

Бережний А.О., Крижанівський І.М.

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків

Барабаш О.В.

Державний університет телекомунікацій

МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТІВ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ З УРАХУВАННЯМ ВИЯВЛЕННЯ СТАЦІОНАРНИХ ОБ'ЄКТІВ

Планування маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів для виконання завдань (єдиної місії) відносяться до класу складних обчислювальних задач, які можуть бути вирішені за допомогою теорії графів, теорії багатогранного аналізу, теорії нечітких множин, методів алгебри топології та методів теорії нечітких множин.

Для моделей пошуку стаціонарних об'єктів, ранжування їх за важливістю та зміни маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів використовується базове поняття теорії симплексів – імпліцитарний аналіз.

У симпліціальній моделі складної організаційно-технічної системи крім вузлів і зв'язків між ними основну роль мають більш складні об'єкти – симплекси. У зв'язку з цим багатогранний аналіз досліджує принципово інший тип взаємодії між елементами системи – симпліціальну взаємодію, однією з характерних рис якої є багатомірність зв'язків.

Проведено формалізацію завдань планування маршрутів безпілотних літальних апаратів для пошуку та встановлення відповідності стаціонарних об'єктів. Показано, що дана задача може бути розв'язана за допомогою математичних моделей полідрального аналізу. У такому випадку система стаціонарних об'єктів противника розглядається як граф, на якому виділяються симплекси і шукаються точки (об'єкти) пріоритетної розвідки. Даний метод може бути включений до складу системи підтримки прийняття рішення планування застосування безпілотних літальних апаратів із застосуванням сучасних інформаційних технологій.

Розроблено метод автоматизованого планування маршрутів безпілотних літальних апаратів з урахуванням порядку виявлення стаціонарних об'єктів, що дозволить підвищити ефективність ведення повітряної розвідки.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат, планування, маршрут, стаціонарний об'єкт, організаційно-технічна система, симплекси, полідральний аналіз.*

Andrii Berezhnyi, Ihor Kryzhanivskyi

Kharkov National Air Force University Named Ivan Kozhedub

Oleg Barabash

State University of Telecommunications

METHOD OF AUTOMATED PLANNING OF THE UNMANNED AIRCRAFT ROUTE TAKING INTO ACCOUNT IDENTIFICATION OF STATIONARY OBJECTS

Despite considerable interest in the development of the theory and practice of creating and using unmanned aerial vehicles, the issue of planning their use using modern information technologies remains not fully explored.

Planning the flight routes of unmanned aerial vehicles to perform tasks (a single mission) belong to the class of complex computational problems that can be solved using graph theory, polyhedral analysis theory, fuzzy set theory, topology algebra methods, fuzzy set theory methods.

For search models for stationary objects, ranking them by importance and changing the routes of unmanned aerial vehicles, the basic concept of the theory of simplexes is used – simplicial analysis.

In the simplicial model of a complex organizational and technical system, in addition to the nodes and connections between them, the main role is played by more complex objects - simplexes. In this regard, polyhedral analysis examines a fundamentally different type of interaction between system elements – simplicial interaction, one of the characteristic features of which is the multidimensionality of bonds.

© Бережний А.О., Крижанівський І.М., Барабаш О.В. 2019

The formalization of the tasks of route planning of unmanned aerial vehicles to search for and establish compliance with stationary objects. It is shown that this problem can be solved using mathematical models of polyhedral analysis. In this case, the system of stationary enemy objects is considered as a graph on which simplexes are highlighted and points (objects) of priority intelligence are searched. This method can be included in the decision support system for planning the use of unmanned aerial vehicles using modern information technologies.

A method has been developed for automated route planning of unmanned aerial vehicles taking into account the procedure for identifying stationary objects, which will improve the efficiency of aerial reconnaissance.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, planning, route, stationary object, organizational and technical system, simplexes.*

Бережной А.А., Крыжановский И.Н.

Харьковский национальный университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков

Барабаш О.В.

Государственный университет телекоммуникаций

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С УЧЕТОМ ВЫЯВЛЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ

Планирование маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов для выполнения задач (единой миссии) относятся к классу сложных вычислительных задач, которые могут быть решены с помощью теории графов, теории полиэдрального анализа, теории нечетких множеств, методов алгебры топологии, методов теории нечетких множеств.

Для моделей поиска стационарных объектов, ранжирование их по важности и изменения маршрутов беспилотных летательных аппаратов используется базовое понятие теории симплексов – симплициарный анализ.

В симплициальной модели сложной организационно-технической системы кроме узлов и связей между ними основную роль имеют более сложные объекты - симплексы. В связи с этим полиэдральный анализ исследует принципиально другой тип взаимодействия между элементами системы – симплициальное взаимодействие, одной из характерных черт которой является многомерность связей.

Проведено формализацию задач планирования маршрутов беспилотных летательных аппаратов для поиска и установления соответствия стационарных объектов. Показано, что данная задача может быть решена с помощью математических моделей полиэдрального анализа. В таком случае система стационарных объектов противника рассматривается как граф, на котором выделяются симплексы и ищутся точки (объекты) приоритетной разведки. Данный метод может быть включен в состав системы поддержки принятия решения планирования применения беспилотных летательных аппаратов с применением современных информационных технологий.

Разработан метод автоматизированного планирования маршрутов беспилотных летательных аппаратов с учетом порядка выявления стационарных объектов, что позволит повысить эффективность ведения воздушной разведки.

Ключевые слова: *беспилотный летательный аппарат, планирование, маршрут, стационарный объект, организационно-техническая система, симплексы, полиэдральный анализ.*

Вступ

Незважаючи на значний інтерес до розвитку теорії та практики створення та застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА), питання щодо планування їх застосування з використанням сучасних інформаційних технологій залишається не повністю дослідженим. З одного боку відомі моделі та методи планування застосування безпілотних літальних апаратів у відносно сталому середовищі (моніторинг потенційно небезпечних об'єктів, контроль сільськогосподарських угідь, морського, автомобільного та залізничного транспорту), з іншого боку задачі виявлення стаціонарних об'єктів та зміни маршрутів руху у зв'язку з їх виявленням, недостатньо освітлені у наукових публікаціях. Планування

маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів для виконання завдань (єдиної місії) відносяться до класу складних обчислювальних завдань, що можуть бути вирішені за допомогою теорії графів, теорії поліедрального аналізу, теорії нечітких множин, методів алгебри топології, методів теорії нечітких множин.

Аналіз досліджень і публікацій

Проведений аналіз відомих літературних джерел за темою публікації дозволив зробити висновок, що дана тема викликає цікавість як у вітчизняних, так і закордонних авторів. В літературному огляді необхідно виділити наступні роботи.

У роботі [1] запропонована нова модель руху БПЛА за назвою DMM (динамічна модель руху). Але запропонована модель цифрового мультиметра забезпечує ефективні вікна пошуку на основі максимальної інтенсивності пікселів для сегментування тільки конкретних областей для переміщення динамічного об'єкта, а не пошук всієї області кадру за допомогою методу SUED (сегментація з використанням крайової дилатації). У роботі [2] розглядається координація групи безпілотних літальних апаратів, що розгорнуті для пошуку динамічної цілі в безперервному просторі за допомогою алгоритму максимальної суми. У [3] представлений підхід до розподілу задач БПЛА, що беруть участь у місії пошуку і дії. Описано три алгоритми колективного пошуку неоднорідної команди БПЛА на просторово розширеному полі бою. Важливими є результати роботи [10], де описаний порядок упорядкування децентралізованої структури прийняття рішень з декількома агентами для рішення проблеми пошуку з обмеженням у часі. У роботі [5] введена уніфікована структура для опису маршрутизації й оптимізації траєкторії БПЛА. Незважаючи на значний інтерес до матеріалу даної статті, у ній приведені загальні постановки і формалізація задачі маршрутизації й огляд існуючих методів. Застосовано метод таксономії до існуючих методів маршрутизації і зроблений висновок про наявність значних пробілів у рішенні прикладних універсальних задач вибору оптимального маршруту польоту БПЛА. Робота [6] була присвячена розробці нових і удосконалення існуючих алгоритмів і методів застосування групи БПЛА, що займаються збором інформації про задану територію й оперативну обстановку, що динамічно змінюється. Запропоновано модифікований алгоритм послідовного вибору. Модифікований варіант відрізняється тим, що він мінімізує проходження по реперних крапках двох або більше різних типів БПЛА. У статті [7] запропоновані три різні стратегії пошуку об'єктів, а саме; стратегія випадкового пошуку, стратегія пошуку на основі доріжок і стратегія пошуку на основі сітки і проведений аналіз їхньої ефективності за допомогою моделювання Монте-Карло.

У статті [8] розглядається проблема оптимальної маршрутизації для безпілотних літальних апаратів. У статті представлена математична модель для рішення визначеної задачі й експеримент, що використовується для перевірки функціональності моделі. Модель розроблена за допомогою методів математичного програмування. У статті [9] розглядається проблема розробки цільових функцій для автономного пошуку і відстеження цілей спостереження безпілотними літальними апаратами. У роботі [10] представлений новий підхід до планування маршрутів загальних пошукових місій, що стежать, координуваними безпілотними літальними апаратами.

С точки зору аналізу складних організаційно-технічних систем необхідно відмітити роботи [11, 12], в яких приводяться математичні методи та моделі аналізу даного типу систем, а також приводяться методи планування польоту літальних апаратів для виконання заданих місій.

За результатами короткого літературного огляду можна зробити висновок, що задача планування застосування безпілотних літальних апаратів для пошуку статичних об'єктів і автоматизованого складання оптимального маршруту не розглянута. Базовими роботами для розробки відповідного методу стали роботи [3, 5, 7, 11, 12].

Мета дослідження

Метою написання статті є розробка методу автоматизованого планування маршрутів безпілотних літальних апаратів з урахуванням порядку виявлення стаціонарних об'єктів, що дозволить підвищити ефективність ведення повітряної розвідки.

Результати дослідження

Для моделей пошуку стаціонарних об'єктів, ранжування їх по важливості та зміни маршрутів безпілотних літальних апаратів використовується базові поняття теорії симплексів.

В симпліціальній моделі складної організаційно-технічної системи крім вузлів та зв'язків між ними основну роль мають більш складні об'єкти - симплекси. У зв'язку із цим поліедральний аналіз досліджує принципово інший тип взаємодії між елементами системи – симпліціальну взаємодію, однієї з характерних рис якої є багатомірність зв'язків.

Симплекс відображає деяке відношення, що поєднує набір з декількох вузлів системи в сукупність. При дослідженні складної організаційно-технічної системи, таке відношення задається експертом, виходячи з обумовлених структурою фізичних зв'язків між елементами. Незважаючи на це, зв'язок між симплексами все-таки принципово відрізняється від зв'язку між вузлами. Симплекс описує вершину складної організаційно-технічної системи з погляду її зв'язки з деякою підмножиною вершин цієї системи. Тип взаємодії визначається відношенням.

Як приклад, відношення задане таким чином: “кожний із симплексів описує підмножину вузлів, що є для вершини джерелами розвідувальної інформації про протиборчу сторону”. У даному випадку існує між двома симплексами r -мірний зв'язок, якщо відповідні цим симплексам вершини мають не менш $r+1$ загальних джерел інформації. Однак дві довільні вершини, симплекси яких r -зв'язані, можуть виявитися незв'язними в традиційному змісті (такі вершини не зв'язані безпосереднім зв'язком, а зв'язок через загальні джерела інформації не дозволяє їм обмінюватися інформаційними потоками). Використовуючи термінологію теорії графів [12], такі вершини взаємно недосяжні, тому що потоки для обох симплексів ідуть від загальних для них джерел.

Таким чином, незважаючи на відсутність прямого зв'язку між симплексами, можна зробити висновок не тільки про вплив одного симплекса на сусідні, але й про поширення таких впливів по ланцюжках r -зв'язаних симплексів, тобто про існування можливості впливати на вилучені симплекси. Беручи до уваги, що симпліціальний зв'язок принципово відмінний від звичайного зв'язку та спирається на багатомірну структуру симплексів, такий зв'язок і сама взаємодія називається багатомірною.

Виходячи з особливостей поширення інформації за допомогою багатомірних зв'язків, можна зробити висновок, що основну роль у дослідженні багатомірних взаємодій займають послідовності, або ланцюги r -зв'язаних симплексів, а також структури, які утворені даними ланцюгами. Під структурою ланцюгів тут розуміється їх взаємне розташування, місця їхніх перетинань та багатомірні порожнечі, що виникають між симплексами. Дослідження структур такого виду дозволяє зробити висновок про напрямки та характер руху багатомірних потоків, отримати подання про геометричні перешкоди на шляху їх поширення, оскільки кожна складна організаційно-технічна система на кожному рівні зв'язаності представляється набором сукупностей зв'язаних симплексів (q -компонентів).

Q -аналіз разом з аналізом ексцентриситетів складових частин складної системи основа поліедрального аналізу. На даний час галузь застосування q -аналізу обмежується транспортними потоками, лінгвістичними дослідженнями, дослідженнями в хімії (структура речовин).

Q -аналіз спирається на побудову вектора складності (структурного вектору) виду:

$$Q = (Q_{\dim(K)} \dots Q_1, Q_0), \quad (1)$$

де Q_i – кількість компонент зв'язаності на i -му рівні.

Процедура обчислення структурного вектора виконується для вивчення глобальної зв'язаності структури системи. Вона ґрунтується на аналізі симпліціальної моделі системи статичних об'єктів. Симпліціальний комплекс є множиною симплексів, які з'єднані за допомогою загальних граней, то для визначення характеристики зв'язаності використовується поняття ланцюга зв'язку: два симплекси можуть не мати загальної грані, але можуть бути зв'язані за допомогою послідовності зв'язаних один з одним проміжних симплексів. Тобто, два симплекси s_a і s_b комплексу K з'єднані ланцюгом, якщо існує така кінцева послідовність симплексів $s_{c_1}, s_{c_2}, \dots, s_{c_k}$, що s_{c_1} та s_a мають спільну грань розмірності q_a , s_{c_k} та s_b мають спільну грань розмірності q_b . Такий ланцюг є q -зв'язаним, якщо q – менше зі значень $q_a, q_b, \{q_{c_i}\}$. Якщо симплекси s_a і s_b поєднані ланцюгом q зв'язку, то вони і r зв'язані ($q > r \geq 0$). Такі симплекси об'єднуються в q компоненту.

Розмірність вектору (1) дорівнює розмірності досліджуваного комплексу, а кожний його елемент відповідає числу q -компонентів – сукупності q -мірних симплексів, що перетинаються, на відповідному рівні зв'язаності.

В якості міри складності структури застосуємо формулу [11]:

$$\Psi(K) = \frac{2 \cdot \left[\sum_{i=0}^N (i+1) \cdot Q_i \right]}{(N+1) \cdot (N+2)}, \quad (2)$$

де N – розмірність комплексу;

Q_i – i -та компонента вектора складності (структурного вектору) Q симпліціального комплексу;

Отримання числових значень показника складності симпліціальних комплексів за формулою (2) дозволяє класифікувати їх за складністю організації внутрішньої структури, що дозволяє формалізувати та сформулювати маршрут руху безпілотних літальних апаратів для пошуку стаціонарних об'єктів.

З метою аналізу стаціонарних об'єктів з застосуванням поліедрального аналізу, в якості вихідних даних використаємо граф, що приведено на (рис. 1). Кожна вершина графу позначена як s_i .

Введемо наступне відношення між вузлами даної системи: i -та вершина належить j -му симплексу, якщо між i -ю та j -ю вершиною є зв'язок.

В структурі системи переважають симплекси розмірностей – 3 та 4. Значення ексцентриситетів приблизно навіпіл розділилися на середні та незначні, що свідчить про те, що симплекси зв'язані один з одним, у середньому, не більше половиною своїх вузлів і не здатні формувати компоненти великих розмірностей, що знижує її адаптаційні можливості до різких змін. Значення ступеня конкуренції для всіх симплексів, крім одного, є середніми, що свідчить про достатню кількість варіантів досяжності вузлів, отже, вихід з ладу одного з вузлів не спричинить критичних наслідків для системи.

Проведення поліедрального аналізу дозволило отримати наступний структурний вектор Q (10, 37, 19, 1). Велика кількість q -компонентів на всіх рівнях зв'язаності, за винятком нульового, підтверджує припущення про нездатність системи формувати потоки великих розмірностей. Крім того, кількість симплексів розмірності 4 та 3 збігаються зі значеннями структурного вектора на рівнях 3 та 2, а саме: 10 та 37.

Це означає, що в розглянутій системі симплекси не здатні встановлювати один з одним зв'язок на цих двох рівнях зв'язаності і формувати компоненти навіть із двох симплексів.

Більш детальну інформацію про рівні зв'язаності отримаємо з аналізу q -компонентів. Значення оцінки складності, обчислене на основі структурного вектора, дозволяє віднести досліджувану систему статичних об'єктів до систем із середньою складністю структури.

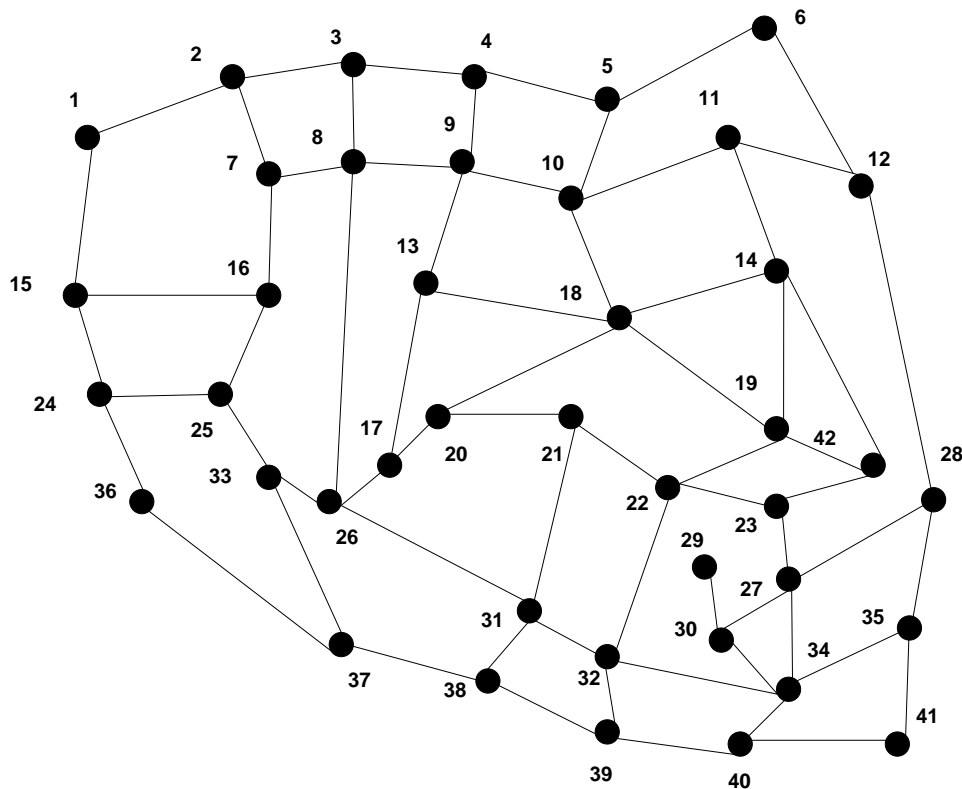


Рис. 1. Графова модель системи статичних об'єктів

На рівні зв'язаності 3 знайдено 10 q -компонент, що складаються з одного елемента (одиночні компоненти): $s_8, s_9, s_{10}, s_{18}, s_{19}, s_{22}, s_{26}, s_{31}, s_{32}, s_{34}$. У зв'язку зі значною їх чисельністю, значення коефіцієнта покриття рівня та відносної провідності цих q -компонентів мало.

Результати аналізу рівня зв'язаності 2 абсолютно ідентичні результатам аналізу рівня зв'язаності 3. На цьому рівні розташовуються 37 одиничних q -компонентів на базі симплексів $s_2-s_5, s_7-s_{28}, s_{30}-s_{35}, s_{37}-s_{40}, s_{42}$. Кожний q -компонент характеризується малими значеннями коефіцієнта покриття рівня та відносної провідності.

На рівні зв'язаності 1 аналіз q -компонент дозволив одержати такий результат. Незважаючи на значну кількість q -компонент на цьому рівні - 19 тільки 12 з 41 симплексів ($s_1, s_6, s_{11}, s_{12}, s_{14}, s_{26}, s_{27}, s_{28}, s_{30}, s_{33}, s_{36}, s_{37}$) не зв'язані з жодним іншим симплексом, і формують 12 одиничних q -компонент з незначними величинами коефіцієнта покриття рівня та відносної провідності. Всі інші симплекси беруть участь у формуванні семи q -компонент.

Перший q -компонент сформований шістьма симплексами $s_2, s_8, s_4, s_{10}, s_{13}, s_{20}$, причому два з них - s_2 і s_{20} - є термінальними, і немає жодного симплекса перетину. Такий поділ симплексів свідчить про досить просту внутрішню структуру q -компонента та вказує на те, що q -компонента не містить циклів і перетинань, і представлена однією симпліціальним ланцюгом, обмеженим симплексами s_2 і s_{20} . На це також указує й украй мале значення складності q -компоненти. Середня величина коефіцієнта покриття рівня свідчить про відносно великий розмір q -компонента і її ролі серед інших компонентів. Незважаючи на те, що розмір досліджуваного q -компонента дозволяє підтримувати додаткову провідність на середньому рівні, її внутрішня організація зменшує ці можливості до малого значення.

Другий q -компонент сформований також шістьма симплексами - $s_3, s_7, s_9; s_5, s_{18}$ та s_{17} . Однак, уже три з них - s_7, s_5 та s_{17} - є термінальними та один - s_9 - симплексом перетинань. Очевидно, що структура цього q -компонента складніша. Розміри компонента дозволяють їй мати середнє значення коефіцієнта покриття рівня, що свідчить про те, що вона здатна відігравати важливу роль у розподілі одномірних потоків.

Наступні три компоненти (3, 4 і 5) сформовані наборами із двох симплексів; $\{s_{15}, s_{25}\}$; $\{s_{16}, s_{24}\}$ і $\{s_{19}, s_{23}\}$ відповідно.

Шостий компонент подібний до розглянутого вище компоненту 2, з тією різницею, що в її склад входять не шість, а п'ять симплексів – $s_{21}, s_{32}, s_{38}, s_{40}, s_{35}$, три з яких є термінальними – s_{21}, s_{38}, s_{35} а один – симплексом перетинань – s_{32} . Незважаючи на менше число симплексів, складність q-компонента залишається незначним, а коефіцієнт покриття рівня зменшився із середнього до незначного. Додаткова провідність теж зменшилася, але залишилася низькою.

Структура q-компонента 7 збігається зі структурою q-компонента 1, розглянутого вище. У його склад входить набір з 6 симплексів – $s_{22}, s_{31}, s_{42}, s_{39}, s_{34}, s_{41}$, два з яких – s_{42} і s_{41} термінальні, а симплекси перетинань відсутні. Отримані характеристики компонента 7 збігаються з оцінками компонента 1: значення складності компоненти – мале, значення коефіцієнта покриття рівня - середнє; значення додаткової провідності - мале.

Підводячи підсумки аналізу рівня зв'язаності 1, можна відзначити, що, незважаючи на низьку зв'язаність симплексів, яка стала причиною великої кількості одиничних q-компонент, можна зробити висновок про можливість системи підтримувати одномірні потоки в межах невеликого числа одномірних (не одиничних) q-компонент. Невеликий розмір і кількість цих компонентів сильно обмежує області, у яких додаткова провідність здатна себе виявити. До того ж, всі знайдені q-компоненти демонструють досить простий зв'язок, що накладає обмеження на інтенсивність багатомірних потоків. Все це вказує на те, що досліджувана система слабо пристосована для адаптивного реагування на різкі зміни обстановки (втрати елементу, порушення зв'язків).

Нульовий рівень зв'язаності системи – це рівень фізичних зв'язків. Всі симплекси мають зв'язки (відсутні ізольовані вершини в графі), що свідчить про стійкість побудованої системи.

За результатами проведеного аналізу сформуємо ряд рекомендацій:

- приблизно однакове значення ексцентриситету симплексів в системі свідчить про стійкість побудованої системи статичних об'єктів;
- найбільш високий рівень зв'язаності 3 представлений незв'язними компонентами ($s_8, s_9, s_{10}, s_{18}, s_{19}, s_{22}, s_{26}, s_{31}, s_{32}, s_{34}$), що обмежують собою зони 3-мірної провідності, саме дані вузли є першочерговими для ведення повітряної розвідки і підтвердження їх стану;
- оскільки система слабо пристосована для адаптивного реагування на різкі зміни обстановки, вплив на неї потрібно організувати не послідовний, а одночасний.

Висновки

За результатами розробки методу проведено формалізацію завдань планування маршрутів безпілотних літальних апаратів для пошуку та встановлення відповідності стаціонарних об'єктів. Показано, що дана задача доволі складна та може бути розв'язана за допомогою математичних моделей поліедрального аналізу. В такому випадку система стаціонарних об'єктів розглядається як граф, на якому виділяються симплекси та шукаються точки (об'єкти) пріоритетної розвідки. Даний метод може бути включений до складу системи підтримки прийняття рішення планування застосування безпілотних літальних апаратів з застосуванням сучасних інформаційних технологій. Розвитком даного методу є планування застосування групи безпілотних літальних апаратів стаціонарних об'єктів з застосуванням обміну даними між ними.

Список використаної літератури

1. A. F. M. Saifuddin Saif, Anton Satria Prabuwono and Zainal Rasyid Mahayuddin "Moving Object Detection Using Dynamic Motion Modelling from UAV Aerial Images" Hindawi Publishing Corporation the Scientific World Journal Volume 2014, Article ID 890619, 12 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2014/890619>.

2. Francesco M. DelleFave, Zhe Xu, Alex Rogers & Nicholas R. Jennings "Decentralised Coordination of Unmanned Aerial Vehicles for Target Search using the Max-Sum Algorithm".
3. Yan Jin, Student Member, IEEE, Yan Liao, Ali A. Minai, Member, IEEE, and Marios M. Polycarpou, Fellow, IEEE "Balancing Search and Target Response in Cooperative Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Teams" CYBERNETICS, VOL. 36, NO. 3, JUNE 2006.
4. Takahiro Miki, Marija Popovic, Abel Gawel, Gregory Hitz and Roland Siegwart . "Multi-agent Time-based Decision-making for the Search and Action Problem".
5. Walton P. Coutinho, Joerg Fliege, Maria Battarra "The Unmanned Aerial Vehicle Routing and Trajectory Optimisation Problem".
6. Норсеев, С.А. Алгоритм распределенного покрытия неизвестной территории группой роботов / С.А. Норсеев, Д.В. Багаев, В.А. Соловьев, Д.В. Казанцев // Оборонная техника. – 2015. – №5-6. – С. 86-90.
7. Joel George, Sujit P. B., J. B. Sousa "Search Strategies for Multiple UAV Search and Destroy Missions" *Journal of Intelligent & Robotic Systems* January 2011, Volume 61, Issue 1–4, pp 355-367.
8. Dušan Teichmann, Michal Dorda, Jakub Vítek, Vladimír Smrž, Vladimír Michalík "Unmanned aerial vehicles routing problem". Published in: Proceedings of the 2014 15th International Carpathian Control Conference (ICCC) Date of Conference: 28-30 May 2014 Date Added to IEEE Xplore: 26 June 2014 INSPEC Accession Number: 14399958 DOI: 10.1109/Carpathian CC.2014.6843676. Publisher: IEEE Conference Location: Velke Karlovice, Czech Republic <https://ieeexplore.ieee.org/document/6843676>.
9. Vesselin P. Jilkov , X. Rong Li , Donald DelBalzo, "Best combination of multiple objectives for UAV search & track path optimization" Published in: 2007 10th International Conference on Information Fusion Date of Conference: 9-12 July 2007 Date Added to IEEE Xplore: 26 December 2007 CD-ROM ISBN: 978-0-662-45804-3 INSPEC Accession Number: 9856084 DOI: 10.1109/ICIF.2007.4408202 Publisher: IEEE Conference Location: Quebec, Que., Canada <https://ieeexplore.ieee.org/document/4408202>.
10. Ryan R. Pitre ; X. Rong Li ; R. Delbalzo "UAV Route Planning for Joint Search and Track Missions – An Information-Value Approach" Published in: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (Volume: 48 , Issue: 3 , JULY 2012) Page(s): 2551 – 2565 Date of Publication: 11 July 2012 INSPEC Accession Number: 12852847 DOI: 10.1109/TAES.2012.6237608 Publisher: IEEE <https://ieeexplore.ieee.org/document/6237608>.
11. Тристан А. В. Поліедральний аналіз у дослідженні структурно складних систем для рішення задачі вибору об'єктів вогневого ураження / А. В. Тристан, В. В. Грідіна, О. М. Козак, С. Л. Городецький // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. - 2014. - № 4. - С. 15-19.
12. Таран И.А. Методика определения рационального маршрута полета летательного аппарата с использованием динамического программирования / И. А. Таран, А. В. Тристан, В. Г. Паталаха // Научно-образовательный журнал "Вестник военного института Национальной гвардии Республики Казахстан". - 2015. - № 3(17). - С. 34-42.

References

1. A. F. M. Saifuddin Saif, Anton Satria Prabuwoand Zainal Rasyid Mahayuddin "Moving Object Detection Using Dynamic Motion Modelling from UAV Aerial Images" Hindawi Publishing Corporation the Scientific World Journal Volume 2014, Article ID 890619, 12 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2014/890619>.
2. Francesco M. Delle Fave, Zhe Xu, Alex Rogers and Nicholas R. Jennings "Decentralised Coordination of Unmanned Aerial Vehicles for Target Search using the Max-Sum Algorithm".

3. Yan Jin, Student Member, IEEE, Yan Liao, Ali A. Minai, Member, IEEE, and Marios M. Polycarpou, Fellow, IEEE "Balancing Search and Target Response in Cooperative Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Teams" CYBERNETICS, VOL. 36, NO. 3, JUNE 2006.
4. Takahiro Miki, Marija Popovic, Abel Gawel, Gregory Hitz and Roland Siegwart. "Multi-agent Time-based Decision-making for the Search and Action Problem".
5. Walton P. Coutinho, Joerg Fliege, Maria Battarra "The Unmanned Aerial Vehicle Routing and Trajectory Optimisation Problem".
6. Norseev S.A., Bagaev D.V., Soloviev V.A., Kazantsev D.V. Algoritm raspredelennogo pokrytiya neizvestnoy territorii gruppy robotov. Oboronnyaya tekhnika. 2015. No. 5-6. pp. 86-90.
7. Joel George, Sujit P. B., J. B. Sousa "Search Strategies for Multiple UAV Search and Destroy Missions" *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, January 2011, Volume 61, Issue 1 – 4, pp 355-367.
8. Dušan Teichmann, Michal Dorda, Jakub Vítek, Vladimír Smrž, Vladimír Michalík "Unmanned aerial vehicles routing problem". Published in: Proceedings of the 2014 15th International Carpathian Control Conference (ICCC) Date of Conference: 28-30 May 2014 Date Added to IEEE Xplore: 26 June 2014 INSPEC Accession Number: 14399958 DOI: 10.1109/Carpathian CC.2014.6843676. Publisher: IEEE Conference Location: Velke Karlovice, Czech Republic <https://ieeexplore.ieee.org/document/6843676>.
9. Vesselin P. Jilkov, X. Rong Li, Donald DelBalzo, "Best combination of multiple objectives for UAV search & track path optimization" Published in: 2007 10th International Conference on Information Fusion Date of Conference: 9-12 July 2007 Date Added to IEEE Xplore: 26 December 2007 CD-ROM ISBN: 978-0-662-45804-3 INSPEC Accession Number: 9856084 DOI: 10.1109/ICIF.2007.4408202 Publisher: IEEE Conference Location: Quebec, Que., Canada <https://ieeexplore.ieee.org/document/4408202>.
10. Ryan R. Pitre; X. Rong Li; R. Delbalzo "UAV Route Planning for Joint Search and Track Missions – An Information-Value Approach" Published in: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (Volume: 48, Issue: 3, JULY 2012) Page(s): 2551 – 2565 Date of Publication: 11 July 2012 INSPEC Accession Number: 12852847 DOI: 10.1109/TAES.2012.6237608 Publisher: IEEE <https://ieeexplore.ieee.org/document/6237608>.
11. Tristan A.V., Gridina V.V., Kozak O.M., and Gorodetsky S.L. (2014). "Polyhedral analysis in the study of structurally complex systems to solve the problem of selection of objects of fire damage." *Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*. 4: 15-19. Print.
12. Taran I.A., Tristan A.V., and Patalaha V.G. (2015). "A technique for determining the rational flight path of an aircraft using dynamic programming." *Bulletin of the Military Institute of the National Guard of the Republic of Kazakhstan*. 3(17): 34-42. Print.

Автору статті (Author of the article):

Бережний Андрій Олександрович – перший заступник начальника Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба (Andrii Berezhnyi – first deputy chief of the university). Phone: +38097-682-27-77, E-mail: avtris@ukr.net

Крижанівський Ігор Миколайович – науковий співробітник Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба (Ihor Kryzhanivskyi – researcher). Phone: +38067-915-06-51, E-mail: vip.kryzhan1972@ukr.net

Барабаш Олег Володимирович – д.т.н., проф., завідувач кафедри вищої математики, Державний університет телекомунікацій (Barabash Oleg – Dr.Sci. in Technics, Prof., Head Department of Mathematics, State University of Telecommunications). Phone: +380 97 911 0854. E-mail: bar64@ukr.net