену, нишпорення і тангажу. Враховуючи специфіку конструкції гіроскопа, що дозволяє визначити відхилення максимум по двох координатних осях, для отримання повної первинної інформації необхідно використання не менше двох, розташованих перпендикулярно один до одного, гіроскопічних пристроїв.

При зміні кута руху об'єкта одна з рамок гіроскопа відхиляється щодо нейтрального положення. Переміщення, що виникло, фіксується датчиками кута і моменту, взаємодія яких призводить до формування електричного сигналу, що несе інформацію про кутову швидкість об'єкта. Крім механічних гіроскопів широкого поширення та застосування набули гідродинамічні, вібраційні та оптичні гіроскопічні пристрої.

Подальша обробка первинної інформації полягає у зіставленні

отриманих в даний час даних зі значеннями координат, швидкостей і кутів орієнтації об'єкта в попередній момент часу. Таким чином, за допомогою вихідної інформації, що включає математичні алгоритми обробки даних, визначається поточне місцезнаходження, орієнтація та швидкість переміщення drone.

Сучасні напрями розвитку інерційних систем ґрунтуються на вдосконаленні обладнання в галузі точності, надійності, перешкодозахищеності та економічності інерційних систем визначання місцезнаходження. Області роботи з покращення показників інерційних систем умовно поділяють на розробку:

- апаратної частини системи позиціонування;
- алгоритмічної частини системи позиціонування.

Значним кроком у покращенні апаратної частини інерційних систем став перехід від платформних інерційних систем до безплатформних інерційних систем. Виробники та споживачі інерційних систем позиціонування по всьому світу практично повністю здійснили перехід від платформних систем до безплатформних інерційних систем.

Підставою для цього є значні переваги безплатформних інерційних систем, що полягають у необмеженості кутів вимірювань, високих показниках інформативності, надійності, стійкості до зовнішніх механічних впливів, низьких масогабаритних параметрах та енергоспоживанні. Однак показники точності безплатформних інерційних систем поступаються платформним системам.

Для часткової компенсації такого недоліку застосовуються апаратні способи поєднання принципів побудови платформних і безплатформних інерційних систем. Підвищення показників точності також досягається шляхом удосконалення чутливих елементів, тобто акселерометрів та гіроскопів. У сучасних інерційних системах застосовують лазерні або волоконно-оптичні гіроскопи, кварцові акселерометри та високопродуктивні енергоефективні бортові обчислювальні пристрої.

Удосконалення програмної частини системи визначення параметрів руху полягає у розробці алгоритмів обробки даних, що дозволяють мінімізувати помилки визначення параметрів, які мають властивість накопичуватися з часом функціонування ІНС. Окрема увага приділяється способам оновлення інформації про базове положення об'єкта шляхом періодичних одноразових вимірювань параметрів супутниковими або оптичними системами позиціонування.

Така інформація дозволяє скидати накопичену помилку вимірювань інерційних систем визначення місцезнаходження і в якості початкової інформації приймають оновлені дані від супутникової радіонавігаційної системи.

1.4 Оптичні системи визначення координат та швидкостей

Оптична навігаційна система (ОНС) являє собою сукупність технічних засобів і алгоритмів, що дозволяють визначати місце розташування та швидкість переміщення об'єкта за графічними зображеннями, що змінюються (рисунок 1.9).

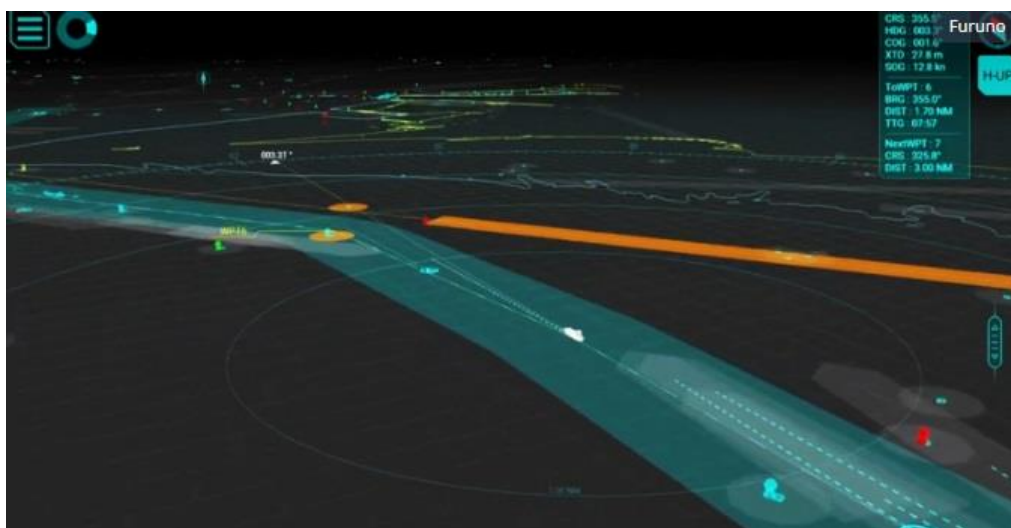


Рисунок 1.9 – Приклад зображення оптичної навігаційної системи

Отримання первинної інформації у вигляді зображень поверхні Землі здійснюється засобами фото та/або відеофіксації, що містять оптичні елементи для фокусування та масштабування одержуваного зображення. Обробка масивів отриманих зображень і перерахунок обумовленого місця розташування в значення координат здійснюється обчислювальними пристроями. Виходячи з принципів роботи системи розпізнавання та обробки зображень, у тому числі й системи оптичного визначення параметрів руху, дістали назву «технічний зір».

Системи оптичного місцезнаходження є автономними і не вимагають для здійснення діяльності зовнішніх сигналів, що робить пристрої стійкими до протидії. Похибки оптичної навігаційної системи залежать від точності цифрових карт, що застосовуються в алгоритмах обробки зображень, а також від характеристик та мінливості об'єктів, що використовуються як орієнтири. Недоліками оптичної навігаційної системи є необхідність підсвічування від Сонця, чутливість до наявності в повітрі аерозолів та інших частинок, залежність точності визначення параметрів руху від кількості оброблюємих показників погодних умов. Точність позиціонування залежить від дозволу одержуваних зображень, у зв'язку з чим стоїть актуальне завдання щодо оптимізації обчислювальних витрат на визначення інформації про поточне місцезнаходження. Важливим недоліком є необхідність встановлення обладнання з великими обчислювальними потужностями для обробки масивів великих зображень. Системи позиціонування, засновані на роботі «технічного зору», поділяють на кореляційно-екстремальні системи навігації – КЕНС та системи одночасної локалізації та картографування – simultaneous location and mapping (SLAM).

1.4.1 Кореляційно-екстремальні системи позиціонування

В основі роботи кореляційно-екстремальних навігаційних систем (КЕНС) лежить порівняння зображень земної поверхні, що одержуються в

момент польоту, або сукупності орієнтирів з еталонними даними, отриманими та завантаженими в пам'ять обчислювального блоку drone до початку польоту (рисунок 1.10).

Різниця положень об'єктів місцевості або орієнтирів, що отримується на зображеннях в результаті переміщення об'єкта, дозволяє визначити величину та швидкість переміщення апарата відносного попереднього положення. В даний час застосовуються кореляційно-екстремальні навігаційні системи, що класифікуються за типом процедури обробки інформації з:

- безпошуковими;
- пошуковими;
- комбінованими;
- байєсовськими алгоритмами.

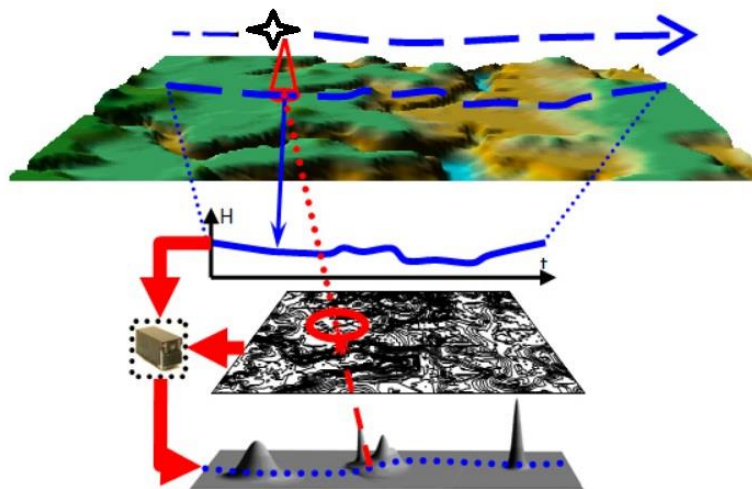


Рисунок 1.10 – Приклад роботи кореляційно-екстремальних навігаційних систем

В основі безпошукового алгоритму лежить фільтр Калмана, який застосовується для оцінки помилок визначення координат та спостереження різниці між виміряними та картографічними даними. Недоліком алгоритму є обмеження на припустимі помилки у початковий момент роботи системи. З

переваг виділяють найменші обчислювальні витрати зі збільшенням параметрів, що оцінюються. Пошуковий алгоритм ґрунтується на наданні множини дискретних гіпотез про поточні помилки зчислення параметрів руху. Після кількох кроків оцінювання відбувається визначення гіпотези, згідно з якою мінімальна помилка оцінювання характеризується різницею вимірюваного та розрахованого за певною гіпотезою параметра. Недоліком методу є необхідність накопичення кількох вимірювань для відбору оптимальної гіпотези, внаслідок чого компенсація похибок здійснюється не на кожному етапі оцінювання.

Комбінований метод кореляційно-екстремальних навігаційних систем побудований на об'єднанні безпошукових та пошукових алгоритмів та виключає основні недоліки двох способів. Кореляційно-екстремальна навігаційна система, що заснована на байєсівському алгоритмі обробки інформації, представляє корекцію вимірюваних параметрів руху як завдання нелінійної фільтрації. Недоліком методу є необхідність високопродуктивних обчислювальних пристроїв. З переваг виділяють відносно високу точність і безперервність процесу оцінювання та коригування. Процес визначення місцезнаходження об'єкта, що рухається, кореляційно-екстремальними навігаційними системами умовно поділяють на етап отримання інформації та етап алгоритмічної обробки даних. Для отримання зображення можуть застосовуватися акустичні та лазерні висотоміри та далекоміри, тепловізори, фото та відеокамери. Як джерела зображень можуть служити теплові поля, поля яскравості відбитого сигналу, поля рельєфу поверхні, що підстилає, і т.д.

Найбільшого застосування отримали системи розпізнавання:

- рельєфу;
- берегової лінії;
- об'єктів інфраструктури;
- меж лісів;
- полів;

- доріг, а також інших тривимірних природних об'єктів.

Залежно від застосованих компонентів системи фіксації, можливе отримання зображень з різною частотою оновлення кадрів, масштабу, розширення, яскравості. Досконалість фіксуючих пристроїв безпосередньо залежить від можливостей обчислювальної системи, потужності якої здатні із заданою швидкістю обробляти зображення необхідного розширення. Обробка зображень здійснюється бортовою цифровою обчислювальною системою за одним із описаних вище алгоритмів. Потім формуються оцінки параметрів руху та коригувальні сигнали управління. У загальному випадку до складу обчислювальної системи входять: зовнішній пристрій, цифрова польотна карта, обчислювальний модуль і програмне забезпечення. Запам'ятовуючий пристрій необхідний для зберігання об'ємних картографічних даних. Цифрова карта містить інформацію про поверхню рельєфу та вертикальні перешкоди на шляху прямування дроне. Програмне забезпечення містить алгоритм обробки вимірюваних даних, зіставлення їх з еталонними значеннями та перерахунок у задану систему координат. Обчислювальний модуль, виконаний на базі мікропроцесорів, здійснює взаємодію програмного забезпечення, цифрової карти та масиву картографічних даних.

1.4.2 Системи одночасної локалізації та картографування

Системи одночасної локалізації та картографування (simultaneous location and mapping – SLAM) призначені для вирішення задач визначення поточного розташування об'єкта, а також формування карти навколишнього середовища (рисунки 1.11).

Метод simultaneous location and mapping ґрунтується на виявленні технічними засобами спостереження нерухомих орієнтирів у полі видимості та уточненні за їх допомогою власних координат. Класифікація методів одночасної локалізації та картографування може здійснюватися за типом

датчиків «технічного зору» (фото та відеокамери, далекоміри) або за способом обробки отриманих зображень та обчислень параметрів руху (алгоритм гіпотез, фільтр Калмана, фільтр частинок). Принциповою відмінністю simultaneous location and mapping від методу кореляційно-екстремальних навігаційних систем є відсутність еталонних карт місцевості, завантажених в пам'ять бортової обчислювальної машини до початку руху.



Рисунок 1.11 – Архітектура системи одночасної локалізації та картографування

Досліджувана автономним апаратом карта місцевості може відноситися до групи з чисельними орієнтирами або до групи з відсутністю таких. Перша група включає як природні об'єкти (дерева, берегові лінії, різкий рельєф), так і штучно створені (кути будівель, висотні споруди). До другої групи відносять площі з повною відсутністю орієнтирів (морська гладь, пустеля) або з об'єктами, що важко розрізнити (величина об'єкта настільки велика, що не може бути визначена як матеріальна точка).

Як первинні джерела інформації в системі позиціонування на основі simultaneous location and mapping є фото та відеокамери, а також далекоміри (рисунок 1.12). Використання в якості датчиків однієї або двох камер накладає обмеження на оптичні системи навігації, які полягають в

обмеженому полі огляду drone, що при різкій зміні напрямку руху підвищує ймовірність дезорієнтації, помилкового складання карти або пошкодженню пристрою. Для усунення такого недоліку застосовують багатоспрямовані датчики, які можуть бути виконані у вигляді катадіоптричних датчиків, камер із надширококутним об'єктивом, а також масиви камер з перетином області видимості та без таких перетинів.



Рисунок 1.12 – Приклад первинних джерел інформації drone

Пристрій катадіоптричної камери включає звичайну відеокамеру та дзеркало, вигнуте у формі конуса або напівсфери. Кадр, отриманий такою камерою, являє собою зображення 360° навколо вертикальної осі об'єктива, що має досить спотворену картинку. Масив камер являє собою жорстко закріплені одна щодо іншої різноспрямовані камери. Масштаб камер може бути підібраний з урахуванням стереозйомки, тобто з перетином зображень сусідніх камер або без таких перетинів. Залежно від кількості камер та їх параметрів виходять зображення різної повноти та спотвореності. Камери з надширококутним об'єктивом являють собою сукупність однієї простої камери та ширококутних лінз. Отримване таким пристроєм зображення має кут огляду, що не перевищує 220°, але з відносно низьким рівнем спотворення картинки. Перевагою застосування камер для отримання первинної інформації є можливість отримання кольорових зображень

місцевості, що полегшує пошук і розпізнавання орієнтирів. З основних недоліків можна назвати ускладнення алгоритму обробки графічної інформації для отримання тривимірної карти місцевості. Оптимальним способом отримання 3D-карти є застосування в якості первинних джерел інформації ультразвукових, лазерних або інфрачервоних далекомірів. Принцип дії запропонованих просторових далекомірів однаковий і полягає у вимірі часу від випромінювання сигналу до моменту прийому його відображення. Відмінності датчиків полягають у характері сигналу, що випромінюється, часу його поширення, а також складності та вартості обладнання. На практиці застосовують комплекси далекомірів для більш швидкого отримання детальної інформації про розташування та форму орієнтирів. За результатами вимірювань виходять масиви відстаней від випромінювача до об'єктів, які перетворюються на зображення за допомогою алгоритмів обробки первинної інформації.

Аналіз сучасного стану оптичних систем позиціонування показує, що визначення параметрів руху за допомогою автономних оптичних систем є актуальним завданням науки і техніки. Системи, що ґрунтуються на методі *simultaneous location and mapping*, активно розвиваються як в апаратній, так і в алгоритмічній складових. Застосування систем визначення місцезнаходження на основі *simultaneous location and mapping* популярно при вирішенні завдань картографування. Показники точності визначення параметрів руху при застосуванні розглянутих методів оптичної локалізації безпосередньо залежать від точності датчиків, що застосовуються (дальномірів, висотомірів, одометрів).

2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ПАРАМЕТРІВ РУХУ DRONE

2.1 Огляд супутникових методів визначення позиціонування та параметрів руху drone

У розділі 1.1 кваліфікаційної роботи зазначалося, що у складі супутникової системи позиціонування від супутника до апаратури користувача передаються далекомірні сигнали та повідомлення, що передається за допомогою додаткової низькочастотної модуляції. У повідомленні передається службова інформація, що містить дані про:

- корекції шкали часу супутника;
- ефемериди супутника;
- альманах;
- телеметричну інформацію;
- поправки на поширення радіосигналів.

Кожен супутник сузір'я відправляє повідомлення у суворо відведений час з метою унеможливлення накладання сигналів від різних супутників. Кодовий поділ сигналів від різних супутників має на увазі наявність адресного сигналу, некорельованого з кодами інших супутників.

Основним завданням апаратури користувача (АК) є вимірювання та обчислення службової інформації на підставі отриманих від супутника радіосигналів. Важливим фактором точного визначення місця розташування та швидкості переміщення об'єкта є синхронізація годинника на апаратурі користувача, космічних супутниках та наземних станціях.

Координати drone розраховуються на підставі обчислених дальностей до видимих супутників сузір'я. Завдання пошуку швидкостей переміщення drone зводиться до вимірювання доплерівського зміщення частоти сигналу, що приймається.

Розрахунок координат може здійснюватися наступними способами:

- далекомірним;
- псевдодальномірним;
- різницево-далекомірним.

Обчислення швидкостей переміщення виконується такими методами:

- доплерівським;
- псевдодоплерівським;
- різницево-доплерівським

По синхронізованим годинникам одночасно в апаратурі користувача та супутнику формується кодова послідовність, яка відправляється в радіодальномірному сигналі від супутника до користувача.

Прийнявши сигнал із деякою затримкою (ΔT), приймальний пристрій покроково здійснює фільтрацію отриманої послідовності до збігу сформованого та отриманого кодів за часом.

Кожен крок фільтрації відбувається в певний період часу (τ), а тимчасова затримка між прийнятим та сформованим в апараті користувача кодами формується на підставі величини такого періоду та кількості кроків фільтрації (n):

$$\Delta T = \tau \cdot n, \quad (2.1)$$

Застосовуючи розраховану тимчасову затримку та відому швидкість поширення радіосигналу (c) обчислюється показник дальності супутника від апаратури користувача у загальному вигляді:

$$D = c \cdot \Delta T, \quad (2.2)$$

Дальномірний метод визначення координат апаратури споживача функціонує за наявності мінімум трьох видимих супутників. Основним

параметром при цьому є дальність (D), яка також є радіусом сфери з центром у точці з координатами супутникової антени.

Координати drone визначаються як точки перетину трьох сфер і можуть бути перераховані з виразу визначення дальності D_{dm} далекомірним методом:

$$D_{dm} = D + c \cdot \Delta t_a = ((x_{si} - x)^2 + (y_{si} - y)^2 + (z_{si} - z)^2)^{1/2} + c \cdot \Delta t_a, \quad (2.3)$$

де x_{si} , y_{si} , z_{si} – відомі з повідомлення координати i -го супутника;

D – дальність;

x , y , z – шукані координати drone;

c – швидкість поширення радіосигналу;

Δt_a – затримка сигналу в атмосфері.

Недоліком методу є припущення, що всі вимірювання виконані одноразово. Однак насправді шкали часу супутника та апарату користувача можуть мати розбіжності на величину (t'). Зменшити відхилення за часом можна застосувавши високостабільні еталони часу і частоти, що значно підвищить вартість апаратури споживача. Компенсація розбіжностей у часі реалізована в псевдодальномірному методі визначення місцезнаходження об'єкта.

Псевдодальномірний метод забезпечує компенсацію невідомої величини різниці тимчасових шкал супутників та апаратури споживача за наявності мінімум чотирьох супутників у зоні видимості. Вимірювання псевдодальностей (D_{pdm}) зводиться до пошуку точки перетину чотирьох сфер з центром з координатами антени супутника та радіусом (D_{pdm}).

Шукані координати об'єкта перераховуються з виразу:

$$D_{pdm} = D_{dm} + D' + c\Delta t_a = ((x_{si} - x)^2 + (y_{si} - y)^2 + (z_{si} - z)^2)^{1/2} + ct' + c\Delta t_a,$$

(2.4)

де $D' = ct'$ – відхилення від абсолютних значень дальності, викликане розбіжністю тимчасових шкал супутників та апаратури споживача.

У сучасних супутникових системах застосовується псевдодальномірний метод визначення розташування апаратури споживача.

Різностно-дальномерний метод обчислення координат drone передбачає знаходження різниць псевдодальностей від апаратури споживача до супутників:

$$\Delta D_{ij} = D_{pdm(i)} - D_{pdm(j)},$$

(2.5)

Аналогічно псевдодальномірному, різницево-дальномерний спосіб функціонує за наявності мінімум чотирьох супутників у зоні видимості та використовує різниці до чотирьох супутників, оскільки чотирьох незалежних рівнянь достатньо для пошуку невідомих параметрів (x, y, z, D') .

Визначення вектора швидкості переміщення drone відбувається за рахунок вимірювань доплерівських зсувів частоти сигналів супутників, на підставі яких відбувається розрахунок радіальних швидкостей переміщення об'єкта по відношенню до космічних супутників.

Доплерівський метод визначення швидкостей переміщення drone передбачає диференціювання за часом показника дальності, визначеного далекомірним методом:

$$V_{dm} = \frac{((x_{si} - x)(v_{xsi} - v_x) + (y_{si} - y)(v_{ysi} - v_y) + (z_{si} - z)(v_{zsi} - v_z))}{D_{dm}}, \quad (2.6)$$

де $v_{xsi}, v_{ysi}, v_{zsi}$ – швидкість i -го супутника;

v_x, v_y, v_z – шукані швидкості drone.

Для визначення швидкості drone доплерівським методом достатньо наявності трьох супутників у зоні видимості апаратури споживача. Недоліком методу є можливість вимірювання швидкостей у реальному часі, оскільки для розрахунку (V_{dm}) необхідна наявність відомих координат об'єкта, а також координат та швидкостей супутників. Крім того, для точного визначення швидкості drone потрібен високоточний та стабільний еталон частоти.

Псевдодоплерівський алгоритм визначення швидкостей drone аналогічний псевдодальномірному методу визначення місця розташування об'єкта. У методі враховується невідоме зміщення частоти (f') сигналу, викликане нестабільністю еталону частоти. Вираз пошуку радіальних швидкостей drone з урахуванням відхилень (V'), викликаного зміщенням частоти, набуде вигляду:

$$V_{pdm} = V_{dm} + V' \frac{((x_{si} - x)(v_{xsi} - v_x) + (y_{si} - y)(v_{ysi} - v_y) + (z_{si} - z)(v_{zsi} - v_z))}{D_{dm}} + V' \quad (2.7)$$

Функціонування алгоритму забезпечується при відомих значеннях дальностей до чотирьох супутників та координат апаратури споживача. Різностно-доплерівський спосіб визначення радіальних швидкостей переміщення drone дозволяє виключити залежність від нестабільності еталонів частоти. Позитивний ефект досягається за рахунок обчислення трьох різниць радіальних швидкостей чотирьох супутників. При цьому обчислення різниць можна проводити щодо одного або кількох супутників. За аналогією з різницево-далекомірним методом визначення координат апаратури споживача, різниці радіальних швидкостей визначаються виразом:

$$\Delta V_{ij} = V_{pdm(i)} - V_{pdm(j)}, \quad (2.8)$$

Недоліком різницево-дальномірного методу є відсутність контролю відхилення частот від еталонних значень. У розділі 1.1 описано диференціальний режим роботи супутникових систем позиціонування, у якому здійснюється корекція параметрів руху з урахуванням даних від контрольно-коригуючих станцій.

Залежно від різновиду диференціального режиму може здійснюватись корекція вимірних псевдодальностей та псевдошвидкостей або обчислених координат та швидкостей переміщення drone. Розглянемо алгоритми компенсації помилок на прикладі вектора параметрів x .

У разі визначення координат контрольно-коригуючої станції та апаратури споживача по одному «сузір'ю» космічних супутників можливе застосування диференціального режиму з корекцією координат. За таких умов вектор диференціальних поправок визначається у обчислювальному пристрої станції:

$$\Delta x_s = x_{s(izm)} - x_s, \quad (2.9)$$

де $x_{s(izm)}$ – вектор поточних вимірних значень параметрів;

x_s – вектор точно відомих задалегідь значень.

Потім в апаратурі споживача обчислюються значення вектора параметрів руху на підставі вимірюваних значень ($x_{ap(izm)}$) та отриманих диференціальних поправок:

$$x_{ap} = x_{ap(izm)} - \Delta x_s, \quad (2.10)$$

У випадках, коли відсутні точно відомі задалегідь значення координат коригуючої станції, наприклад, станція є рухомим комплексом,

застосовується диференціальний режим з використанням відносних координат. Режим має на увазі обчислення вектора відносних координат станції та апаратури споживача, при якому виключаються однакові квазісистематичні помилки. Режим із застосуванням відносних координат має достатню точність тільки у разі незначного віддалення об'єктів один від одного і при роботі по одному «сузір'ю» супутників.

2.2 Обчислення позиціонування та параметрів руху drone в інерційних системах

У розділі 1.2 кваліфікаційної роботи описані способи отримання первинної інформації від датчиків інерційних систем - акселерометрів та гіроскопів. Система акселерометрів формує набір прискорень за кожною з координатних осей a_x , a_y , a_z . Параметр (a) представляють як уявне прискорення матеріальної точки під час руху у просторі, вільному від сил тяжіння Землі. Прискорення по кожній з координатних осей можна подати у вигляді основного рівняння інерційного позиціонування:

$$a = w - g_r, \quad (2.11)$$

де w – абсолютне прискорення;

g_r – гравітаційне прискорення.

У загальному випадку завдання визначення параметрів руху об'єкта зводиться до обчислення зміни швидкості і пройденого шляху по кожній з координатних осей за час (t). Вирішення такої задачі можливе інтегруванням отриманих значень прискорень для отримання зміни за час (t_i) швидкості руху об'єкта відносно Землі (Δv_i) та пройденого шляху (s_i):

$$\Delta v_i = \int_0^t a_i dt, \quad (2.12)$$

Отримані значення додають до значень швидкості та координат у початковий момент часу (t_0) для отримання значень параметрів по кожній з координатних осей у поточний момент часу (t_i):

$$\begin{aligned} v_{xi} &= v_{x0} + \Delta v_{xi}, & v_{yi} &= v_{y0} + \Delta v_{yi}, & v_{zi} &= v_{z0} + \Delta v_{zi}, \\ x_i &= x_0 + s_{xi}, & y_i &= y_0 + s_{yi}, & z_i &= z_0 + s_{zi} \end{aligned}, \quad (2.13)$$

Визначення орієнтації засобами інерційних систем позиціонування здійснюється на підставі вимірюваних датчиками гіроскопа величин кутів (α_i) та моментів (M_i), які перераховуються на абсолютні кутові швидкості (ω_i):

$$\omega_i = \frac{M_i}{H_i \cos \alpha_i}, \quad (2.14)$$

де H_i – величина кінетичного моменту ротора гіроскопа.

В даний час існує велика кількість різновидів алгоритмів, що реалізують метод одночасної локалізації та картографування, застосування яких ґрунтується на функціональних обмеженнях обладнання або виконанні спеціалізованих завдань. Найбільшого поширення набули:

- алгоритм EKF-SLAM;
- алгоритм FastSLAM;
- алгоритм DP-SLAM;
- алгоритм ORBSLAM;
- алгоритм LSD-SLAM;

- алгоритм CoreSLAM.

Загалом завдання визначення параметрів руху drone засобами оптичної системи позиціонування зводиться до пошуку змін розташування контрольних точок у кадрі між сусідніми отриманими зображеннями:

$$\begin{cases} I_x(q_1)V_x + I_y(q_1)V_y = -I_t(q_1) \\ I_x(q_2)V_x + I_y(q_2)V_y = -I_t(q_2) \\ \vdots \\ I_x(q_n)V_x + I_y(q_n)V_y = -I_t(q_n) \end{cases}, \quad (2.15)$$

де $I_x(q_i)$, $I_y(q_i)$, $I_t(q_i)$ – часткові похідні зображення I по координатам x, y та часу t в точці q_i ;

q_1, q_2, \dots, q_n – пікселі всередині кадру;

V_x, V_y – координати пікселя кадру.

Методи обчислення параметрів руху за зображеннями вимагають наявності щонайменше двох контрольних точок у кадрі. У разі наявності більшої кількості таких точок з відомими координатами відбувається усереднення обчислених значень. Висота drone H_{drone} обчислюється виразом:

$$H_{\text{drone}} = \frac{\sqrt{A_x^2(C-B_y^2) + A_x B_x + A_y B_y + A_y^2(C-B_x^2) + A_x B_x + A_y B_y}}{A_x^2 + A_y^2}, \quad (2.16)$$

де A – змінна, яка обчислюється, за допомогою координат контрольних точок у кадрі – $x_{i,j}$ и $y_{i,j}$;

B – змінна, яка обчислюється, за допомогою координат та висоти контрольних точок у геоцентричній системі координат $X_{i,j}$, $Y_{i,j}$ та $H_{i,j}$.

Потім обчислюються коефіцієнти K_1 та K_2 перерахунку координат контрольних точок у кадрі координати drone. Отримані коефіцієнти K_1 та K_2

застосовують при обчисленні координат об'єкта:

$$\begin{cases} X_{\text{drone}} = X_i - K_1 x_i + K_2 y_i \\ Y_{\text{drone}} = Y_i - K_2 x_i + K_1 y_i \end{cases} \quad (2.17)$$

Одним з перших алгоритмів вирішення задач локалізації та картографування є метод, заснований на застосуванні розширеного фільтра Калмана (extended Kalman filter – EKF). Особливістю такого методу є можливість оцінки становища не тільки drone, але й усіх орієнтирів, що знаходяться в полі зору датчиків. Недоліком методу є обмеження кількості орієнтирів, що одночасно спостерігаються.

Для позбавлення від подібного обмеження був розроблений метод FastSLAM, що передбачає поділ етапів обробки інформації про всі орієнтири на кілька підзадач. Робота алгоритму FastSLAM ґрунтується на застосуванні Байєсівської мережі. Незалежна обробка інформації про положення кожного орієнтира вимагає менших обчислювальних ресурсів, що дозволяє значно збільшити кількість орієнтирів, що спостерігаються, тим самим підвищивши точність визначення місцезнаходження об'єкта. Працездатність методів EKF-SLAM та FastSLAM найбільшою мірою залежить від наявності на досліджуваній місцевості легко помітних орієнтирів.

Для роботи системи позиціонування при виконанні місій на території з орієнтирами, що важко відрізняються, доцільно застосовувати метод DP-SLAM. У такому методі карта місцевості представляється у дискретній формі у вигляді сітки із заповненням комірок. Елемент сітки є заповненим у разі наявності на цій ділянці місцевості будь-якої перешкоди. Недоліком такого методу є необхідність обробки та постійного оновлення в пам'яті великого обсягу інформації про кожен ділянку карти місцевості. Відмінності методів FastSLAM і DP-SLAM є основоположними для пізніших алгоритмів одночасної локалізації та картографування.

Версія ORB-SLAM є однією з найпопулярніших останнім часом. Робота алгоритму поділена на три основні етапи. Перший етап має на увазі

відстеження кадрів і приблизного визначення положення камери в даний момент часу шляхом порівняння ключових точок попереднього кадру з поточним. На другому етапі відбувається формування та оптимізація карти на основі оновлених даних про положення камери. Третій етап полягає в поєднанні схожих кадрів з новими на підставі обчисленої подібності з подальшим вирівнюванням та об'єднанням однакових ключових точок.

Алгоритм LSD-SLAM також поділено на три основні етапи. Перший етап, аналогічно ORB-SLAM, робить обробку зображень і формує інформацію про переміщення камери. Проте, на відміну першого етапу ORB, у якому відбувається зіставлення ключових точок, у методі LSD розрахунок виробляється виходячи з мінімізації фотометричної помилки. На другому етапі алгоритму LSD відбувається порівняння нового кадру з поточним, і на підставі значень відстані та кутів повороту між кадрами відбувається уточнення чи заміна поточного кадру на новий. Третій етап реалізує процес оптимізації карти на основі теорії графів для запобігання накопиченню помилки.

Робота системи CoreSLAM заснована на вимірюванні пройденого шляху за допомогою одометрів та відстаней до орієнтирів з подальшою обробкою помилок та передбаченням положення та напрямки літального апарату. Потім процес прогнозування положення та орієнтації повторюється на основі фільтру частинок. Після чого відбувається вагова оцінка прогнозів із застосуванням даних картки перешкод. На підставі певної найбільш оптимальної оцінки параметрів здійснюється оновлення карти перешкод.

В даний час розроблено алгоритми визначення відносного положення drones декількома способами:

- перший спосіб полягає у вимірі власних параметрів руху та їх передачі по інформаційних каналах зв'язку;
- другий спосіб має на увазі автономне визначення відносних параметрів радіолокаційними способами на кожному drone.

На підставі отриманих по каналах зв'язку та вимірних значень

відносних параметрів, обчислюють різниці векторів положення з подальшим застосуванням у комплексній обробці інформації.

Розглянуті методи визначення місцезнаходження drones можуть забезпечувати необхідну точність вимірювань параметрів руху в обмежених умовах. Системи оптичного позиціонування пред'являють жорсткі вимоги до метеорологічних умов експлуатації. Інерційні системи мають тенденцію накопичення помилки вимірювання параметрів із часом. Точність супутникових систем визначення місцезнаходження залежить від кількості супутників, що знаходяться в зоні видимості апаратури споживача. Вимоги до показників точності систем позиціонування підвищуються під час виконання завдань swarm drones, оскільки виникає необхідність контролю взаємного становища drones з метою запобігання зіткнень. Однак виміри відносних параметрів руху застосовуються для підвищення точності визначення місцезнаходження drones. Основними складовими помилок виміру псевдошвидкості та псевдодальноти є апаратні помилки, вплив багатопроменевості, іоносфери, тропосфери, помилки ефемеридних параметрів супутників, частотно-часове відхилення від еталонів. Апаратні помилки являють собою похибки датчиків, що виконують безпосередній вимір псевдодальності та псевдошвидкості, а також спотворення, спричинені перетворенням сигналу при розпізнаванні інформації. Вплив багатопроменевості виникає при накладенні один на одного численних відображень супутникових сигналів від різних поверхонь. Проходження сигналів через шари іоносфери і тропосфери викликає заломлення і спотворення сигналів, що транслюються. Застосування супутникових систем позиціонування для swarm drones дозволяє використовувати алгоритми компенсації помилок при диференційному режимі супутникових радіонавігаційних систем з використанням відносних координат. При цьому всі обчислювальні процеси відбуваються в апаратурі кожного drone, а в ролі опорної станції виступає один або кілька сусідніх drones. За умови, що відстань між пристроями групи відносно невелика, робота супутникових

радіонавігаційних систем відбувається по одному «сузір'ю» супутників для всіх drones. У такому разі алгоритмами диференціального режиму можуть бути повністю компенсовані помилки, спричинені впливом іоносфери та тропосфери, а також відхиленням від еталонів ефемерид, частоти та часу апаратури супутника. Часткова компенсація апаратних помилок можлива при застосуванні однотипних drones, що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system з однаковими датчиками на борту. Найбільший вплив на точність визначення координат та швидкостей drones надаватиме фактор багатопроменевості, а також відхилення від еталону часу апаратури споживача.

Аналіз вищеописаного показує, що застосування інформації про взаємне становище drones у групі суттєво підвищує точність оцінки координат, а також підвищує ефективність роботи системи при збоях супутникових радіонавігаційних систем. При цьому необхідно мати чотири опорні точки, дві з яких є космічними супутниками.

З ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДИНАМІЧНОЇ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ DRONE

В даний час системи позиціонування drone являють собою складні програмно-апаратні комплекси. Однак, при всьому різноманітті засобів підвищення точності визначення параметрів руху залишається актуальною задача розробки нових алгоритмів і пристроїв.

Результати розробки мають бути досліджені на ефективність та життєздатність в експлуатаційних умовах. Процес моделювання має на увазі заміну досліджуваного об'єкта його описом, образом або іншим об'єктом, які найближче до оригіналу відтворюють характер поведінки в певних умовах. При цьому модель об'єкта, що досліджується, повинна відповідати вимогам адекватності, повноті, гнучкості та прийнятної трудомісткості.

Адекватність моделі визначається досить точним описом властивостей та характеру об'єкта. Повнота представляє наявність необхідної інформації про об'єкт. Гнучкістю є можливість дослідження поведінки моделі за різних умов. Трудомісткість моделювання повинна бути прийнятною за витратами часу та обчислювальним ресурсом.

Різні методи моделювання умовно поділяють на:

- математичні;
- фізичні;
- напівнатурні.

Найбільш популярним методом дослідження роботи систем позиціонування є математичне моделювання. За допомогою математичних виразів можна з заданою точністю описати процеси, що протікають всередині системи, змодельовати траєкторію і умови переміщення drone, описати величину і ступінь впливу на роботу системи тих чи інших збурень, похибок і помилок. Основними обмеженнями математичного моделювання є обмежений час, відведений на опис процесів, а також потужності

обчислювальних машин.

При створенні математичних моделей необхідно конкретно розставити пріоритети: одні елементи системи мають бути описані максимально докладно, інші можуть бути представлені з деякими припущеннями, а деякими малозначущими явищами можна знехтувати. Часто для прийняття таких рішень вдаються до наступного алгоритму дій:

- формулювання завдання;
- накопичення експериментальних даних;
- визначення ступеня впливу на модель робочих параметрів;
- складання методики експерименту;
- скорочення малозначних робочих властивостей;
- з'ясування обмежень.

Після розробки моделі важливим моментом є перевірка наближення одержаних даних до раніше отриманих експериментальних даних. Інакше, за великих спотворень реальних умов експлуатації систем позиціонування, може загубитися адекватність побудованої моделі. Описані переваги математичного моделювання мають великий вплив при виборі способу дослідження ефективності роботи систем визначення місцезнаходження.

Поширеним методом оцінювання змінних параметрів є алгоритм, в основі якого лежить фільтр Калмана. Процес фільтрації включає етап прогнозування оцінюваних параметрів з урахуванням математичної моделі зміни стану системи. Для комплексного оцінювання всіх параметрів руху, що одержуються в момент часу t_i застосовують векторний фільтр Калмана. Алгоритми векторної калманівської фільтрації застосовують і для комплексної обробки параметрів, отриманих від датчиків різних систем визначення місцезнаходження.

Модель зміни стану системи у векторно-матричній формі запишеться у вигляді:

$$x_i = \varepsilon_i x_{i-1} + \tau_i, \quad (3.1)$$

де x_i – вектор параметрів, що описують стан системи у момент часу t_i ;
 ε_i – матриця, що описує динаміку зміни стану системи;
 τ_i – вектор незалежних випадкових величин з нульовими середніми, спричиненими зовнішніми неконтрольованими деструктивними впливами на drone.

Вимірювання параметрів руху датчиками відбувається з деякою похибкою n_i , яка має дисперсію σ_{ni}^2 , тоді спостереження вектора параметрів можна подати у вигляді багатовимірних спостережень:

$$z_i = C_i x_i + n_i. \quad (3.2)$$

де C_i – матриця, що визначає всі або частину спостережуваних компонент вектора стану;

n_i – вектор незалежних гауссівських випадкових послідовностей з нульовим середнім та коваріаційною матрицею.

Для оцінки координат та швидкостей swarm drones, що взаємодіють у групі, можуть застосовуватися автономні датчики:

- інерційні;
- оптичні;
- супутникові.

Помилки вимірювання координат, швидкостей та їх різниць некорельовані, тоді можна проводити комплексування окремо по кожній з координат і досить розглянути завдання оцінювання параметрів координатної осі X . Для осей Y та Z алгоритми повторяться з точністю до позначення параметрів руху.

Вектор стану параметрів руху swarm drones включає вектори стану координат та швидкостей кожного з drone у swarm (рисунок 3.1). Вектор

спостережень параметрів руху swarm drones включає вектори спостережень координат.

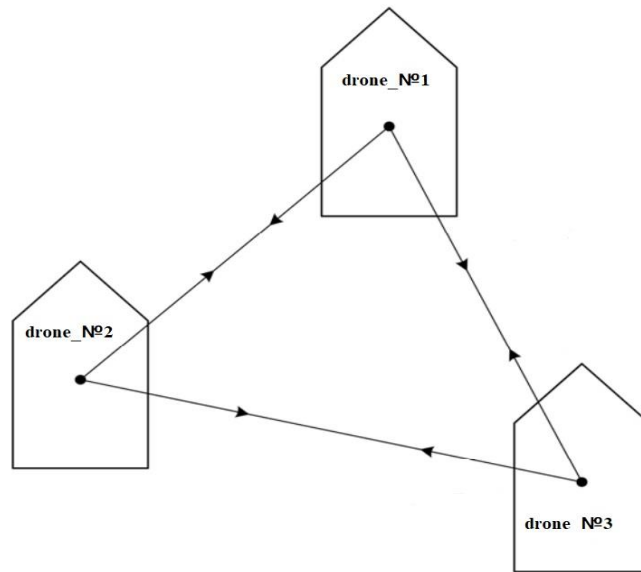


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення swarm drones

На рисунку 3.2 представлено структуру алгоритму оцінки параметрів руху за допомогою векторного фільтра Калмана.

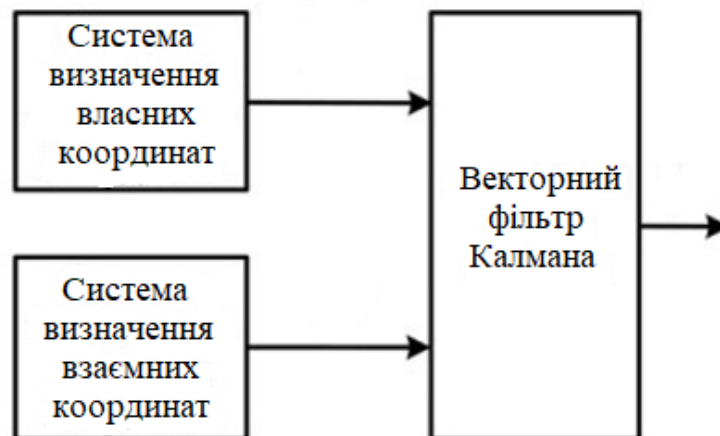


Рисунок 3.2 – Структура алгоритму оцінювання координат за допомогою векторного фільтра Калмана

Отримавши дані від систем визначення координат, формується наглядом власних z_{xi}^1 та взаємних z_{xi}^k координат. Потім здійснюється фільтрація параметрів із застосуванням вектора прогнозу, на виході фільтра отримуємо вектор оптимальних оцінок параметрів руху. При збільшенні кількості drones у swarm зростає розмірність оброблюваних матриць, що призводить до підвищення вимог до ресурсів обчислювальних систем..

Імітаційне моделювання проводилося за допомогою пакета MATLAB, що зумовлено його функціональністю. На рисунку 3.3 представлений графік зміни помилки оцінювання координат σ_ε з перебігом дискретного часу t_i для swarm drones.

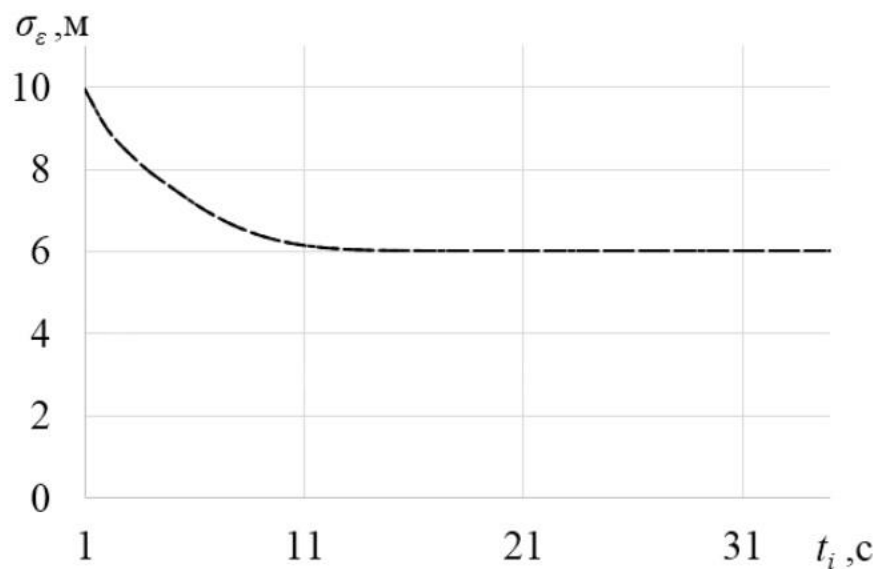


Рисунок 3.3 – Зміна помилки оцінювання параметрів руху swarm drones у дискретному часі

Аналіз графіка показує, що зміни помилки оцінювання координат σ_ε зменшуються із плином часу.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було досліджено математичну модель динамічної зміни параметрів drone для її застосування в системах навігації та управління рухом drones, що входять до складу однієї «Swarm - bot» - system у physical unorganized environment.

У кваліфікаційній роботі для оцінювання параметрів, що змінюються, був застосований алгоритм, в основі якого лежить фільтр Калмана. Процес фільтрації включає етап прогнозування оцінюваних параметрів з урахуванням математичної моделі зміни стану системи. Для комплексного оцінювання всіх параметрів руху, що одержуються в момент часу t_i застосовується векторний фільтр Калмана. Алгоритми векторної калманівської фільтрації застосовують і для комплексної обробки параметрів, отриманих від датчиків різних систем визначення місцезнаходження.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ткачов В.М., Токарев В.В., Радченко В.О., Лебедев В.О. Проблема передачі даних типу BIG DATA у мобільній системі «Мультикоптер-сенсорна мережа» / В.М. Ткачов, В.В. Токарев, В.О. Радченко, В.О. Лебедев // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2017. №2(42). - сс.154-157
2. Пат. 118921 Україна, МПК H04W 64/00. Спосіб передачі цифрових даних мультикоптерною системою між сегментами розподіленої сенсорної мережі та базовою станцією / В.М. Ткачов, В.В. Токарев - № u201704085; заявл. 24.04.2017; опубл. 28.08.2017. Бюл. № 16. 5с.
3. Радченко В.А., Токарев В.В., Ткачев В.М. Мобільна система передачі даних на базі динамічно реконфігурованих мультикоптерних пристроїв / В.О. Радченко, В.В. Токарев, В.М. Ткачов // Проблеми інформатизації: тези доповідей V - наук. - техн. конф., 13 - 15 лист. 2017р. - Харків, 2017. - сс.36.
4. Створення науково-методичних основ забезпечення живучості мережевих систем обміну інформацією в умовах зовнішнього впливу потужного НВЧ випромінювання: звіт про НДР (заключ.) № держреєстрації 0117U003916.: Ф76/109-2017 / Харків. нац. ун-т радіоелектроніки; керівник Г. И. Чурюмов. – Харків, 2017. – 116 с.
5. Ruban I.V., Churyumov G.I., Tokarev V.V., Tkachov V.M. Provision of Survivability of Reconfigurable Mobile System on Exposure to High-Power Electromagnetic Radiation / I.V. Ruban, G.I. Churyumov, V.V. Tokarev, V.M. Tkachov // Selected Papers of the XVII International Scientific and Practical Conference on Information Technologies and Security: (ITS 2017). CEUR Workshop Processing., 30 nov. 2017 y. - Kyiv, 2017. - pp. 105-111.
6. Serkov A., Kravets V., Yakovenko I., Churyumov G., Tokariev V., Nannan W. Ultra Wideband Signals in Control Systems of Unmanned Aerial Vehicles / A. Serkov, V. Kravets, I. Yakovenko, G. Churyumov, V. Tokariev, W.

Nannan // The 10th IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies: (DESSERT'2019)., 5-7 June, 2019 y. - Leeds, 2019. - pp.26 - 29.

7. Серков О. А., Пустовойтов П. Є., Яковенко І. В., Лазуренко Б. О., Чурюмов Г. І., Токарев В. В., Наннан Ванг. Надширокосмугові технології в системах управління мобільними об'єктами. / О. А. Серков, П. Є. Пустовойтов, І. В. Яковенко, Б. О. Лазуренко, Г. І. Чурюмов, В. В. Токарев, Ванг Наннан // Сучасні інформаційні системи. - 2019. - Т.3, №2. - сс.22-27.

8. Серков О.А., Князев В.В., Лазуренко Б.О., Яковенко І.В., Чурюмов Г.І., Токарев В.В. Надширокосмугові технології в задачах забезпечення електромагнітної сумісності рухомих об'єктів / О.А. Серков, В.В. Князев, Б.О. Лазуренко, І.В. Яковенко, Г.І. Чурюмов, В.В. Токарев // Проблеми електромагнітної сумісності перспективних бездротових мереж зв'язку (ЕМС-2019):збірник наукових робіт четвертої міжн. наук.-техн. конф., 24 жовт. 2019 р. - Харків, 2019. - сс. 55-57.

9. Krivoulya G., Tokariiev V., Ilina I, Shcherbak V. Mathematical Model for Finding Probability of Detecting Victims of Man-Made Disasters Using Distributed Computer System with Reconfigurable Structure and Programmable Logic / G. Krivoulya, V. Tokariiev, I. Ilina, V. Shcherbak // IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology: (PIC S&T), 06-09 oct. 2020y. - Kharkiv, 2020. - pp.197 - 201.

10. Krivoulya G., Tokariiev V., Ilina I., Lebediev O., Shcherbak V. Algorithm of Iterations of Distribution of Subtasks Between «S-Bot» in One «Swarm-Bot» System // Proceedings of the 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems: (COLINS 2022). CEUR Workshop Proceedings., 12-13 may. 2022 y. - Gliwice, Poland. - pp. 1531-1541.

11. Koshevoy N., Ilina I., Tokariiev V., Malkova A., Muratov V. Implementation Of The Gravity Search Method For Optimization By Cost Expenses Of Plans For Multifactorial Experiments // Radioelectronic and Computer Systems. – 2023. Vol. 1(105). - pp. 23-32. Doi:

10.32620/reks.2023.1.02.

12. Кривуля Г.Ф., Токарев В.В., Ільїна І.В., Кравець В.Є. Взаємодія між «s-bots» однієї «Swarm-bot» system у фізичному неорганізованому середовищі, Системи управління, навігації та зв'язку, 2023, №1(71). - сс.108-111. Doi: 10.26906/SUNZ.

13. Krivoulya G., Koshevoy N., Tokariiev V., Iliina I., Dubinsky D. Solving the Task of Topological Formation Intelligent Mobile «S-bots» for One «Swarm-bot» System // Proceedings of the 7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems: (COLINS 2023). CEUR Workshop Proceedings., 20-21 april. 2023 y. - Kharkiv, Ukraine. - pp. 273-282.

14. Лебедєв О. Г., Бондар О. В., Самойленко Є. О., Черевко В. Г. Аналіз існуючих підходів до розрахунку кількісної оцінки живучості drones, Системи управління, навігації та зв'язку, 2024, №1(75). - сс.118-121. Doi:10.26906/SUNZ.2024.1.118.