

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

БЕРЕЖНИЙ Андрій Олександрович

УДК 004.896+623.746.2

**МЕТОДИ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ
АВТОМАТИЗОВАНОГО ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТІВ ПОЛЬОТІВ
БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОШУКУ ОБ'ЄКТІВ**

05.13.06 – інформаційні технології

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Черкаси – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті Повітряних Сил імені Івана Кожедуба Міністерство оборони України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Тристан Андрій Вікторович,
Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, начальник науково-дослідного управління наукового центру Повітряних Сил.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кучук Георгій Анатолійович,
Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, м. Харків, професор кафедри обчислювальної техніки та програмування;

доктор технічних наук, доцент
Субач Ігор Юрійович,
Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, м. Київ, завідувач спеціальної кафедри №5.

Захист відбудеться " 18 " вересня 2020 р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 73.052.04 у Черкаському державному технологічному університеті за адресою: 18000, Черкаси, бульвар Шевченка, 460.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Черкаського державного технологічного університету за адресою: 18000, Черкаси, бульвар Шевченка, 460.

Автореферат розісланий « 18 » серпня 2020 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., доцент



Ю.Ю.Бондаренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Науково-технічний прогрес, особливо в області інформаційних технологій, забезпечує швидкий розвиток техніки і розширення її функціональних можливостей. Однак переважна більшість сучасних технічних систем залишаються орієнтованими на людину, як ключову ланку в управлінні цими системами. Виходом з такої ситуації є перехід до застосування систем, у яких негативний вплив людського фактору був би зведений до мінімуму. Такими системами, зокрема, є безпілотні літальні апарати (БПЛА). Вони дозволяють вирішувати різні задачі в умовах, у яких застосування пілотованої авіації недоцільно.

Задача планування маршрутів польотів БПЛА для моніторингу стаціонарних і динамічних об'єктів має свої особливості. Вони, як правило, зумовлені достатньо великою площею пошуку, малими геометричними розмірами об'єктів пошуку та доволі широкою номенклатурою їх класів. Тому необхідна розробка моделей автономного функціонування БПЛА, оперативної зміни мети місії БПЛА в польоті та оптимальних за певними критеріями маршрутів польоту БПЛА. Сучасні БПЛА мають у своєму складі автопілот та потужний бортовий комплекс, які оснащені відповідними інформаційними технологіями. Незважаючи на значну увагу до розвитку безпілотної (роботизованої) авіації як вітчизняними, так і закордонними дослідниками та науковцями, розробка методів автоматизованого планування маршрутів польотів БПЛА є перспективною.

Таким чином, виникає актуальне *науково-технічне завдання* розробки методів та інформаційної технології автоматизованого планування маршрутів польотів БПЛА для підвищення ефективності пошуку об'єктів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи тісно пов'язана із Зведеним річним планом наукової та науково-технічної діяльності Збройних Сил України на 2018-2020 рік, перспективними та річними планами науково-дослідних робіт Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. Базовою для підготовки та подання дисертаційної роботи є науково-дослідна робота шифр "Матриця" (номер ДР 0118U002204), яка виконувалась у Харківському національному університеті Повітряних Сил імені Івана Кожедуба та в якій основні наукові результати дисертаційної роботи використані в повному обсязі.

Мета і завдання дослідження. У відповідності з обраним в роботі об'єктом та предметом, *метою дослідження* є підвищення ефективності пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів безпілотними літальними апаратами.

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити взаємопов'язану сукупність *завдань дослідження*:

1) провести аналіз та формалізацію існуючих методів пошуку і планування маршрутів польоту БПЛА та виконати аналіз методів автоматизації планування маршрутів з обґрунтуванням показників та критеріїв оцінки ефективності пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів;

2) удосконалити методи автоматизованого планування маршрутів польоту

БПЛА для пошуку динамічних об'єктів;

3) удосконалити методи автоматизованого планування маршрутів для пошуку (підтвердження) стаціонарних об'єктів;

4) розробити інформаційну технологію автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів;

5) виконати моделювання та оцінити ефективність розроблених методів.

Об'єкт дослідження: процеси пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів безпілотними літальними апаратами.

Предмет дослідження: методи та інформаційна технологія автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів.

Методи дослідження. Наукові дослідження, виконані в дисертаційній роботі, ґрунтуються на використанні відомих методів наукового пошуку: *системного аналізу* – для виявлення проблемних питань планованого застосування БПЛА для пошуку як динамічних, так і стаціонарних об'єктів; *методи теорії пошуку та переслідування об'єктів* – для визначення моделей пошуку, аналізу існуючих алгоритмів пошуку та переслідування, їх математичних постановок; *методи моделювання* – для формування моделей руху динамічних об'єктів в складній місцевості, формування моделей польоту БПЛА; *методи аналізу складних організаційно-технічних систем, алгебри топологій* – для удосконалення методу пошуку стаціонарних об'єктів на основі прогнозної стійкості складних систем; *теорію графів* – для формалізації завдань пошуку динамічних об'єктів та формалізації структури статичних об'єктів, застосування відомих алгоритмів оптимізації на графах; *теорію прийняття рішень* – для формування раціональних управлінських рішень, обґрунтування маршрутів польоту БПЛА для пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів в системі підтримки прийняття рішень; *моделі та методи штучного інтелекту* – для обґрунтування структури системи підтримки прийняття рішення щодо планування маршрутів польотів БПЛА для пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів; *методи об'єктно-орієнтованого проектування та структурного синтезу інформаційних систем* – для проектування відповідної інформаційної технології у складі СППР; *методи теорії ймовірності* – для побудови математичних моделей руху. При проведенні дисертаційного дослідження автор спирався на фундаментальні роботи в галузі теорії пошуку: Абчука В. А., Кіма Д. П., Черноуської Ф.М., Stone L., Dobbie J., Коорман В. та в галузі розробки моделей і методів інтелектуальних СППР: Міркіна Б. Г., Снитюка В. Є., Мелехова А. М., Герасимова Б. М., Редька В. Г.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку динамічного об'єкту, який, на відміну від існуючих, враховує невизначеність в діях протилежної сторони, формує варіанти прогнозу руху, оцінює динамічні характеристики об'єкту на кожному з варіантів можливих маршрутів його руху, що дозволяє знизити невизначеність інформації про дані маршрути і сформувати раціональний маршрут моніторингу об'єктів спостереження.

2. Удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів, що, на відміну від існуючих, враховує зв'язаність структури стаціонарних об'єктів на різних топологічних рівнях та

дозволяє оцінити важливість даного типу об'єктів в загальній структурі.

3. Отримала подальший розвиток інформаційна технологія автоматизованого планування дій БПЛА, яка, на відміну від існуючих, враховує результати розпізнавання об'єктів, що дозволяє в реальному часі змінювати маршрут польоту при виконанні місії БПЛА.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Реалізація удосконаленого методу автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку динамічного об'єкту в системі підтримки прийняття рішення дозволила підвищити ймовірність виявлення об'єктів в лісостеповій місцевості на 65-70%.

2. Реалізація методу автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів в системі підтримки прийняття рішення дозволяє отримати прогноз розташування стаціонарних об'єктів за критерієм стійкості складної системи, що підвищує ефективність виявлення об'єктів на 25-32%.

3. Реалізація інформаційної технології автоматизованого планування маршрутів польоту БПЛА дозволяє оперативно змінювати маршрут в процесі виконання місії за розпізнаними зображеннями, сформувати архітектуру перспективної інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для планування дій БПЛА.

Результати роботи реалізовані під час навчань, тренувань та при виконанні спеціальних завдань, що підтверджується актами (Акт командира військової частини А4608 від 16.10.2019 №350/76-54/389 пс, Акт командира військової частини А4465 від 05.09.2019).

Особистий внесок здобувача.

У наукових публікаціях за тематикою роботи здобувачу належать такі положення: у статті [1] – розроблені структура, зміст та проведена оцінка ефективності удосконаленого методу автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку динамічного об'єкту; у статті [2] – розроблений зміст удосконаленого методу автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів; у статті [3] – розроблена структура інформаційної технології автоматизованого планування маршрутів польоту БПЛА, що є складовою технології виявлення та ідентифікації стаціонарних об'єктів безпілотними літальними апаратами; у статті [4] – розроблені моделі руху динамічних об'єктів в різній місцевості, що дозволило сформувати метод планування маршруту БПЛА для пошуку динамічних об'єктів; у статті [5] – розкриті вимоги до комплексу завдань планування СППР; у статті [6] – розкриті підходи до планування на основі застосування мультиагентного підходу.

Апробації матеріалів дисертації. Матеріали та результати дисертаційного дослідження обговорювалися та ухвалені на XIII науковій конференції Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба “Новітні технології для захисту повітряного простору” 12-13 квітня 2017, м. Харків [7]; науково-технічній конференції “Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах” Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки 6-7 вересня 2018, м. Чернігів [8]; науково-практичній конференції “Актуальні питання забезпечення службово-

бойової діяльності військових формувань та правоохоронних органів” Національної академії Національної Гвардії України 31 жовтня 2018, м. Харків [9]; сьомій міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми інформатизації” 13-15 листопада 2019, м. Черкаси [10].

Публікації. Основні наукові результати за темою дисертаційної роботи опубліковано у шести наукових статтях, в наукових фахових виданнях, що індексуються міжнародними бібліометричними та наукометричними базами даних: Scientific Indexed Service, Index Copernicus, Academic Resource Index, Google Scholar, Open Academic Journals Index, General Impact Factor), звіті про НДР, 4 тезах доповідей на конференціях.

Структура і об’єм роботи. Дисертація містить вступ, п’ять розділів, висновки, список використаних джерел, чотири додатки. Повний обсяг дисертації складає 190 сторінок, у тому числі 134 сторінок основного тексту, 6 сторінок рисунків і таблиць, 13 сторінок списку використаних джерел у кількості 126 найменувань, 21 сторінка додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведені відомості щодо актуальності теми дослідження, зв’язку роботи з науковими програмами, планами й темами, мети, задач, об’єкту, предмету та методів досліджень. Також викладені наукові результати, відомості щодо їх новизни й практичної значущості та впровадження, особистого внеску здобувача, публікацій і апробацій.

У **першому розділі** "Аналіз завдань планування моніторингу стаціонарних та рухомих об’єктів безпілотними літальними апаратами" проводиться аналіз сучасного стану та можливостей безпілотної авіації, здійснюється класифікація завдань моніторингу стану об’єктів та виокремлюються завдання планування пошуку об’єктів. Приводиться перелік існуючих моделей та методів планування, способів побудови маршрутів, обґрунтовується необхідність застосування сучасних інформаційних технологій для рішення завдань автоматизованого планування, моделей формалізації завдань планування руху безпілотних літальних апаратів.

У **другому розділі** "Обґрунтування схеми проведення дисертаційного дослідження та методики вирішення наукового завдання" вводяться показники та критерії оцінювання ефективності розроблених та удосконалених методів планування маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів, проводиться обґрунтування обраних методів проведення дослідження для вирішення наукового завдання. Наводиться характеристика обчислювальних моделей, розроблених для отримання результатів моделювання. Формується та наводиться схема дослідження, вводяться допущення та обмеження щодо роботи. Основним результатом, отриманим в даному розділі, є сукупність показників та критеріїв оцінювання ефективності планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для пошуку динамічних та стаціонарних об’єктів та схема проведення дослідження (рис. 1), що наведено в подальших розділах для досягнення мети роботи.

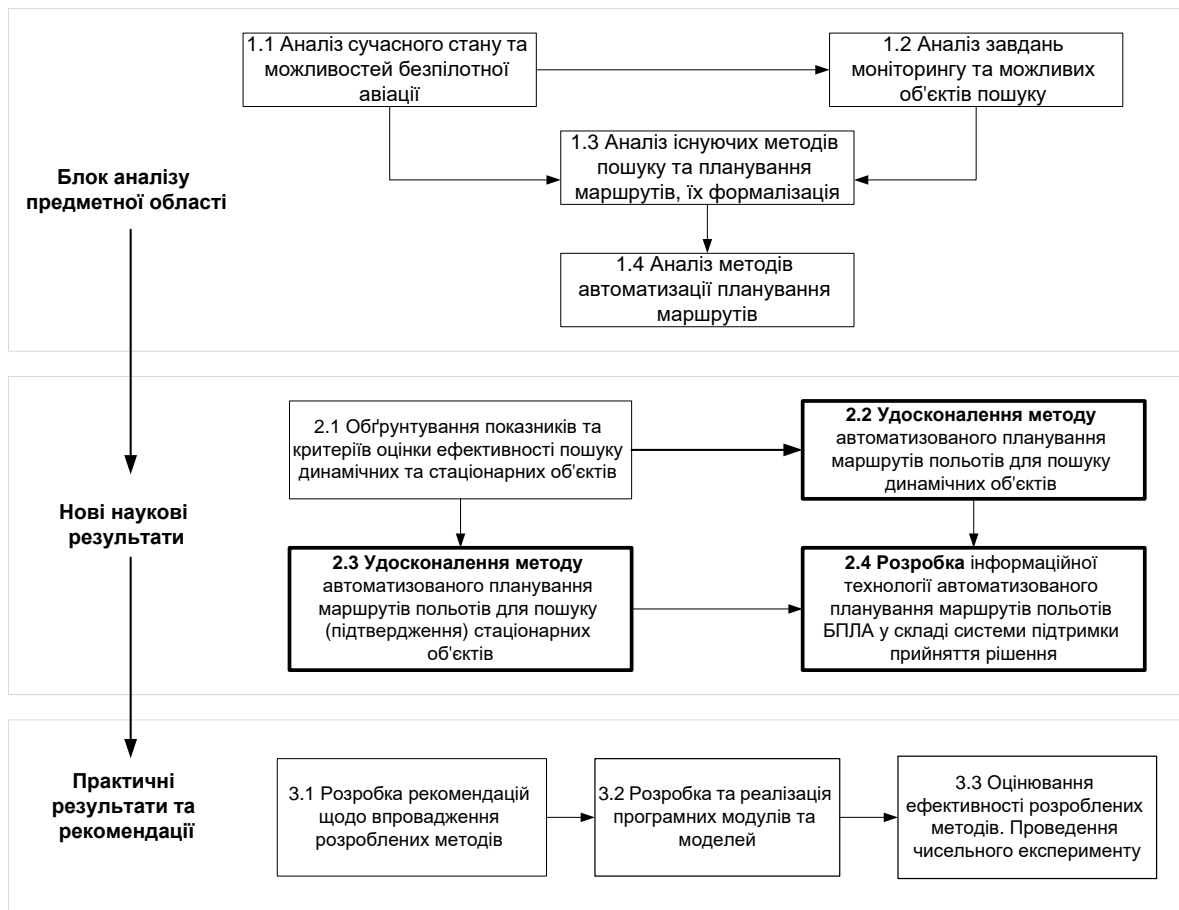


Рисунок 1 – Схема проведення дисертаційного дослідження

Для проведення дослідження та чисельного експерименту його результатів було використано та розроблено наступну сукупність програмних модулів, пов'язаних у єдину систему (рис. 2).

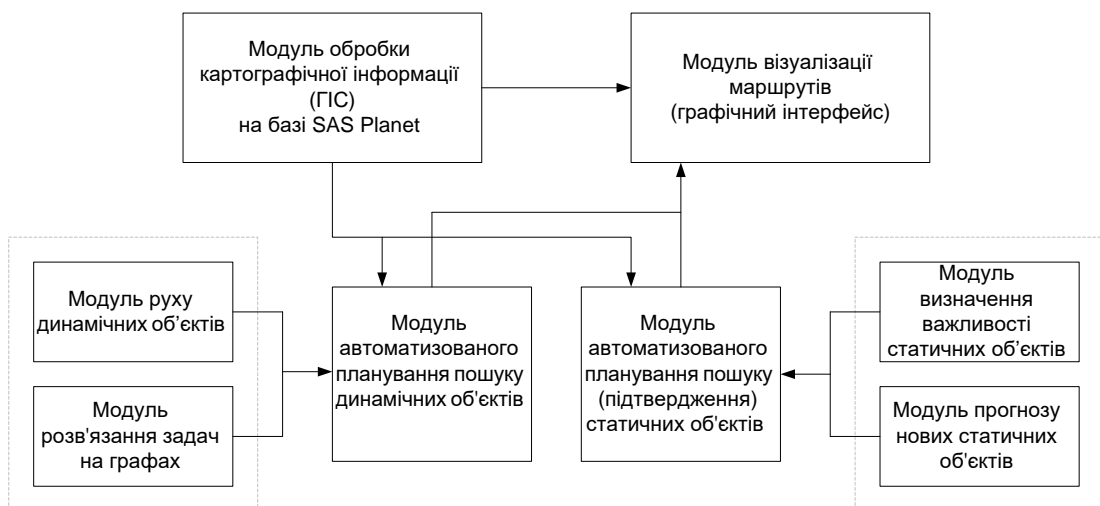


Рисунок 2 – Сукупність програмних модулів використаних при проведенні дослідження

У третьому розділі "Розробка методів автоматизованого планування маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів" розробляються (удосконалюються) наукові методи, які містять зміст нових наукових результатів. В умовах невизначеності інформація про можливі дії динамічних об'єктів та

ймовірнісні оцінки отримання позитивних результатів виявлення цих об'єктів із застосуванням БПЛА близькі до нуля. Існуючі методи обґрунтування маршрутів і виявлення динамічних об'єктів за допомогою БПЛА у лісостеповій місцевості не відповідають методам прогнозу їх дій. Тому в умовах апріорної невизначеності дій динамічного об'єкту пошук не забезпечує їх своєчасного виявлення і розпізнавання. Для усунення даної невідповідності в роботі удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку динамічного об'єкту. Метод враховує невизначеність в діях протилежної сторони, формує варіанти прогнозу руху, оцінює вразливість динамічного об'єкту на кожному з можливих маршрутів цього руху. Це дозволяє знизити невизначеність інформації про дані маршрути і сформулювати раціональний маршрут моніторингу об'єктів спостереження.

Для пошуку динамічних об'єктів у загальному випадку задача зводиться до опису методами теорії графів структури плану дій динамічних об'єктів та вибір маршрутів руху до об'єктів впливу. Нехай в районі пошуку існують I лісистих ділянок, в яких динамічний об'єкт не може бути виявлений засобами БПЛА. Кожна лісиста ділянка має геометричні розміри, в межах яких обирається довжина маршруту L_{1i} , де $i \in [1...I]$. Також існує J відкритих ділянок між ними, кожна з яких має геометричні розміри, в межах яких обирається довжина маршруту руху відкритою ділянкою L_{2i} , де $i \in [1...J]$.

В районі пошуку визначено N можливих об'єктів впливу з боку динамічних об'єктів (для терористичних груп – це можуть бути об'єкти економіко-соціальної інфраструктури, військові об'єкти; для правопорушників – переходи через ділянки кордонів, місця доступності врізування до трубопроводів тощо).

Ймовірність знаходження динамічного об'єкту на i -ій лісистій ділянці складає p_i^0 , $i \in [1...I]$, ймовірність того, що динамічний об'єкт діє за n -м об'єктом впливу – p_n^1 , $n \in [1...N]$. Прийmemo множину лісистих ділянок I за вершини орієнтованого графа, які можуть мати як вхідні, так і вихідні ребра (назвемо їх - вершини першого типу). Вершинами другого типу є множина об'єктів впливу N . Множина відкритих ділянок між лісистими ділянками формує ребра орієнтованого графа. Одну і ту ж саму відкриту ділянку не може поєднувати декілька пар вершин.

На першому етапі будується незважений граф, кількість вершин якого (потужність множини вершин V) визначається виразом: $V = I + N$. Кількість ребер побудованого графу (потужність множини ребер B) відповідає припущенню: з ліистої ділянки до об'єкту впливу є лише один шлях. Задача визначення ваг ребер графа пов'язана з показниками ефективності дій динамічних об'єктів. Один з них – це час виходу на n -ий об'єкт впливу з i -ої маскувальної області, тоді ваги ребер графа відповідають відстані між маскувальними областями та об'єктами впливу. Другим показником доцільно обрати кількість відкритих ділянок на маршруті проходження динамічного об'єкту. Чим менше відкритих ділянок на маршруті руху, тим менше ймовірність виявлення динамічного об'єкту (при цьому ваги ребер графа приймаються рівними 1).

Визначення ваг ребер графа вихідної обстановки в районі пошуку дозволяє, застосувавши відомі методи розв'язання задач на графах, одержати множину

можливих варіантів дій динамічного об'єкту.

Розв'язання даної задачі зводиться до знаходження мінімального шляху з вихідної вершини в усі кінцеві. При цьому вихідні вершини відповідають лісистим ділянкам, а кінцеві – об'єктам впливу.

Дана задача розв'язана з використанням алгоритму Дейкстри. Ітераційно повторюючи алгоритм для кожної початкової вершини (ліистої ділянки), можна одержати найкоротші маршрути з кожної ділянки до об'єкта впливу, що зручно представити у вигляді матриці Q :

$$Q = \begin{array}{c|ccc} & 1 & \dots & I \\ \hline 1 & q_{11} & \dots & q_{1I} \\ \dots & \dots & q_{in} & \dots \\ N & q_{1N} & \dots & q_{IN} \end{array}, \quad (1)$$

де q_{in} – вектор, який має вигляд:

$$q_{in} = \{L_{in}, T_{in}, N_{in}, T_{in}^{entry}, T_{in}^{exit}\}, \quad (2)$$

де L_{in} - відстань між i -ою ліистою ділянкою та n - м об'єктом впливу; T_{in} - час руху динамічного об'єкту між i -ою ліистою ділянкою та n - им об'єктом впливу; $N_{in} = \langle l_{ij} \rangle$, $N_{in} \subseteq L(\Pi)$, $j = [1, J]$ – множина ребер (відкритих ділянок) на маршруті руху динамічного об'єкту до об'єкту впливу; $T_{in}^{entry}(l_{ij}) = \langle t_j^{entry} \rangle$ – множина значень часу входу на відкриті ділянки динамічного об'єкту; $T_{in}^{exit}(l_{ij}) = \langle t_j^{exit} \rangle$ – множина значень часу виходу динамічного об'єкту з відкритих ділянок.

Матриця (1) являє собою сукупність раціональних маршрутів руху динамічного об'єкту з вихідної точки до кожного можливого об'єкту впливу.

З цієї матриці для подальших розрахунків приймається множина всіх відкритих ділянок на маршрутах руху динамічних об'єктів до всіх об'єктів впливу.

Таким чином, відібравши за критерієм мінімізації часу знаходження на відкритих ділянках динамічного об'єкту сімейство раціональних варіантів маршрутів руху динамічного об'єкту до об'єктів впливу, можна скласти множину відкритих ділянок місцевості (Q_{TG}), на яких доцільно вести пошук динамічних об'єктів.

Алгоритм планування пошуку за допомогою БПЛА доцільно виконувати в два етапи:

а) побудова множини можливих маршрутів ведення моніторингу з необхідною умовою обльоту всіх відкритих ділянок саме у час перебування динамічного об'єкту на відкритих ділянках;

б) вибір одного з раціональних маршрутів польоту БПЛА з максимальним показником ефективності виявлення об'єкту.

Складена множина відкритих ділянок місцевості описується графом $G = (Q, E)$, де $Q \subset Q_{TG}$ – множина вершин графа, що відповідає множині можливих

відкритих ділянок місцевості на маршрутах руху динамічних об'єктів, а E – множина дуг графа, що описуються відстанню між ділянками і часом прольоту БПЛА між ними.

Суть сортування матриці полягає у розстановці її елементів матриці в рядках і стовпцях у певному порядку. Згідно з ним, зростання номерів рядків і стовпців матриці відповідає збільшенню часу виходу динамічного об'єкту на середину кожної ділянки. Після цього формально можна стверджувати, що в рядках уже побудовані можливі варіанти польоту БПЛА.

При цьому утвориться (таблиця 1) матриця досяжності можливих маршрутів польоту БПЛА, в якій поки не враховуються умови часового узгодження подій “прильоту БПЛА і приходу динамічного об'єкту”. Отже, просторові параметри між ділянками пошуку (вершинами графа) створюють різні умови ведення моніторингу (не завжди БПЛА над ділянкою знаходиться саме в той час, коли на неї передбачається вихід динамічного об'єкту). Тому для оцінки ступеня збігу цих подій відповідно до алгоритму проводиться аналіз усіх рядків і стовпців даної матриці.

Таблиця 1 – Результат сортування матриці маршрутів польоту безпілотного літального апарату

	1	2	...	n	...	N	$\Delta P_{разв\ s}$
1	0	ΔP_{12}	...	ΔP_{1n}	...	ΔP_{1N}	ΔP_1
2	<0	0	...	ΔP_{2n}	...	ΔP_{2N}	ΔP_2
...	<0	<0	0	ΔP_{3n}	...	ΔP_{3N}	ΔP_3
n	<0	<0	<0	0	...	ΔP_{nN}	ΔP_n
...	<0	<0	<0	<0	0
N	<0	<0	<0	<0	<0	0	0

Елементами матриці є вектор, який містить часові показники:

$$\begin{aligned} \Delta t_{(n-1)n} &= m_{t_n} - m_{t_{(n-1)}} > 0; \\ \Delta t_{n(n-1)} &= m_{t_{(n-1)}} - m_{t_n} < 0; \end{aligned} \quad (3)$$

де m_{t_i} – математичне сподівання часу проходження i -ої ділянки.

Частина елементів матриці (затемнена частина таблиці 1) має негативні значення різниці очікуваного часу виходу динамічного об'єкту на середину розглянутих ділянок (через принцип сортування) і тому з аналізу виключається.

Друга симетрична частина матриці включає елементи з позитивними параметрами, які можна використовувати при плануванні маршруту пошуку динамічного об'єкту. При цьому перевіряється умова:

$$t_{mn}^{\min} - \sigma_{t_n} \leq m_{t_n} - m_{t_m} \leq t_{mn}^{\max} + \sigma_{t_m}. \quad (4)$$

Умова (4) дозволяє оцінити відповідність характеристик БПЛА і вимог щодо прибуття динамічного об'єкту в середину наступної обраної ділянки. В міру віддалення від першої ділянки умова (4) буде менш критичною через збільшення дисперсії. Тому більш важливими для аналізу є початкові ділянки ведення пошуку.

Якщо наступна ділянка в матриці (1) відповідає умові (4), то вона

включається до складу маршруту польоту БПЛА. Для нього розраховуються необхідні швидкість і час польоту з таким розрахунком, щоб приліт БПЛА і вихід динамічного об'єкту на середину ділянки були синхронізовані у часі.

Ймовірність виявлення динамічного об'єкту на даній ділянці ΔP_{recon_n} можна знайти з використанням відомої формули теорії ймовірностей для нормального закону розподілу:

$$\Delta P_{recon_n} = \left| F \left(\frac{t_{enter_n} - m_{t_n}}{\sigma_{t_n}} \right) - F \left(\frac{t_{depart_n} - m_{t_n}}{\sigma_{t_n}} \right) \right|. \quad (5)$$

При досягненні кінця рядка матриці сформований маршрут включається до множини можливих маршрутів пошуку.

Для формування інших маршрутів пошуку необхідно починати моніторинг не з першої, а з наступної ділянки. Для цього аналізується комплектування маршруту пошуку ділянками за іншими рядками матриці (табл. 1). Аналіз усіх можливих маршрутів пошуку закінчується після перегляду всіх рядків і стовпців матриці.

Удосконалений метод автоматизованого планування раціонального маршруту польоту БПЛА для ведення пошуку динамічного об'єкту допускає формалізацію процесів прийняття рішення і враховує показники і критерії ефективності ведення пошуку (рис. 3).

Метою пошуку статичних об'єктів може бути:

- 1) підтвердження відомих статичних об'єктів та їх характеристик (завдання моніторингу);
- 2) пошук нових (невідомих) статичних об'єктів, виходячи з гіпотези стійкості системи, яка досліджується (завдання виявлення).

В обох випадках точки маршруту будуть мати вагу w_i . При цьому вважається, що ефективність маршруту є сумою ваги включених до нього точок. Величина ефекту від включення конкретної точки до маршруту польоту вважається відомою.

Кожній точці, яка може бути включена до маршруту польоту, призначений унікальний номер від 1 до n . Множину шуканих змінних визначимо як X . Елементами цієї множини є цілочисельні булеві змінні $x_{ij} \in \{0;1\}$, $(i, j = \overline{1, n}, i \neq j)$. Змінна x_{ij} має значення 1, якщо точка з номером j є в маршруті наступною за точкою з номером i , в іншому випадку $x_{ij} = 0$.

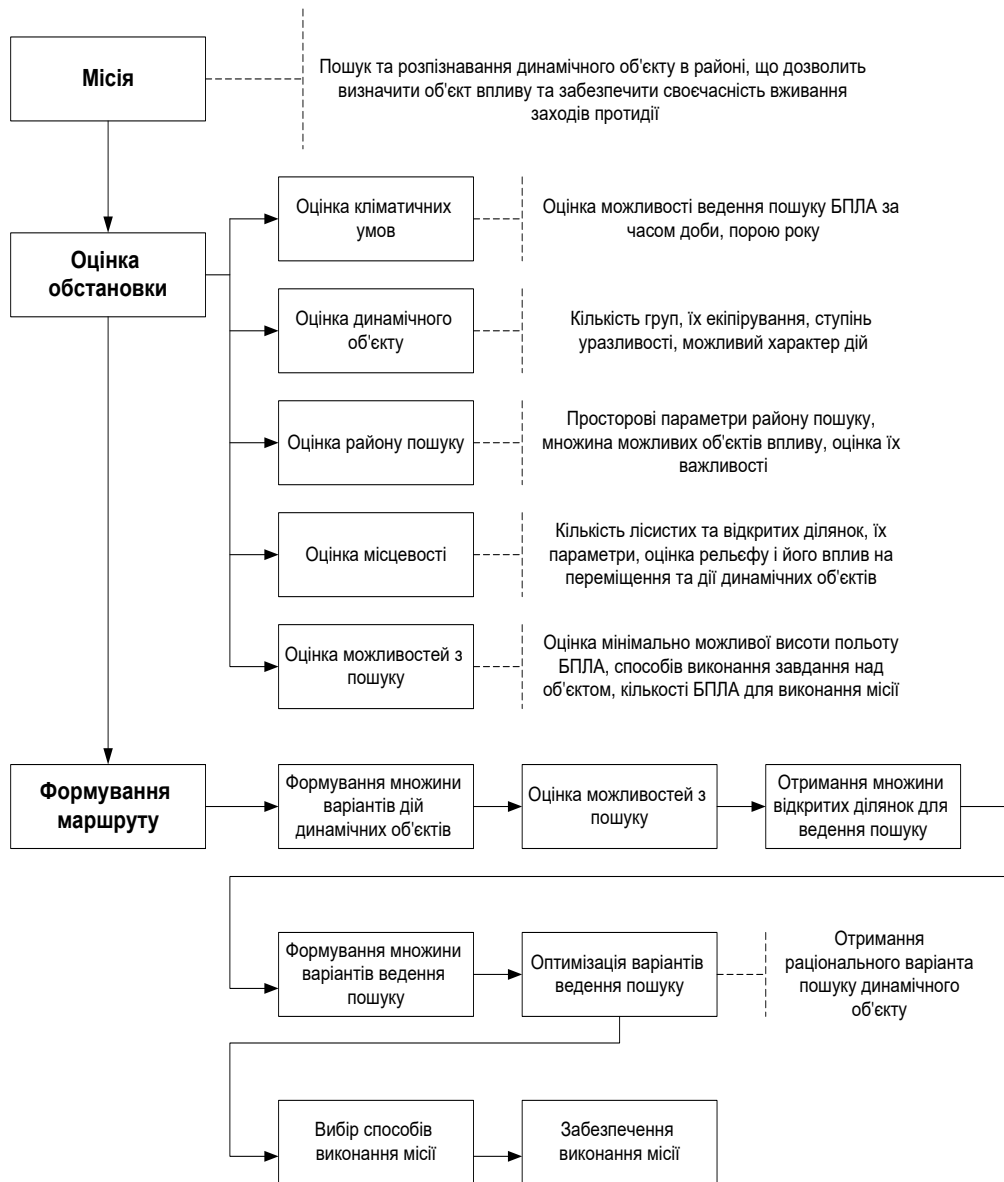


Рисунок 3 – Загальна схема застосування методу автоматизованого планування маршруту польоту безпілотної літальної апарату для пошуку динамічного об'єкту

Шляхом заборони окремих сполучень індексів змінних з розгляду виключаються елементи маршруту, які є забороненими.

Критерій ефективності планування маршруту польоту безпілотної літальної апарату для пошуку статичних об'єктів запишемо у вигляді:

$$W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_j x_{ij} \rightarrow \max, \quad (6)$$

при обмеженнях:

– на максимальну тривалість польоту:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \leq T_{\max}, \quad (7)$$

де T_{\max} – максимальний час польоту за маршрутом з урахуванням характеристик

БПЛА; t_{ij} – мінімальний час перельоту між точками i та j з урахуванням метеорологічних умов.

– на включення кожної точки маршруту не більше одного разу:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \leq 1; \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1; \quad (8)$$

– на включення точки старту до маршруту:

$$\sum_{i=1}^n x_{sj} = 1; \quad (9)$$

– на замкненість маршруту (відсутність підциклів на графі):

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1}^n x_{ij} = 0. \quad (10)$$

Вихідні дані, що використовуються для планування маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів, поділяються на інформацію про цільову ситуацію і дані про характеристики БПЛА (рис. 4). Цільова ситуація задається за допомогою інформації про місце розташування. Результати рішення задачі маршрутизації являють собою послідовність обльоту всіх або частини точок для максимізації функції вигляду (6).

Таким чином, удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА повинен включати методи визначення пріоритетності точок, розрахунку координат прогнозних точок та спиратися на відомі методи побудови маршрутів (евристичні методи оптимізації, метод булевої оптимізації, метод динамічного програмування).

Для визначення важливості стаціонарного об'єкту в складній системі об'єктів пошуку використаємо такі показники:

- а) час останнього підтвердження (t_p);
- б) важливість об'єкту в системі (e);
- в) тип об'єкту (“підтверджений”, “прогнозний”).

Показник часу останнього підтвердження перетворимо до нормованого вигляду k_t за допомогою формули:

$$k_t = 1 - e^{-t_p/T}, \quad (11)$$

де T – необхідний час підтвердження стану стаціонарного об'єкту.

Для “прогнозного” об'єкту даний коефіцієнт приймається рівним одиниці. Важливість стаціонарного об'єкту в системі визначається коефіцієнтом ексцентриситету k_e , що обчислюється за формулою:

$$k_e = 1 - \frac{\text{card}(s^k) - \text{card}(v^k)}{(n_k + 1) \times \text{card}(s^k)}, \quad (12)$$

де n_k – кількість симплексів в комплексі, що мають $\text{card}(v^k)$ загальних вершин з симплексом s^k .

При цьому $\text{card}(v^k) = \max_j \left[\text{card}(s_i^k \cap s_j^k) \right]$ – максимальна кількість

загальних вершин k -го симплексу з іншими симплексами, k та j – порядкові номери симплексів, призначені при початковому визначенні множин $k \neq j$.

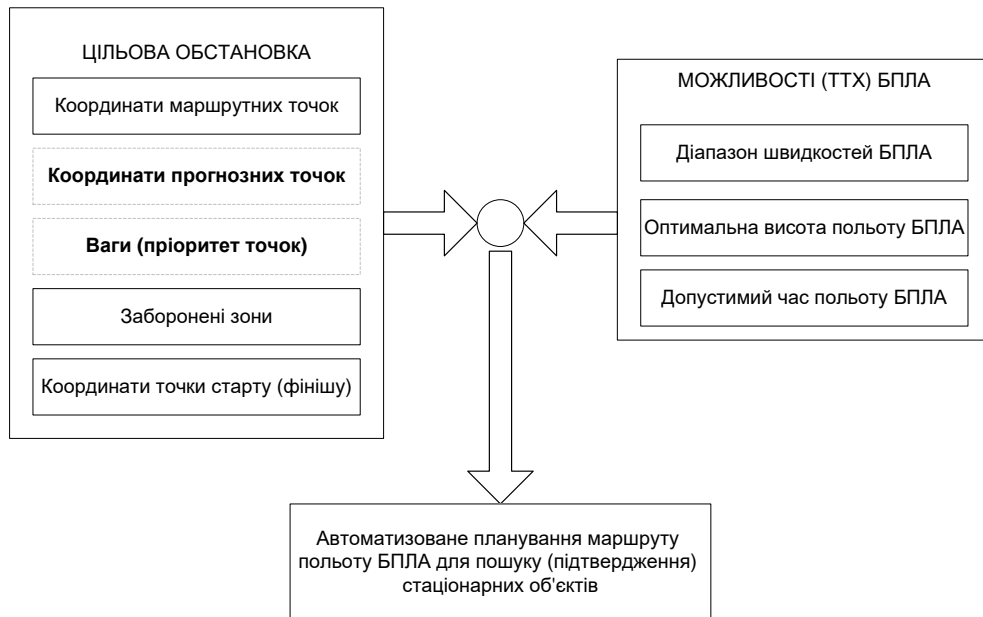


Рисунок 4 – Дані для автоматизованого планування маршруту польоту безпілотної літальної апарату для пошуку (підтвердження) стаціонарних об'єктів

Для “прогнозного” об'єкту даний коефіцієнт також приймається рівним одиниці.

Коефіцієнт типу об'єкту (“підтверджений”, “прогнозний”) k_o приймає значення: 0,5 – для підтверженого об'єкту, 1 – для прогнозного значення.

Адитивна згортка даних коефіцієнтів для визначення важливості i -го стаціонарного об'єкта задається формулою:

$$w_i = a_1 \cdot k_{t_i} + a_2 \cdot k_{e_i} + a_3 \cdot k_{o_i} . \quad (13)$$

Значення вагових коефіцієнтів задовольняє умові $a_1 + a_2 + a_3 = 1$. Вибір вагових коефіцієнтів здійснюється користувачем систем підтримки прийняття рішення (СППР) один раз для всієї складної системи стаціонарних об'єктів пошуку. З урахуванням того, що коефіцієнти k_t , k_e та k_o є нормованими, значення ваги стаціонарного об'єкту належить інтервалу $[0;1]$.

Таким чином, отримання вагових коефіцієнтів стаціонарних об'єктів дає змогу поставити та вирішити із застосуванням інформаційної технології (ІТ) у складі СППР розширену оптимізаційну задачу комбінаторної оптимізації виду (6) з обмеженнями (7)–(10).

В четвертому розділі “Інформаційна технологія автоматизованого планування дій безпілотної літальної апарату” розробляється інформаційна технологія автоматизованого планування дій безпілотної літальної апарату під час виконання ними місії, що ґрунтується на об'єктно-орієнтованому методі проектування. Вона використовує знанняорієнтовані методи розпізнавання образів (знімків) та їх інтелектуальний аналіз, що дозволяє підвищити оперативність та обґрунтованість рішень.

Взаємозв'язок інформаційних технологій в єдину знанняорієнтовану систему наведено на рис. 5.



Рисунок 5 – Загальна структура знанняорієнтованої системи планування дій безпілотних літальних апаратів

Інформаційна технологія автоматизованого планування дій БПЛА розроблена в вигляді IDEF0-діаграм (рис. 6).

Вхідні інформаційні потоки:

- задача (місія) пошуку (підтвердження) об'єктів;
- тип БПЛА, що обраний для виконання місії.

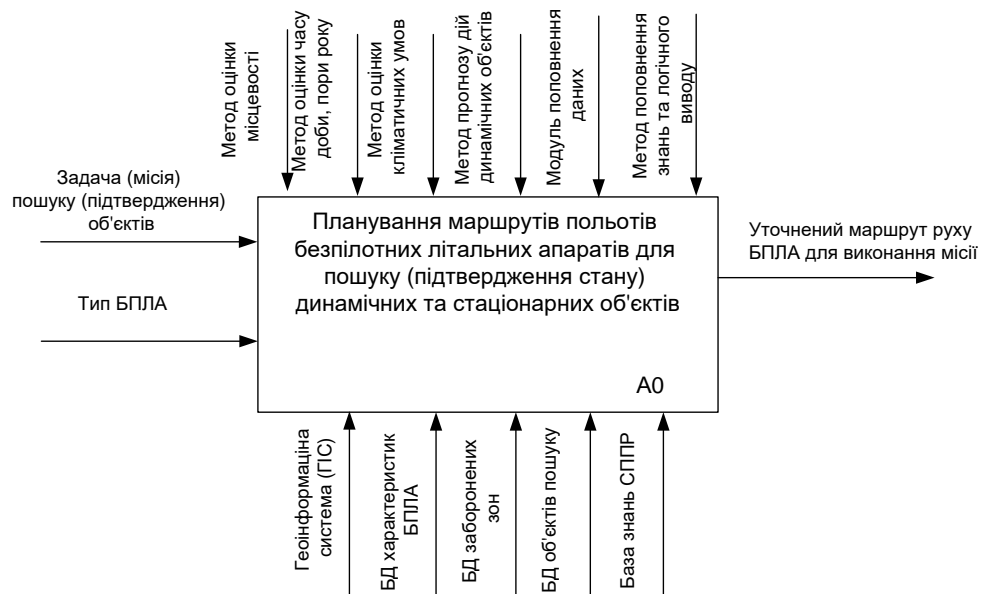


Рисунок 6 – Діаграма IDEF0 основного процесу інформаційної технології

Вихідний інформаційний потік: уточнений маршрут БПЛА для виконання місії у вигляді просторово-часового графіка.

В п'ятому розділі “Розробка рекомендацій щодо побудови системи підтримки прийняття рішення та оцінка ефективності розроблених методів” на підґрунті розроблених методів планування маршрутів польотів БПЛА розроблені рекомендації щодо впровадження їх до системи підтримки прийняття рішення.

Обґрунтовується структура даної системи, комплекс задач, які повинні входити до даної системи. Оцінюється ефективність розроблених методів, виконані розрахунки чисельного експерименту, доведена перевага методів над існуючими.

Результати чисельного експерименту дозволяють зробити висновок про збільшення ймовірності до 0,75-0,90 за умови застосування сучасних інформаційних технологій та методу планування маршрутів БПЛА для пошуку динамічних об'єктів (рис. 7), що свідчить про ефективність розробленого методу.

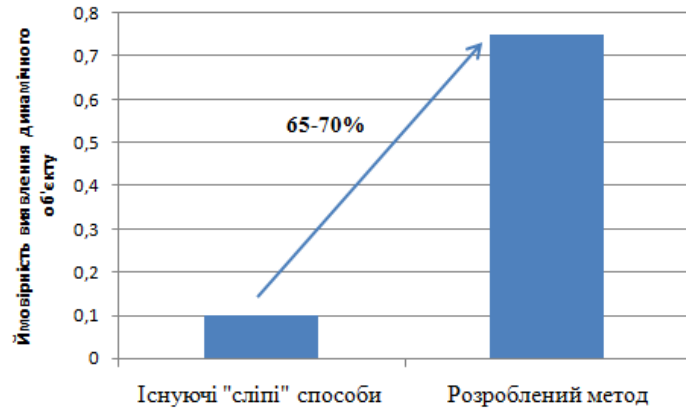


Рисунок 7 – Приріст ймовірності виявлення динамічного об'єкту з використанням розробленого методу

Порівняння результатів моделювання пошуку оптимального маршруту на графі (з використанням генетичного алгоритму) за заданими обмеженнями польоту при зважених вершинах та незважених приведено на рисунку 8.

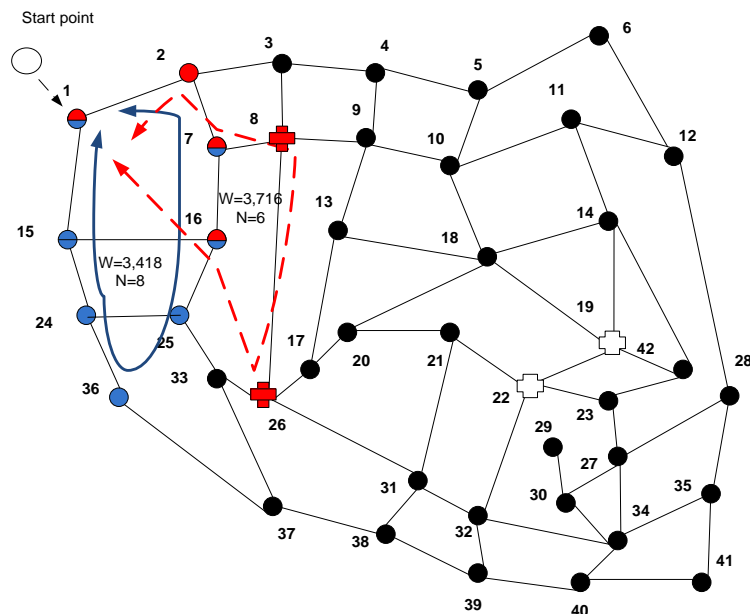


Рисунок 8 – Моделювання маршрутів

Незважаючи на більшу кількість точок маршруту при незважених вершинах ($N=8$) проти $N=6$ при зважених вершинах, вага виявлених об'єктів для другого маршруту вища.

Зважування вершин дозволяє не тільки оптимізувати маршрут за критерієм

(б), але і знайти оптимальні точки старту маршруту, а також обґрунтувати доцільність групового застосування БПЛА для пошуку (підтвердження стану) стаціонарних об'єктів.

Приріст ваги виявлених об'єктів для системи статичних об'єктів для двох методів представлено на рис. 9.

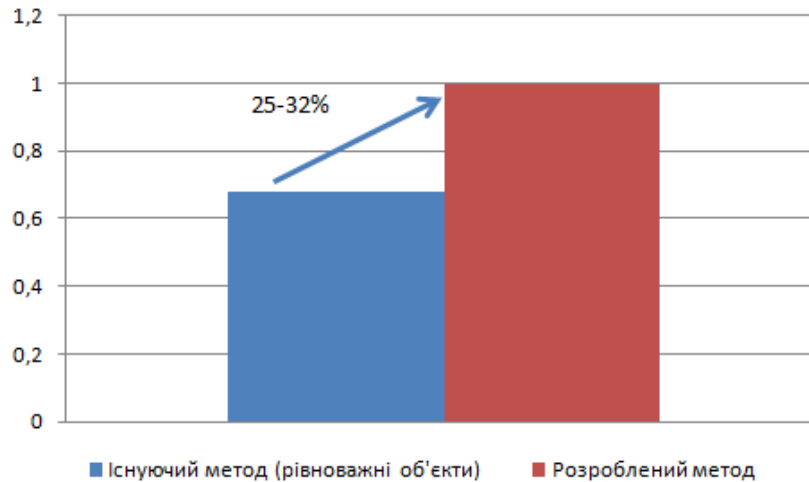


Рисунок 9 – Приріст ваги виявлених стаціонарних об'єктів з використанням розробленого методу

Таким чином, оцінена ефективність методу автоматизованого планування маршрутів польотів БПЛА для пошуку динамічних об'єктів, що дозволило підвищити ефективність виявлення таких типів об'єктів на 65-70% порівняно з існуючими способами “сліпого” пошуку (за результатами чисельного експерименту). Оцінена ефективність методу автоматизованого планування маршрутів БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів за показником ваги виявлених (підтверджених) об'єктів, що дозволило підвищити ефективність пошуку на 25-32% (за результатами моделювання).

ВИСНОВКИ

У результаті дисертаційних досліджень, виконаних автором, вирішено актуальне науково-технічне завдання розробки методів та інформаційної технології автоматизованого планування маршрутів польотів БПЛА для підвищення ефективності пошуку об'єктів.

У дисертації одержані такі основні результати:

1. Удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку динамічного об'єкту, який, на відміну від існуючих, враховує невизначеність в діях протилежної сторони, формує варіанти прогнозу руху, оцінює вразливість динамічного об'єкту на кожному з варіантів можливих маршрутів цього руху, що дозволяє знизити невизначеність інформації про дані маршрути і сформулювати раціональний маршрут моніторингу об'єктів спостереження.

2. Удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів, що, на відміну від існуючих, враховує

зв'язаність структури стаціонарних об'єктів на різних топологічних рівнях та дозволяє оцінити важливість даного типу об'єктів в загальній структурі.

3. Отримала подальший розвиток інформаційна технологія автоматизованого планування дій БПЛА, яка, на відміну від існуючих, враховує результати розпізнавання об'єктів, що дозволяє в реальному часі змінювати маршрут польоту при виконанні місії БПЛА.

4. Вдосконалені методи та інформаційна технологія мають якісно нові властивості і дозволяють вирішити поставлене науково-технічне завдання.

5. Достовірність результатів досліджень, сформульованих в дисертаційній роботі, підтверджуються експериментальними дослідженнями, які досить близькі з результатами теоретичних досліджень. Обґрунтованість отриманих результатів досліджень забезпечується коректним використанням математичного апарату, аналізом умов та факторів, які впливають на процес планування дій БПЛА, сучасним станом безпілотної авіації, ретельним аналізом результатів основних теоретичних досліджень як вітчизняних, так і закордонних авторів. Основні наукові результати мають чітке практичне застосування, що підтверджується актами.

6. Реалізація удосконаленого методу автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку динамічного об'єкту в системі підтримки прийняття рішення дозволила підвищити ймовірність виявлення об'єктів в лісостеповій місцевості на 65-70%.

7. Реалізація методу автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів в системі підтримки прийняття рішення дозволяє отримати прогноз розташування стаціонарних об'єктів за критерієм стійкості складної системи, обґрунтувати вагу об'єктів та провести оптимізацію, що підвищує вагу виявлених об'єктів на 25-32%.

8. Реалізація інформаційної технології автоматизованого планування дій БПЛА дозволяє оперативно змінювати маршрут в процесі виконання місії за розпізнаними зображеннями, сформувати архітектуру перспективної інтелектуальної СППР для планування застосування БПЛА.

9. Результати проведених досліджень доцільно використовувати для рішення науково-практичних задач планування маршрутів польоту БПЛА для пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів, розвитку систем підтримки прийняття рішення та автоматизованих систем управління авіацією.

10. Напрямами подальших досліджень є розробка моделей та методів інтелектуального управління колективами БПЛА.

Отже, сукупність одержаних у дисертації наукових результатів, позитивна оцінка їх достовірності, наукової та практичної значущості дозволяють вважати сформульоване науково-технічне завдання *вирішеним*, а поставлену мету, яка полягала у підвищенні ефективності пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів безпілотними літальними апаратами – *досягнутою*.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Бережний А.О.**, Крижанівський І.М., Барабаш О.В. Метод автоматизованого планування маршрутів безпілотних літальних апаратів з урахуванням виявлення стаціонарних об'єктів. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. Київ, 2019. Вип. 4(65). С. 90–98. DOI:10.31673/2412-4338.2019.049098.
2. **Berezhnyi A.**, Trystan A., Lavrov O. Information technology of automatic detection and identification of stationary objects with unmanned aerial vehicles. *Сучасні інформаційні системи*. Харків, 2020. Том 4, № 1. С. 5–10. DOI:10.20998/2522-9052.2020.
3. **Бережний А.О.**, Калачова В.В., Рожков М.І. Моделювання руху динамічних об'єктів в системі підтримки прийняття рішень планування маршрутів безпілотних літальних апаратів. *Системи обробки інформації*. Харків, 2019. Вип. 4(159). С. 44–49. DOI:10.30748/soi.2019.159.05.
4. **Бережний А.О.**, Крижанівський І.М.. Комплекс задач системи підтримки прийняття рішення на планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. Полтава, 2020. Вип. 1(59). С. 3–6. DOI:10.26906/SUNZ.2020.1.003.
5. **Бережний А.О.**, Сорока М.Ю., Сало Н.А. Методи рішення завдань планування поведінки агентів в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. Харків, 2019. Вип. 4(62). С. 18–24. DOI:10.30748/zhups.2019.62.02.
6. Тристан А.В., **Бережний А.О.** Метод автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку динамічного об'єкту. *Вісник інженерної академії України*. Київ, 2019. Вип. 4 (34). С. 67–72.
7. Гєнов Б.А., **Бережний А.О.** Проблемні питання та можливі напрямки підвищення ефективності організації міжвидової взаємодії під час виконання завдань за призначенням. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : зб. тез доп. XIII міжнар. наук. конф., м. Харків, 12-13 квіт. 2017 р. Харків, 2017. С. 27.
8. Тристан А.В., **Бережний А.О.**, Аркушенко П.Л. Сценарний аналіз в пошуку доцільних варіантів організації та здійснення взаємодії. *Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах* : зб. тез доп. XVIII наук.-тех. конф., м. Чернігів, 6-7 вер. 2018 р. Чернігів, 2018. С. 283.
9. Тристан А.В., **Бережний А.О.** Метод сценарного прогнозування та моделювання при обґрунтуванні доцільних варіантів проведення операції. *Актуальні питання забезпечення службово-бойової діяльності військових формувань та правоохоронних органів* : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Харків, 31 жовт. 2018 р. Харків, 2018. С. 164.
10. Тристан А.В., **Бережний А.О.**, Крижанівський І.М. Математичні моделі та методи планування повітряної розвідки рухомих й стаціонарних об'єктів з застосуванням безпілотних літальних апаратів. *Проблеми інформатизації* : тези доп. 7-ї міжнар. наук.-техн. конф., м. Черкаси, м. Харків, м. Баку, м. Бельсько-Бяла [у 3 т.], 13-15 лист. 2019. Черкаси – Харків – Баку – Бельсько-Бяла, 2019. Т. 3. С.41.

Анотація

Бережний А.О. Методи та інформаційна технологія автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для підвищення ефективності пошуку об'єктів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, 2020, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, 2020.

У дисертації одержані такі основні результати:

1. Удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку динамічного об'єкту, який, на відміну від існуючих, враховує невизначеність в діях протилежної сторони, формує варіанти прогнозу руху, оцінює вразливість динамічного об'єкту на кожному з варіантів можливих маршрутів цього руху, що дозволяє знизити невизначеність інформації про дані маршрути і сформуванати раціональний маршрут моніторингу об'єктів спостереження.

2. Удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів, що, на відміну від існуючих, враховує зв'язаність структури стаціонарних об'єктів на різних топологічних рівнях та дозволяє оцінити важливість даного типу об'єктів в загальній структурі.

3. Отримала подальший розвиток інформаційна технологія автоматизованого планування дій БПЛА, яка, на відміну від існуючих, враховує результати розпізнавання об'єктів, що дозволяє в реальному часі змінювати маршрут польоту при виконанні місії БПЛА.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, динамічні та стаціонарні об'єкти, інформаційна технологія, маршрутизація, система підтримки прийняття рішення.

Аннотация

Бережной А.А. Методы и информационная технология автоматизированного планирования маршрутов полетов беспилотных летательных аппаратов для повышения эффективности поиска объектов. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – информационные технологии. Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков, 2020, Черкасский государственный технологический университет, Черкасы, 2020.

В диссертации получены такие основные результаты:

1. Усовершенствован метод автоматизированного планирования маршрута полета БПЛА для поиска динамического объекта, который, в отличие от существующих,

учитывает неопределенность в действиях противоположной стороны, формирует варианты прогноза движения, оценивает уязвимость динамического объекта на каждом из возможных маршрутов этого движения, что позволяет снизить неопределенность информации о данных маршрутах и сформировать рациональный маршрут мониторинга объектов наблюдения.

2. Усовершенствован метод автоматизированного планирования маршрута полета БПЛА для поиска стационарных объектов, который, в отличие от существующих, учитывает связанность структуры стационарных объектов на разных топологических уровнях и позволяет оценить важность данного типа объектов в общей структуре.

3. Получила дальнейшее развитие информационная технология автоматизированного планирования действий БПЛА, которая, в отличие от существующих, учитывает результаты распознавания объектов, что позволяет в реальном времени изменять маршрут полета при выполнении миссии БПЛА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, динамические и стационарные объекты, информационная технология, маршрутизация, система поддержки принятия решения.

Abstract

Berezhnyi A.O. Methods and information technology for automated route planning of unmanned aerial vehicles to increase the efficiency of object searches - qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

The Thesis for PhD of Engineering Sciences degree in the specialty 05.13.06 Information technologies. – Kharkiv National Air Forces University named after Ivan Kozhedub, Kharkiv, 2020, Cherkasy state technological university, Cherkasy, 2020.

The rapid development of unmanned aircraft in recent years has changed the organization of monitoring stationary and dynamic objects. This is due to the following: unmanned aerial vehicles (UAV) are much cheaper than manned reconnaissance aircraft; UAVs are easier to maintain and manage; UAVs can operate at night, in conditions of poor visibility, in situations that threaten the life of the pilot. The tasks of finding dynamic objects on the ground are not new. However, there are features for the forest-steppe zone. It contains significant areas of forest. The search for objects of observation in such areas is complicated. The process of selecting the optimal flight routes is particular difficulty. In this case, it is not only about completing purely civilian missions, but also about solving military tasks.

Recently, the forms and methods of armed struggle are being transformed (Syria, Iraq, Libya, East Ukraine). The combat use of highly mobile, small groups, that can carry out terrorist tasks, comes to the fore. Modern terrorism is a complex socio-political phenomenon as a form of political struggle, as a form of behavior of individuals and organized groups. They, disrupting public order, destabilize the process of public life,

contribute to the creation and development of conflict situations. Reliable and timely information is needed to counter the terrorist attacks of such groups. It can be quickly obtained by conducting active reconnaissance (monitoring). Planning aerial reconnaissance route using UAV in the forest-steppe area requires the identification and consideration of special patterns in dynamic objects actions. The intelligence plan itself should provide for advancing the enemy in action.

A forecast of possible dynamic objects actions will give a result if information on their initial location (time, coordinates, state) is known. In this case, the results of aerial reconnaissance using UAV will provide information on the direction of movement, a possible target, the time dynamic objects leaves the target. This information will allow for the timely preparation of measures to counter possible terrorist attacks.

The problem with monitoring stationary and dynamic objects is that there is a conflict between the size of the search area and the size of the objects.

The solution of this contradiction is possible through the autonomous operation of the UAV, changing the route of its flight (flight task) by the results of automatic object recognition. Modern UAVs include an autopilot and a powerful on-board complex that can perform these tasks provided it is equipped with the appropriate information technologies. Thus, the relevant task of developing information technology for the automated detection and identification of stationary objects by unmanned aerial vehicles arises.

The main results obtained in the dissertation are:

1. An improved method for automated UAV flight route planning for searching for a dynamic object, which, unlike the existing ones, takes into account the uncertainty in the actions of the opposite side, generates motion prediction options, estimates the vulnerability of a dynamic object on each possible route of their movement, which reduces the uncertainty of information about these routes and form a rational monitoring route for monitoring objects.

2. An improved method for automated UAV flight route planning for searching for stationary objects, which, unlike the existing ones, takes into account the connected structure of stationary objects at different topological levels and allows you to assess the importance of this type of object in the general structure.

3. The information technology of automated UAV action planning, which, unlike the existing ones, takes into account the results of object recognition, has been further developed, which allows real-time change of the flight route when performing an UAV mission.

The results can be used directly to plan UAV flight routes to search for dynamic and stationary objects in advanced decision support systems and automated aviation control systems.

Keywords: decision support system, dynamic and stationary objects, information technology, routing, unmanned aerial vehicle.