

ТРАНСПОРТНО-КОМУНІКАЦІЙНА ЗАДАЧА ДЛЯ ГРУП БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ

*Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна

Анотація. У статті описується децентралізоване управління групою безпілотних апаратів (БПА), об'єднаних у мережу, що ґрунтується на розв'язанні транспортно-комунікаційної задачі (ТКЗ). Виконано змістовну постановку ТКЗ для групи БПА, які частину шляху рухаються автономно. Особливістю розв'язання ТКЗ для групи БПА є необхідність сумісного розв'язання задачі побудови шляхів руху та задачі маршрутизації пакетів даних у мережі. Показано, що ТКЗ зводиться до класичної задачі маршрутизації транспортних засобів. Розроблено алгоритм розв'язку ТКЗ для групи БПА.

Ключові слова: безпілотні апарати, транспортна задача, оптимізація, маршрутизація, мережа.

Аннотация. В статье описывается децентрализованное управление группой беспилотных аппаратов (БПА), объединенных в сеть, которое основывается на решении транспортно-коммуникационной задачи (ТКЗ). Выполнена содержательная постановка ТКЗ для группы БПА, которые часть пути движутся автономно. Особенностью решения ТКЗ для группы БПА является необходимость совместного решения задачи построения маршрутов движения и задачи маршрутизации пакетов данных в сети. Показано, что ТКЗ сводится к классической задаче маршрутизации транспортных средств. Разработан алгоритм решения ТКЗ для группы БПА.

Ключевые слова: беспилотные аппараты, транспортная задача, оптимизация, маршрутизация, сеть.

Abstract. The paper describes decentralized control of networked unmanned vehicles groups (UV) and this control is based on solution of transport and communication problem (TCP). Substantial production of TCP for UV group, which are moving part of the way autonomously is discussed. The peculiarity of the TCP solution for UV group is a need for solving joint problem – finding the ways to build traffic routes and task routing of data packets in the network. It is shown that TCP is reduced to the classical problem of routing vehicles. The algorithm solution TCP of UV group is presented.

Keywords: unmanned vehicles, transport problem, optimization, routing, network.

1. Вступ

Системи управління групами безпілотних апаратів (БПА) [1–7] – безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та безпілотних наземних роботів (БНР) для виконання завдань мають розв'язувати дві сильнозв'язані задачі: транспортну (планування шляхів руху членів групи, маневрів, логістика вантажів для споживачів) [8–10] і комунікаційну у мережі групи [11] (керування, передача відеоданих та телеметрії). Традиційно задача управління рухом для груп БПЛА та БНР [1–10] розглядається окремо від задачі передачі даних, оскільки країни, в яких є замовники на застосування груп апаратів, мають розвинуту інфраструктуру для підтримки і супроводження польотів та наземних переміщень, в яку входять наземні і повітряні ретранслятори та супутникова група на геостационарних та низьких орбітах [7] (рис. 1). У даній роботі задачу керування рухом груп БПЛА та БНР подано як транспортно-комунікаційну задачу та запропоновано шляхи її розв'язування.

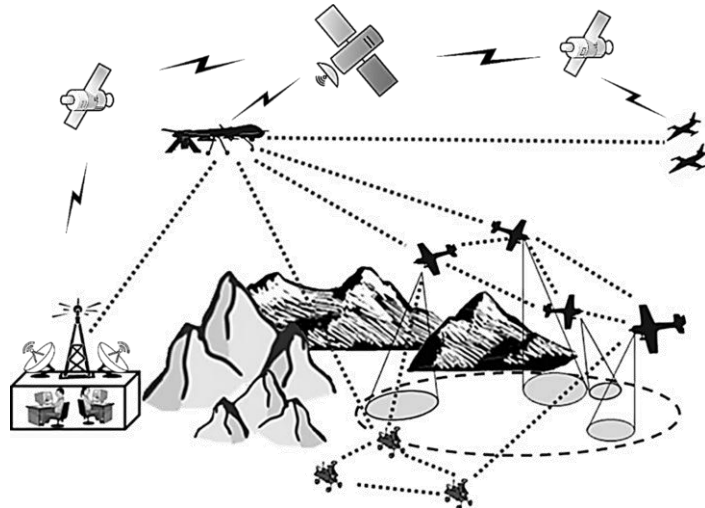


Рис. 1. Зв'язок і керування групами БПЛА і БНР у загальній структурі управління повітряним і наземним рухом у розвинутих країнах

2. Основна частина

Для потреб і можливостей України замість супутникової мережі можна побудувати технологічно простішу і дешевшу ретрансляційну мережу з декількох БПЛА, яких буде більше, ніж для випадку використання великого БПЛА-ретранслятора [7], але яка зможе виконувати аналогічні задачі в межах доступного фінансування (рис. 2). Запропоноване технічне рішення буде ґрунтуватись на математичному забезпеченні, яке дозволить динамічно вирішувати питання зв'язку і планування польоту.

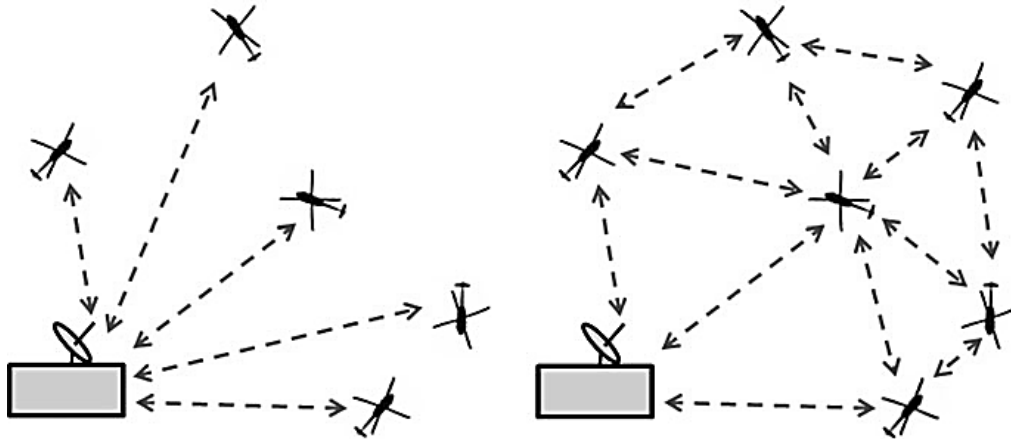


Рис. 2. Централізований спосіб керування групою БПА з пункту управління та децентралізований спосіб керування за допомогою ретрансляцій між абонентами

3. Змістова постановка транспортно-комунікаційної задачі оптимізації руху БПА

Задача оптимізації руху групи безпілотних апаратів [1–10] – безпілотних літальних апаратів та безпілотних наземних роботів або будь-яких інших транспортних засобів (ТЗ) може бути сформульована в рамках транспортної задачі, задачі прийняття рішень, керування ресурсами, побудови розкладів та ін. Постановка задачі такого класу характеризується багатомітністю параметрами та критеріями оптимальності, що обумовлюють велику розмірність простору рішень, але основними критеріями є мінімізація часу відвідування пунктів призначення та мінімізація кількості апаратів БНР та БПЛА.

Назвемо оптимізаційну задачу у такій новій постановці транспортно-комунікаційною задачею (ТКЗ).

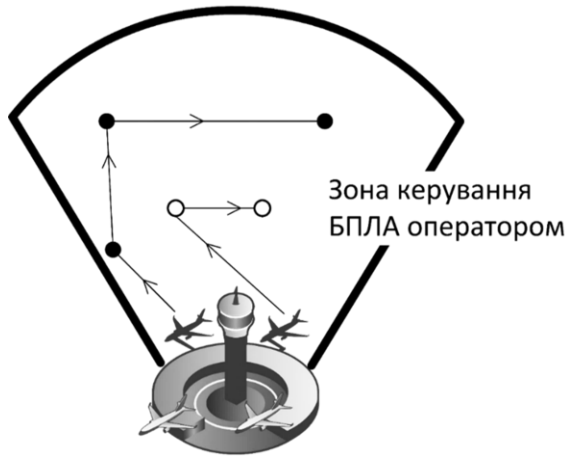


Рис. 3. Ілюстрація побудови маршрутів для двох БПЛА, що літають у зоні прямого радіокерування

Параметри:

- максимальна дальність передачі сигналу.

Вихідні дані:

- шлях руху для кожного БПА з топоприв'язкою.

Критерій:

- мінімізація сумарного шляху руху БПА та їх кількості.

ТКЗ у подібній постановці називають транспортною задачею для групи БПА [1–11], а проблему зв'язку, передачі даних виносять у суміжні задачі або в задачі нижчого порядку. На думку авторів, для умов України транспортну і комунікаційну задачу для груп БПА слід розв'язувати одночасно, оскільки наша країна має обмежені можливості для оренди супутникового зв'язку та малу кількість захищених і високонадійних наземних і повітряних ретрансляторів. Крім того, постановка задачі у такому вигляді дозволить підвищити ефективність використання кожного БПА та зменшити їх кількість для виконання польотного завдання групи.

Розглянемо постановку задачі для групи БПА, яка частину шляху може проходити на автопілоті, а потім зв'язуватись з пунктом управління у заплановані умовами ТКЗ часо-

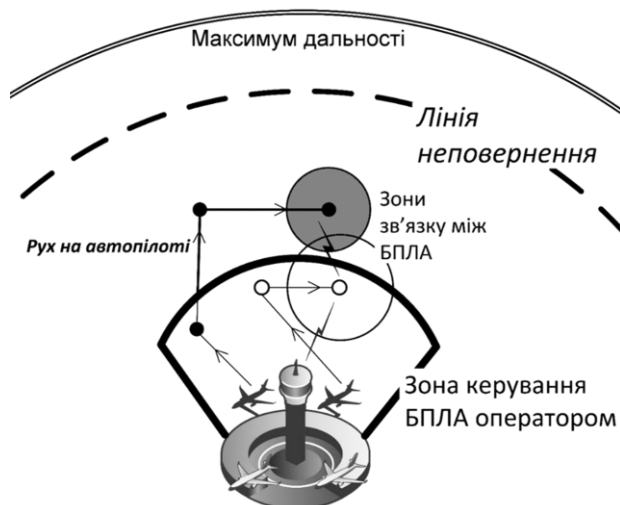


Рис. 4. Ілюстрація побудови шляху руху за результатом розв'язання транспортно-комунікаційної задачі для двох БПЛА, один з яких проходить частину шляху на автопілоті

Щоб пояснити підхід авторів, розглянемо спочатку постановку спрощеної ТКЗ для випадку постійного керування групою БПА з пункту управління [11] (рис. 3). На рис. 3 показано зону постійного керування групою БПА. Ця зона є сектором. У секторі виділено 4 точки, які слід відвідати групі БПА.

Задача. Побудувати маршрути до об'єктів з мінімальним часом руху до місць призначення і мінімальною кількістю БПА.

Вхідні дані:

- місця призначення;
- кількість БПА;
- ресурс ходу/руху (кількість пального, заряд акумулятора).

ві інтервали сеансів передачі даних (рис. 4).

Пояснення позначень.

Максимальна дальність – максимальна досяжна дальність польоту БПА; лінія неповернення – динамічна границя, перетин якої унеможливить повернення на місце посадки; радіус випромінювання характеризує дальність зв'язку між двома БПА, ця величина повинна бути мінімізована для економії заряду акумулятора для руху та уникнення звільнення радіоэфіру зв'язку між іншими БПА; зона керування БПА оператором

ром – зона прямої радіовидимості, тобто без ретрансляцій між БПЛА; зони зв'язку між БПЛА – зони, в яких можливий зв'язок БПЛА, що рухається на автопілоті, з пунктом управління за допомогою ретрансляцій між БПЛА, що керується з пункту управління, або з іншим БПЛА, що рухається на автопілоті.

Вхідні дані:

- місця призначення (об'єкти, які слід відвідати);
- місця посадок БПЛА (тимчасові польові аеродроми);
- кількість БПЛА;
- ресурс ходу (кількість пального, ємність акумулятора);
- інтервали запуску і посадки БПЛА;
- час підготовки до польоту (зарядка акумуляторів або заправка);
- маршрут руху пункту керування БПЛА, місця його зупинок та їх тривалість.

Параметри:

- максимальна дальність передачі сигналу;
- максимальна кількість ретрансляцій польотних завдань;
- пропускна здатність ретранслятора;
- обсяг інформації, що передається в різних режимах;
- максимально допустима затримка сигналу;
- частота опитування БПЛА.

Критерії:

- мінімізація сумарного шляху руху БПЛА та їх кількості;
- мінімізація кількості ретрансляцій;
- мінімізація суми радіусів випромінювання за межею прямого радіозв'язку з пункту керування;
- максимізація інформації, що передається.

Змістовна постановка задачі маршрутизації пакетів даних при регулюванні потужності передавачів і коротких ретрансляцій між абонентами була розглянута у роботі [11]. Суть її розв'язку полягає у побудові зваженого графа для чарункової мережі та у пошуку маршрутів даних, що відповідають мінімуму суми потужності при прийнятних затримках руху пакетів даних.

4. Формалізація задачі маршрутизації транспортних засобів при обстеженні території

Задача маршрутизації транспорту (Vehicle Routing Problems, VRP) полягає у виявленні та оптимізації маршруту до заданих точок для ТЗ, що знаходяться у депо [8]. Предметом розгляду стала формалізація задачі маршрутизації ТЗ при необхідності обстеження певної території, коли конкретні точки для відвідування не задані.

Маршрутизація транспорту відноситься до комбінаторних задач, які можна подавати як оптимізаційні задачі на графі $G(V, E)$. Маршрутизація ТЗ є актуальною NP-важкою науковою задачею [8–10, 12]. Але у даному випадку відсутні конкретні точки для відвідування, є лише територія, яку слід обстежити [10]. На цій території можуть бути певні точки особливого інтересу, що мають бути обов'язково обстежені. Але також необхідно обстежити якомога більшу частину усієї території з урахуванням обмежень (пальне та кількість ТЗ).

Таким чином, з урахуванням вищезазначеного, метою цього підрозділу є формалізація задачі маршрутизації ТЗ при необхідності обстеження певної території для того, щоб мінімізувати значення результуючої цільової функції шляхом максимізації відсотку дослідженої території для заданої кількості ТЗ із заданими характеристиками. Особливостями є те, що може бути заданий ряд точок, які слід обов'язково обстежити. Крім того, обмежена не лише кількість ТЗ, але й їх запаси пального (ресурс руху).

Розглянемо шлях розв'язання поставленої задачі. Територія, що має бути обстежена, розбивається на квадрати, розмір квадрата дорівнює зоні обстеження ТЗ з однієї точки (зоні чіткої видимості з центру цього квадрата). В центрі кожного з цих квадратів ставиться точка, формуючи таким чином множину точок. Тоді у випадку, якщо ТЗ відвідають кожну з цих точок, уся територія буде повністю обстежена. Місця особливого інтересу зсуваються до центрів квадратів, в яких вони знаходяться. У результаті разом з координатами депо ці точки формують підмножину множини точок V .

Таким чином, ми маємо заданий ряд точок, які треба відвідати для обстеження території. Вони представляють собою множину точок $v_s \dots v_n$. Є множина депо v_0, \dots, v_p або точок, з яких можуть стартувати та в яких можуть завершувати свої маршрути ТЗ (не обов'язково в тому ж самому депо). На основі цих двох множин будується плоский планарний граф, накладений на карту.

$V = \{v_0, \dots, v_p, v_s, \dots, v_n\}$ – множина вершин (v_0, \dots, v_p – депо, $v_s \dots v_n$ – точки, які бажано відвідати);

$V_e = \{v_s, \dots, v_k\}$ – підмножина множини V складається з точок, які слід обов'язково відвідати;

$K(V_i)$ – вага кожної вершини, що визначає важливість її відвідування (вища для підмножини V_e);

E – множина ребер $\{(v_i, v_j) | i \neq j\}$;

C – матриця невід'ємних відстаней (вартості шляху) c_{ij} між точками;

m – кількість ТЗ;

R_i – маршрут i -ого ТЗ ($i = 1..m$);

$C(R_i)$ – вартість маршруту R_i ;

q_i – максимальна дальність пересування i -ого ТЗ, визначена обсягом наявного пального.

З кожною вершиною V_i асоційована деяка її вага K_i , що визначає важливість її відвідування. Завдання маршрутизації полягає у визначенні такої множини маршрутів m з мінімальною загальною вартістю, щоб кожна вершина множини $V_e = \{v_s, \dots, v_k\}$ була обов'язково відвідана. Після цього ТЗ мають відвідати якомога більшу кількість точок (v_k, \dots, v_n). Крім того, всі маршрути повинні починатися і закінчуватися в будь-якій точці з множини депо (v_0, \dots, v_p).

Розв'язком задачі є розбиття множини V на підмножини (маршрути) та виконання порядку обходу на кожній підмножині (перестановка вершин маршруту). Розв'язки задачі, при яких не всі точки з множини V_e відвідуються, є недопустимими.

Цільовою функцією в загальному випадку є вартість розв'язку задачі:

$$F_{VRP} = \frac{\sum K(V_i)}{\sum C(R_i)}, \quad (1)$$

де $K(V_i)$ – вага відвіданих точок маршруту R_i , $i = 1, \dots, m$;

$C(R_i)$ – сума довжин ребер маршруту R_i , $i = 1, \dots, m$.

У даному варіанті потрібно знайти допустимий розв'язок з максимальним значенням цільової функції. Також введено такі обмеження для умов задачі:

– кожна вершина множини V_e обов'язково має бути відвідана;

– довжина кожного маршруту R_i не повинна перевищувати максимальної дальності польоту РРС q_i ;

– вартості шляхів між точками можуть модифікуватись додатковими обмеженнями – погодними умовами, загрозами тощо.

Таким чином, ця задача зводиться до задачі Multiple Depot VRP, MDVRP (або транспортна задача з декількома депо) з додатковими обмеженнями [8–10].

5. Розв’язування ТКЗ

Для розв’язування задачі в першу чергу відвідуються усі критично важливі точки з підмножини V_e . Далі (після того, як усі критично важливі точки відвідані) ТЗ мають відвідати якомога більше некритичних точок з множини V . Для побудови оптимального маршруту слід оцінити ваги ребер. При цій побудові маршруту також враховуються описані вище обмеження.

Визначення відстані між вершинами відбувається за стандартною формулою для прямокутної системи координат. Для розв’язання поставленої задачі та мінімізації цільової функції (1) слід обраним методом побудувати для подальшої оптимізації початковий набір маршрутів, що включатиме маршрут для кожного ТЗ. Маршрути можна представити у такому вигляді:

$$V_1 = \{ \{v_{11} \dots v_{1N}\}, \{v_{21} \dots v_{2D}\}, \dots, \{v_{m1} \dots v_{mK}\} \}. \quad (2)$$

Кожен з векторів відноситься до окремого ТЗ. Разом вони формують загальний вектор маршрутів, що підлягає обрахунку цільової функції та оптимізації. Сума вартостей відповідно до формули (1) складе потрібну нам цільову функцію. На векторі, отриманому за формулою (2), можна виконувати ітеративний оптимізаційний процес, шукаючи кращі розв’язки в околі шляхом застосування локального пошуку. В результаті ми розвиваємо проблему, що розглядається, одразу у двох напрямках: це й задача маршрутизації ТЗ з декількома депо, і класична оптимізаційна задача на просторі перестановок. Для класичної задачі відомі ефективні та швидкі алгоритми пошуку наближених та оптимальних розв’язків, що дозволить значно спростити розв’язування задачі маршрутизації ТЗ.

6. Обчислювальна схема алгоритму «Естафета»

Для розв’язання транспортно-комунікаційної задачі розроблено алгоритм «Естафета» маршрутизації для задачі аерофотозйомки та доставки з частковим рухом на автопілоті або без автономного руху. Особливостями алгоритму є сумісне розв’язання задачі маршрутизації пакетів даних у спеціалізованій мережі і маршрутизація руху групи БПЛА та ретрансляція у мережі БПЛА даних телеметрії, керування, аерофотозйомки (естафета), а також зміни польотних завдань за зоною контролю пункту керування для груп БПЛА, які рухаються на автопілоті.

Обчислювальна схема алгоритму «Естафета»:

1. Отримання задачі аерофотозйомки або доставки вантажів.
2. Виділення об’єктів, які слід відвідати; визначення відрізків шляху, рух по яких виконуватиметься на автопілоті; розрахунок часу і місця ретрансляції даних.
3. Визначення послідовності запуску БПЛА у групі.
4. Передача у БПЛА ідентифікаційних даних на старті.
5. Початок польоту. Початок циклу розв’язування задачі маршрутизації пакетів даних і мультилатерації. Обмін пакетами службових даних з пунктом керування та іншими БПЛА або БНР у мережі.
6. Отримання команд корекцій польотного завдання з пункту управління, на якому

розв'язується транспортно-комунікаційна задача оптимізації.

7. Трансляція відео на пункт керування.

8. Виконання операцій посадки БПЛА після завершення завдання.

7. Висновки

У результаті виконаної формалізації транспортно-комунікаційної задачі (ТКЗ) обстеження певної території її було зведено до класичної оптимізаційної задачі на просторі перестановок. Це дозволить значно спростити розв'язок описаної задачі маршрутизації ТКЗ. Виконана формалізація задачі маршрутизації ТКЗ із часовими вікнами буде застосована для побудови алгоритмів розв'язання відомих задач на практиці. Оптимізаційну задачу можна розв'язувати [12] методом повного перебору при малій кількості БПА або за алгоритмом Дейкстри. Оптимізація руху групи БПЛА по декількох пунктах призначення дозволить скоротити час підготовки польотних завдань та підвищити економічну ефективність використання групи.

Для розв'язання транспортно-комунікаційної задачі розроблено алгоритм маршрутизації для задачі аерофотозйомки та доставки з частковим рухом на автопілоті. Особливостями алгоритму є сумісне розв'язання задачі маршрутизації пакетів даних у спеціалізованій мережі і маршрутизація руху групи БПЛА та ретрансляція у мережі БПЛА даних телеметрії, керування, аерофотозйомки, а також зміни польотних завдань за зоною контролю пункту керування для членів груп БПЛА.

Виконані дослідження дозволяють підвищити ймовірність передачі інформації завдяки децентралізації вузлів зв'язку, багатократному резервуванню маршрутів пакетів даних і стійкості системи до втрати елементів або втрати комунікації між ними. В подальшому планується впровадити методи та алгоритми комбінаторної оптимізації на просторі перестановок для порівняльного аналізу ефективності пошуку розв'язків описаної задачі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Austin R. Unmanned Aircraft Systems. UAVs Design, Development And Deployment / Austin R. – West Sussex: John Wiley and Sons, 2010. – 365 p.
2. Tsourdos A. Cooperative Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles / Tsourdos A., White B., Shanmugavel M. – West Sussex: John Wiley and Sons, 2011. – 212 p.
3. Shima T. UAV Cooperative Decision and Control. Challenges and Practical Approaches / Shima T., Rasmussen S. – Philadelphia: SIAM, 2009. – 186 p.
4. Semsar-Kazerooni E. Team Cooperation in a Network of Multi-Vehicle Unmanned Systems / E. Semsar-Kazerooni, K. Khorasani. – New York: Springer, 2013. – 170 p.
5. Yanushevsky R. Guidance of Unmanned Aerial Vehicles / Yanushevsky R. – New York: CRC Press, 2011. – 371 p.
6. Valavanis K.P. Unmanned Aircraft Systems / Valavanis K.P., Oh P.Y., Piegl L.A. – New York: Springer, 2008. – 536 p.
7. Valavanis K.P. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles / K.P. Valavanis, G.J. Vachtsevanos. – New York: Springer, 2015. – 3015 p.
8. Гуляницький Л.Ф. Решение N-методом задачи оптимизации маршрутов транспортных средств с временными окнами / Л.Ф. Гуляницький, А.В. Самусь // Компьютерная математика. – 2012. – № 2. – С. 147 – 155.
9. A path relinking algorithm for a multi-depot periodic vehicle routing problem / R.V. Alireza, T.G. Crainic, M. Gendreau [et al.] // Journal of Heuristics. – 2013. – Vol. 19, N 3. – P. 497 – 524.
10. Огурцов М.І. Про формалізацію задачі маршрутизації транспортних засобів при обстеженні території / М.І. Огурцов, О.М. Ходзінський // Праці VIII Міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень», (Ужгород, 26 вересня – 1 жовтня 2016 р.). – Ужгород, 2016. – С. 198 – 199.

11. Корольов В.Ю. Аналіз задачі маршрутизації для тактичних мереж сил спеціальних операцій / В.Ю. Корольов // Вісник університету «Україна». – (Серія «Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика»). – 2015. – № 2 (18). – С. 64 – 76.
12. Гуляницький Л.Ф. Прикладні методи комбінаторної оптимізації: навч. посіб. / Л.Ф. Гуляницький, О.Ю. Мулеса. – К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2016. – 133 с.

Стаття надійшла до редакції 26.01.2017