

## ЗАДАЧІ УПРАВЛІННЯ ТОПОЛОГІЄЮ МЕРЕЖІ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ МОБІЛЬНОГО КОМПОНЕНТА МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Сучасні принципи організації зв'язку та технічне оснащення підрозділів зв'язку не дозволяють повністю задовольнити потреби управління військами сучасного бою, що характеризується високою динамікою та розгортається на значних географічних територіях. Тому в цей час розробляється концепція побудови мобільного компонента (МК) мереж зв'язку військового призначення (МЗВП). Передбачається, що архітектура МК МЗВП буде складатися із трьох основних рівнів (рис. 1) [1]: 1-й – радіомережі мобільних абонентів (МА) – військовослужбовець, БМП, танк й ін.; 2-й – мережі мобільних базових станцій (МБС), що утворять опорні мережі в різних географічних зонах бойових дій; 3-й – повітряна мережа безпілотних літальних апаратів, що забезпечує зв'язність між даними зонами. Додатковий (нульовий) рівень можуть утворювати сенсорні мережі.

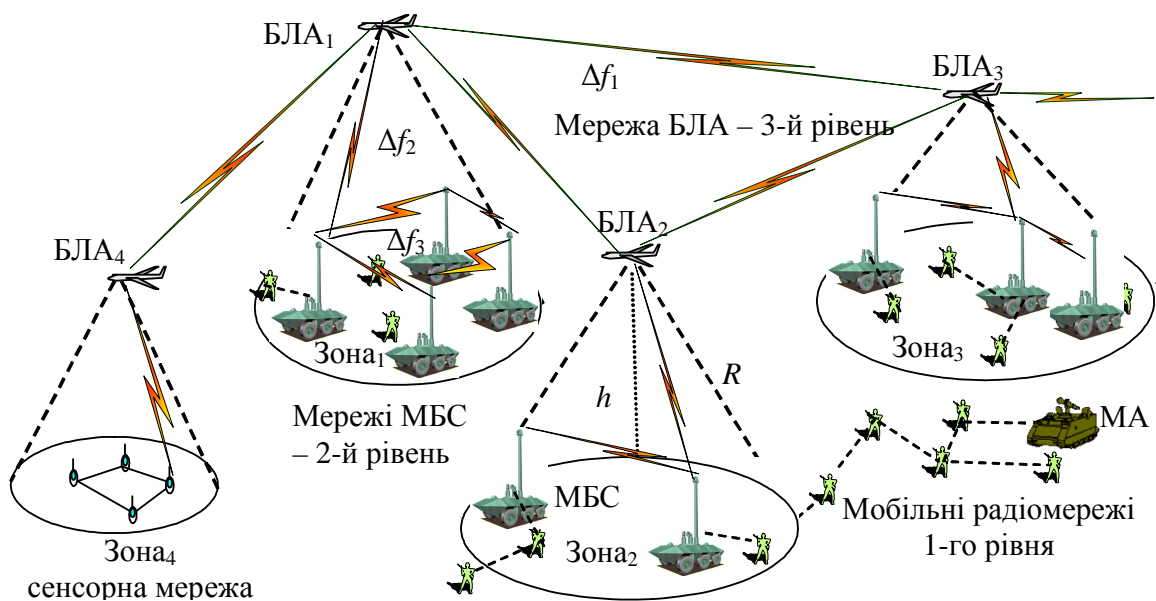


Рис. 1. Приклад архітектури мобільного компонента МЗВП із використанням мережі БЛА

Під терміном безпілотний літальний апарат (БЛА) або UAV (Unmanned Air Vehicle) розуміються дистанційно пілотовані та автономно (програмно) керовані літальні апарати. Позитивні якості військових БЛА, які призначені в основному для виконання завдань розвідки, підтверджені під час останніх локальних війн і конфліктів. Перспективні проекти покладають на БЛА наступні завдання [2]: керування вогнем і цілевказівка; нанесення ударів по наземних цілях; боротьба з повітряними цілями; придушення ППО супротивника; оцінка результатів ударів, нанесених по супротивнику; ретрансляція повідомлень й ін.

Також БЛА можуть використовуватися у цивільних цілях – для оперативного рішення широкого кола завдань: від розвідки й аерофотознімання до моніторингу районів пожеж, великих екологічних катастроф й аварій. У цей час в

Україні різними підприємствами проектуються та створюються окремі зразки БЛА цивільного призначення, у тому числі для створення повітряної мережі передачі даних [3].

У розвиток запропонованих підходів використання окремих БЛА як повітряні ретранслятори (маршрут передачі:  $MA_1$ - $MBC_1$ -БЛА- $MBC_k$ - $MA_m$ ) доцільно об'єднати БЛА в мережу повітряних вузлів комутації пакетів (маршрут передачі:  $MA_1$ - $MBC_1$ -БЛА<sub>1</sub>-...-БЛА<sub>n</sub>- $MBC_k$ - $MA_m$ ) з реалізацією функцій маршрутизації: збір (розсилання) маршрутної інформації, її зберігання, обчислення маршрутів, ретрансляція (передача) пакетів [4, 5]. Для цього кожен БЛА повинен бути оснащений маршрутизатором і двома типами радіозасобів (з можливістю використання спрямованих антен): 1-й – для зв'язку з наземними абонентами (МБС, виділений МА або сенсор); 2-й – для взаємного обміну інформацією між БЛА.

Достоїнства застосування мережі безпілотних літальних апаратів (МБЛА) полягають у наступному:

1. Забезпечується зв'язність між географічно розділеними угрупованнями військ (зонами мобільного компонента).

2. Підвищується надійність зв'язку між МБС у межах однієї зони за рахунок появи альтернативних незалежних маршрутів передачі.

3. Підвищується продуктивність мережі за рахунок: використання радіоканалів між БЛА з більшою пропускнуою здатністю в порівнянні з радіоканалами між МБС, підвищення ефективності управління мобільним компонентом (зменшується обсяг переданої службової інформації та зменшується час її збору [3]), скорочення в кілька разів довжин маршрутів передачі інформації тощо.

4. Забезпечується задана якість обслуговування абонентів (QoS) за рахунок застосування детермінованих протоколів множинного доступу [6].

5. Забезпечується дистанційний збір розвідувальної інформації або її знімання з виділених датчиків сенсорних мереж (рис. 1).

Вузли мобільного компонента МЗВП повинні швидко адаптуватися до частих змін топології та рівня трафіка, а також ефективно використовувати обмежені мережні ресурси. У таких умовах забезпечити інформаційний обмін із заданою якістю неможливо без ефективною системою управління (СУ) мобільним компонентом, складовою частиною якої є підсистема управління МБЛА. Розглянемо класифікацію задач управління МБЛА (рис. 2).

За етапами задачі управління МБЛА діляться на задачі планування, розгортання (організаційний спосіб реалізації) і оперативного управління (організаційно-технологічний спосіб) [7].

*Етап планування* здійснюється центром управління МК МЗВП. Змістом планування є (виходячи із прогнозованої обстановки та наявних ресурсів):

1. Планування топології МБЛА (знаходження необхідної кількості БЛА, визначення їхнього місця розташування або переміщення в просторі), що реалізує певну мету управління МК виходячи з вимог до параметрів мобільного компонента та вимог щодо передачі трафіка.

2. Розподіл ресурсів (апаратних, частотних, енергетичних, просторових) МБЛА, вибір конкретних параметрів і режимів роботи технічних засобів (методів та алгоритмів управління).



Рис. 2. Класифікація задач управління мережею БЛА

*Етап розгортання* полягає в запуску заданої кількості БЛА та управлінні їхнім польотом у задані райони баражування. При цьому задачі етапу розгортання (перепланування топології) МБЛА можуть виконуватися й на етапі оперативного управління при значних змінах МК (його ушкодження, введенні нових угруповань військ й ін.). Контроль за польотом БЛА та роботою його бортових систем здійснюється із центра управління мережею.

*На етапі оперативного управління* за прийнятими критеріями ефективності постійно оцінюється стан мереж МК, і приймаються міри (відповідно до плану та реальної обстановки) по втриманню показників ефективності функціонування в заданих межах або їхній оптимізації. Задачі оперативного управління (на відмінність задач планування) вирішуються змішаним способом (централізовано/децентралізовано) у режимі реального часу, а за змістом багаторазово їх повторюють.

*За способом реалізації* частина задач оперативного управління вирішується ізольовано (окремим БЛА), а більша частина – кооперовано, сукупністю БЛА й МБС (наприклад, маршрутизація інформаційних повідомлень, розподіл радіоресурсу й ін.).

*За охопленням* задачі управління діляться на управління функціонуванням всього мобільного компонента, її зони або процесом передачі інформації між виділеними абонентами (МБС).

*За видом постановки та використовуваному математичному апарату* задачі діляться на задачі розподілу ресурсів, задачі масового обслуговування, маршрутні задачі й ін.

*По функціях* задачі управління МБЛА діляться на дві групи:

1. Спеціальні задачі управління – визначення маршрутів польоту БЛА й координація їхнього переміщення [8].

2. Універсальні задачі управління – характерні для будь-якої мобільної радіомережі [9]: управління топологією, управління маршрутизацією, управління навантаженням, управління радіоресурсом, управління енергоресурсом, управління безпекою. Однак, конкретна реалізація методів управління кожної функціональної підсистеми повинна враховувати призначення МБЛА та особливості її архітектури (розмірність, мобільність, продуктивність й ін.). Наприклад, метод

множинного доступу, реалізований на БЛА, буде централізованим на відміну від децентралізованого методу доступу, який застосовується у вузлах мобільної радіомережі 1-го рівня МК. Методи маршрутизації повинні бути орієнтовані на ієрархічну архітектуру МК і передачу повідомлень із заданою якістю (QoS). Також на МБЛА може бути покладене завдання розподілу ключів для всього МК [10].

Функціональна модель системи управління МБЛА представлена на рис. 3.

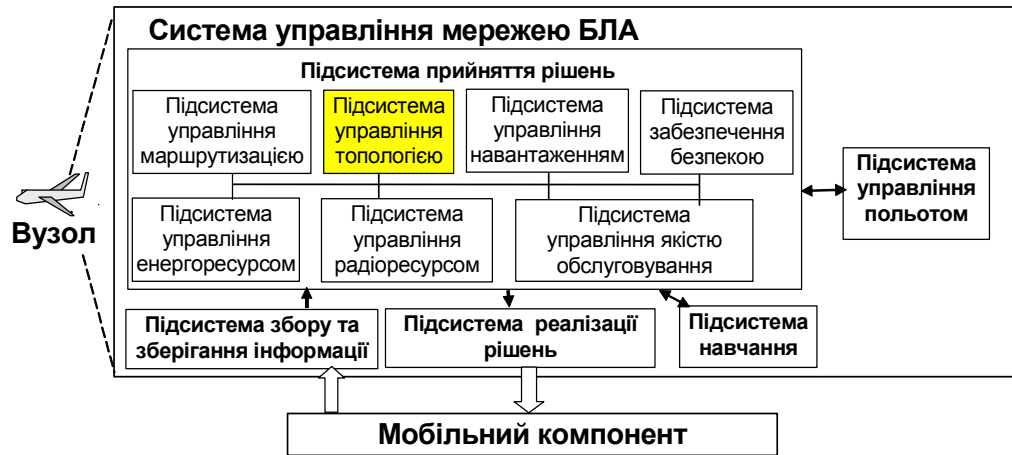


Рис. 3. Функціональна модель системи оперативного управління МБЛА

Цілями системи управління МБЛА можуть бути екстремум або підтримка (виступають як обмеження) заданих критеріїв ефективності функціонування всього мобільного компонента (її зони або між окремою парою „відправник-адресат”)  $K_i = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$ :

–  $K_1$  – якість маршрутів у всьому МК або його зони ( $K_1^1$  – довжина маршрутів передачі в зонах мережі,  $K_1^2$  – середній час доставки,  $K_1^3$  – пропускна здатність тощо);

–  $K_2$  – продуктивність всього МК або його зони;

–  $K_3$  – ступінь покриття зонами БЛА фіксованої кількості або виділених, пріоритетних МБС;

–  $K_4$  – структурна надійність (зв'язність);

–  $K_5$  – кількість БЛА;

–  $K_6$  – безпека й т.д.

Наявність сукупності критеріїв ефективності обумовлює багатокритеріальний характер задач управління та значно ускладнює розробку формальних методів. Для рішення здійснення управління пропонується визначити головний критерій ефективності (виходячи з поточної ситуації на МК), який підлягає оптимізації, а інші переводити в розряд обмежень. Для цього пропонується використати метод ієрархічного цільового динамічного оцінювання альтернатив [11].

Метою статті є розгляд часткових задач синтезу топології МБЛА, реалізованих відповідною підсистемою СУ (рис. 3, 4).

Залежно від основного критерію ефективності розрізняють наступні варіанти постановки задач синтезу топології МБЛА [12]:

– за критерієм мінімуму використовуваного апаратного ресурсу – знайти зв'язну топологію з мінімальною кількістю БЛА при заданих обмеженнях (в якості обмежень можуть виступати кожний із критеріїв ефективності);

- за критерієм зв'язності (структурної надійності) – знайти зв'язну ( $v$ -зв'язну) топологію мережі при заданих обмеженнях;
- за критерієм часу – знайти зв'язну топологію мережі, що забезпечує мінімізацію максимальної затримки передачі повідомлень у мережі при заданих обмеженнях.

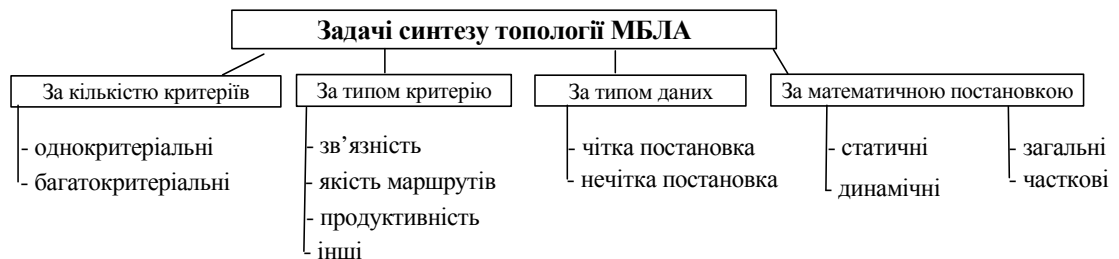


Рис. 4. Класифікація задач синтезу топології МБЛА

Важливою особливістю задач управління є динамічний характер МБЛА. Тому доцільно розглядати мережу як систему, що розвивається, – побудова мережі представляє багатоетапний процес її розвитку з деякої початкової топології в кінцеву. Звідси впливає постановка задачі динамічного програмування: задана загальна кількість БЛА на операцію. Потрібно розподілити їх за етапами (число в загальному випадку невідомо) таким чином, щоб забезпечити оптимум прийнятого критерію ефективності.

Показниками оцінки ефективності результату процесу управління МБЛА можуть виступати ступінь досягнення й час виконання  $i$ -ї задачі (мети) управління.

Необхідно відзначити, що синтез топології мереж великої розмірності нашоюхується на ряд труднощів, пов'язаних з великою розмірністю МК, багатоекстремальністю розв'язуваної задачі та недовершеністю існуючих методів оптимізації [12]. Перераховані труднощі викликають необхідність використання декомпозиційного підходу: загальна задача синтезу топології розбивається на ряд підзадач за певними пріоритетами критеріїв ефективності. Зазначені часткові задачі синтезу не є незалежними. Для цього на етапі проектування мережі будується граф у вигляді мережі цілей, вершинами якого позначені цілями, а дуги відображають вплив досягнення підцілі (часткові задачі управління) у ціль (основна задача) [11].

Рішення перерахованих часткових задач, у сукупності складає загальну задачу синтезу, та здійснюється, як правило, з використанням наближених евристичних методів.

Розглянемо часткову задачу синтезу топології СРБА за критерієм зв'язності (здатність будь-якої пари вузлів здійснювати інформаційний обмін, використовуючи проміжні вузли як ретранслятори). Зв'язність виступає як основний критерій до мобільного компонента МЗВП. Тому, першочерговою метою управління топологією МБЛА є забезпечення зв'язності всіх (певних зон) МК або пріоритетних абонентів.

Введемо позначення: множина мобільних базових станцій  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b\}$ ,  $i = \overline{1, I}$  і їхнє положення на місцевості  $X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x\}$ ; множина кластерів  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_J\}$ ,  $j = \overline{1, J}$  і  $q_j$  – число МА в кожному

кластері (кластер – окремий підграф мережі МБС, у якому фіксована підмножина МБС  $B_q^j$  зв'язана між собою за допомогою наявних маршрутів передачі й не пов'язані з іншими МБС);  $h = \text{const}$  – висота польоту БЛА (будемо вважати, що всі МБС перебувають на однаковій висоті);  $r_u, r_b, R$  – максимальні дальності радіозв'язку між БЛА-БЛА, МБС-МБС і БЛА-МБС, відповідно (у припущенні граничної моделі радіоканалу),  $r_u > r_b$ ;  $r_z = \sqrt{R^2 - h^2}$  – максимальний радіус зони покриття БЛА; множина БЛА  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u\}$ ,  $k = \overline{1, K}$  і проекція їхнього положення на місцевості  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k, \dots, y_K\}$ .

Постановка задачі: *забезпечити зв'язну топологію МК мінімальною кількістю БЛА*. Тобто необхідно знайти мінімальну кількість БЛА й розташування їхніх проєкцій на місцевості (центрів зон з радіусом  $r_z$ ), за умови, що хоча б одна МБС кожного кластера належить зоні покриття БЛА (рис. 5).

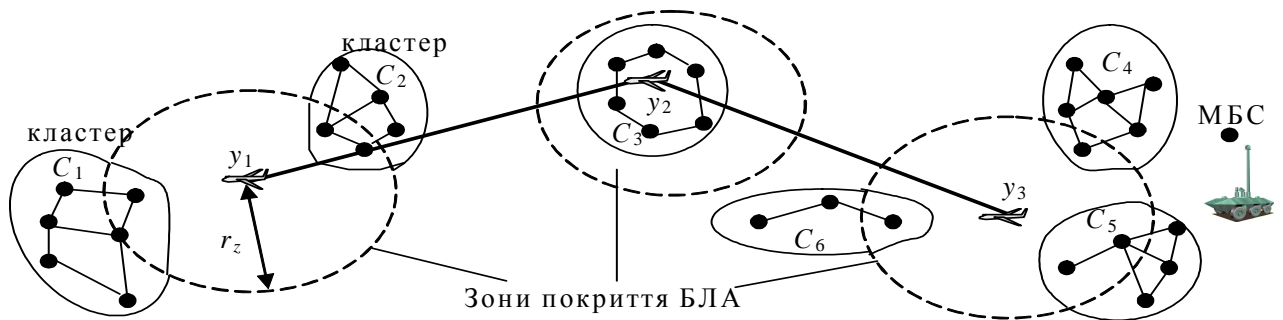


Рис. 5. Шість кластерів покриті трьома БЛА

Математична постановка задачі формулюється в такий спосіб

$$\min K, \quad (1)$$

при виконанні обмежень

$$\min_{y_1, y_2, \dots, y_K} \max_j \min_{x \in C_j} |x - y_k| \leq r_z, \quad k = \overline{1, K}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (2)$$

$$|y_k - y_v| \leq r_u, \quad k, v \in U \quad k \neq v, \quad (3)$$

де  $|x - y|$  – Евклідова відстань між крапками  $x$  та  $y$  на місцевості.

Нерівність (2) – максимальна відстань між центром зони покриття та кластерами повинне бути мінімізоване. Нерівність (3) визначає необхідність підтримки зв'язності (мінімальної відстані  $r_u$ ) між БЛА.

Ця задача відноситься до класу обчислювальної геометрії та близька до задачі розміщення  $p$ -центрів відповідного графа – знаходження мінімальної кількості кіл фіксованого радіуса і їхнього положення, що покривають задану кількість крапок [12]. Задача є  $NP$ -повною [12]. Тому одержання точного рішення для мереж великої розмірності є скрутним і для її рішення необхідно використовувати евристичні методи. Загальний алгоритм пошуку  $p$ -центрів описаний в [12].

Однак, на відміну від задачі пошуку  $p$ -центрів наша задача ускладнюється зняттям обмеження на розташування  $p$ -центрів у вершинах (ребрах) графа, і необхідністю забезпечення зв'язності між БЛА.

Загальний алгоритм знаходження топології БЛА полягає в наступному.

1. Одержання початкового рішення (початкової топології).

Знаходження „центрів мас” кожного кластера  $C_j^0$ ,  $j = \overline{1, J}$ .

Знаходження центра зони покриття, як центра покриття центрів мас  $C_j^0$ .

2. Пошук нового рішення, що задовольняє виразам (2) і (3).

3. Аналіз отриманого рішення. Якщо поліпшення рішення можливо, то перехід до кроку 2, інакше – КІНЕЦЬ.

Число ітерацій алгоритму сильно залежить від варіанта початкового рішення. Розглянемо ще кілька постановок задач синтезу топології МК.

Постановка задачі: *знайти зв'язну топологію МК, яка мінімізує (обмежує) довжину маршрутів передачі між виділеними МБС.*

Математична постановка

$$\min L(b_j, b_t) \text{ або } L(b_j, b_t) \leq L_{\max},$$

при виконанні обмежень

$$|x_i - y_k| \leq r_z, k = \overline{1, K}, j = \overline{1, J},$$

$$|y_k - y_v| \leq r_u, k, v \in U, k \neq v,$$

де  $i$  – виділений вузол,  $L(b_j, b_t)$  – довжина маршруту між  $j$ -ої МБС й  $t$ -ої МБС, у тому числі й через БЛА.

Постановка задачі: *знайти зв'язну топологію МК, що забезпечує максимальну продуктивність МК.*

Очевидно, що ця задача є загальною та для її рішення вона повинна бути декомпозована та погоджена за рядом підзадач, конкретний перелік яких і математична постановка визначається ситуацією на мережі, наявністю ресурсів і типом вихідних даних. Тобто рішення загальної задачі буде представляти цільову ієрархію послідовності часткових задач управління [11], кожна з яких повинна враховувати:

– параметри всієї МК (надійності, безпеки й ін.), параметри кожного рівня МК (пропускні здатності радіоканалів всіх рівнів, розмірності мереж, граничне число абонентів на кожен МБС, навантаження й т.д.)

– наявні ресурси кожного рівня МК (апаратурний ресурс – кількість БЛА, МБС і МА; математичне забезпечення управління – множина методів та алгоритмів управління інших функціональних підсистем СУ; часовий ресурс й ін.);

– вимоги щодо обслуговування абонентів (тип трафіку, навантаження й ін.).

Для рішення задачі знаходження топології пропонується використати евристики (правила), об'єднані в базу правил (складають основний елемент системи підтримки прийняття рішень [14] центру управління МК). Кожне правило залежно від цілі управління припускає реалізацію певного керуючого впливу: переміщення БЛА, зміна потужності передачі або діаграми спрямованості інтелектуальної антени БЛА. Правила об'єднані в групи, кожна з яких домагається досягнення певної цілі (часткової постановки задачі). Для виключення комбінаторного вибуху пропонується використати мета-правила [15], що встановлюють порядок застосування груп правил у залежності від ієрархії цілей (підцелей) управління.

Таким чином, уперше запропонована класифікація задач управління мережею БЛА та здійснена математична постановка задач синтезу її топології. Тому, що дані задачі належать до класу NP-повної, то для їх рішення запропоновані евристики (правила), що дозволяють здійснювати пошук топології, яка задово-

льняє заданим цілям управління. Подальшим напрямком досліджень є оцінка ефективності запропонованих правил синтезу топології мережі БЛА з метою вироблення цільової ієрархії системи управління.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Романюк В.А.* Напрямки розвитку тактичних систем зв'язку // II Науково-технічна конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”. – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2004. – С. 23 – 33.
2. *Марченко О.В., Кулешин В.В., Коцуренко Ю.В.* Класифікація та тенденції створення безпілотних апаратів військового призначення // Наука і оборона. – 2005. – № 1. – С.47 – 54.
3. *Ілюшко В.М., Нарытник Т.Н.* Система передачі даних на базі висотного беспілотного летального апарата (СПД Фаэтон) // Зв'язок. – 2004. – № 7. – С. 38 – 39.
4. *Романюк В.А.* Постановка проблеми маршрутизації інформаційних потоків у мережах радіозв'язку з динамічною топологією // Збірник наукових праць № 1. – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2003. – С. 112 – 119.
5. *Романюк В.А.* Иерархическая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2002. – № 1. – С. 38 – 42.
6. *Миночкин А.И., Романюк В.А.* Методы множественного доступа в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2004. – № 2. – С. 46 – 50.
7. *Романюк В.А.* Класифікація і загальна характеристика задач управління тактичними автоматизованими мережами радіозв'язку // Праці КВІУЗ № 4. – К.: КВІУЗ. – 1999. – С. 3 – 7.
8. *Basu P., Redi J., Shurbanov V.* Coordinated Flocking of UAVs for Improved Connectivity of Mobile Ground Nodes // In Proceedings of IEEE MILCOM'04, 2004.
9. *Миночкин А.И., Романюк В.А.* Методология оперативного управления мобильными радиосетями // Зв'язок. – 2005. – № 2. – С. 53 – 58.
10. *Kong J., Luo H., Xu K., Gu D.-L., Gerla M.* Adaptive Security for Multi-layer Ad-hoc Networks // Wireless Communications and Mobile Computing, 2002.
11. *Тоценко В.Г.* Методы и системы поддержки принятия решений: алгоритмический аспект. – К.: Наукова думка, 2002. – 381 с.
12. *Зайченко Ю.П., Гонта Ю.В.* Структурная оптимизация сетей ЭВМ. – К.: Техника, 1986. – 168 с.
13. *Кристофидес Н.* Теория графов. Алгоритмический подход. – М.: Мир, 1978.
14. *Герасимов Б.М., Дивидинюк М.М., Субач И.Ю.* Системы поддержки принятия решений: проектирование, применение, оценка эффективности. – Севастополь: СНИЯЭиП, 2004. – 31 с.
15. *Миночкин А.И., Романюк В.А.* Управление топологией мобильной радиосети // Зв'язок. – 2003. – № 2. – С. 28 – 33.