

УДК 621.396.4

Валуйський С.В., к.т.н.;
Романюк А. В.;
Петрова В.Н.,
ІТС НТУУ “КПІ”

ВДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ЕПІЗОДИЧНИХ РАДІОМЕРЕЖ З УПРАВЛІННЯМ ПОЛОЖЕННЯМ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ

Розроблено вдосконалений метод підвищення пропускної здатності епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ.

Разработан усовершенствованный метод повышения пропускной способности эпизодических радиосетей с управлением положением телекоммуникационных аэроплатформ.

Proposed an improved method of increasing capacity mobile ad-hoc networks with position-controlled unmanned aerial vehicle.

Вступ. Різноманітні надзвичайні ситуації та військові конфлікти приводять до руйнувань систем зв'язку та телекомунікаційних систем. Для забезпечення зв'язку в таких районах для мобільних служб можливо використання епізодичних радіомереж (ЕРМ) з використанням телекомунікаційних аероплатформ (ТА). ТА призначені для забезпечення зв'язності мереж мобільних абонентів та підвищення ефективності їх функціонування. Особливо актуальним є використання невеликих безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які є більш доцільними з економічної точки зору і можуть бути розгорнуті оперативніше висотних аероплатформ. Такі мережі застосовуються рятувальними службами, для збору інформації в місцях надзвичайних ситуацій, для зв'язку між транспортними засобами, військовими підрозділами [1, 2] та ін. Топологія мобільних радіомереж носить динамічний характер, а отже потребує ефективної системи управління (СУ), що могла б швидко реагувати на структурні та функціональні зміни, забезпечуючи ті чи інші цілі управління. Такими цілями управління можуть бути забезпечення зв'язності (структурної надійності), якості маршрутів передачі даних між абонентами (QoS), підвищення (забезпечення) пропускної здатності мережі, тривалості її функціонування та ін. Управляючими параметрами у даному випадку можуть виступати потужність передавачів, діаграми спрямованості наземних і бортових антен, рівень навантаження, взаємне положення вузлів та ін. Запропоновані на сьогодні методи, що

зкладаються в СУ топологією (місцеположенням) ТА, вирішують лише часткові задачі забезпечення геометричної зв'язності роз'єднаних компонентів мережі, не враховуючи обмеження ємності каналних ресурсів, розподілу навантаження та обслуговування пакетів в вузлах мережі. Також більшість методів вирішують лише статичні задачі, не враховуючи характер мобільності абонентів та маневреність БПЛА, а отже підлягають вдосконаленню. Для оптимального використання ресурсів таких радіомереж виникає актуальна наукова задача – розробка методу підвищення пропускної здатності ЕРМ з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ.

Аналіз досліджень і публікацій. В роботах [1-8] проведений аналіз різних методів управління, отримані різноманітні алгоритми управління, пошуку оптимального положення ТА, але вони не враховують можливості перерозподілу трафіку між вузлами мережі при перевантаженні вузла-ретранслятора і потребують доопрацювання.

Постановка завдання. Таким чином, метою даної роботи є розробка методу підвищення пропускної здатності епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ при урахуванні рівня завантаженості вузлів мережі в умовах швидкого і непередбачуваного переміщення абонентів.

Вихідні дані та обмеження

Задані:

1) Мобільні абоненти в мережі $i = \overline{1, N}$; $N < 500$; їх координати (x_i, y_i) ; швидкість переміщення $v_i = const$.

ТА: $k = \overline{1, K}$, $K = 10$; потужність передавача $P_k = const$, h – висота баражування БПЛА,

В цих умовах ЕРМ представляється у вигляді стохастичного ненаправленого зваженого графу $G(V, E)$, що складається з множини вершин (МА та БПЛА) $V = \{v_i\} \cup \{b_k\}$ та множини ребер $E = \{(i, j) | d_{ij} \leq d^0\} \cup \{(i, k) | R_{ik} \leq R^0\}$, i, j – множина вузлів, k – множина БПЛА (рис. 1), що визначають $C = \|c_{ij}\|$ – матриця зв'язності, де $c_{ij} = \{0, 1\}$ – булева змінна. У якості ваги ребра виступає протяжність відповідної радіолінії d_{ij} між МА, D_{ik} – між МА та БПЛА, d^0 – максимальна відстань між i -м та j -м МА, R_{ik} – відстань між i -м МА та точкою проекції положення k -ого БПЛА на земній поверхні, R^0 – граничне значення R_{ik} , D^0 – максимальна відстань між i -м МА та k -м БПЛА,

2. Відомі $\Gamma = \|\gamma_{ab}(t)\|$ – матриця тяжіння, де γ_{ab} – середня інтенсивність потоку пакетів (на ЧНН), що надходить в маршрут m_{ab} між парою відправник-адресат $a-b$, $\Pi = \|l(m_{ab})\|$, $a, b = \overline{1, N}$ – маршрутна таблиця

найкоротших шляхів, де $l(m_{ab})$ – кількість ретрансляцій в маршруті. Позначимо: t_3 – час затримки, $T_{зв}^0$ – мінімальне значення тривалості зв'язності сусідніх вузлів, s^0 – мінімально допустиме значення пропускної здатності (ПЗ) маршруту, t_3^0 – максимально допустиме значення затримки передачі в маршруті m_{ab} .

В мережі функціонує один з протоколів маршрутизації (наприклад, OLSR), який дозволяє отримувати вузлам найкоротші маршрути по критерію мінімуму ретрансляцій, службове навантаження враховувати не будемо.

3. В ЕРМ використовуються протоколи множинного доступу: множинний доступ із сигналом «зайнято» між МА-МА; адаптивний протокол із резервуванням – МА-БПЛА-МА; FDMA (множинний доступ із розділенням каналів за частотою) – БПЛА-БПЛА.

Всі МА працюють на одній частоті f_1 , ТА працюють на різних частотах прийому і передачі з МА, ТА працюють на різних частотах між собою; висота баражування БПЛА:

Канал МА-МА: напівдуплексний одно частотний (f_1). Канал МА-БПЛА-МА: дуплексний двох частотний (f_2-f_3). Канал БПЛА-БПЛА: дуплексний багато частотний.

4. Топологія мережі відома та під час аналізу не змінюється. За час збору вихідних даних, виконання розрахунків та виведення БПЛА у задану позицію, топологія мережі не зміниться значним чином.

Необхідно: знайти в режимі реального часу координати положення БПЛА у просторі X_{0k} , $k = \overline{1, K}$ (матрицю зв'язності C^*), що забезпечує максимум пропускної здатності мережі $S(C)$:

$$C^* = \arg \max_{X_0 \in \Omega_{1,2,3}} S(C) = \arg \max_{X_0 \in \Omega_{1,2,3}} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N s(m_{ab}), a \neq b \quad (1)$$

при винонанні обмежень:

$$\Omega_1 : \{d_{ij} \leq d^0, D_{ik} \leq D^0, T_{зв\ ij} \geq T_{зв}^0 \quad \forall i, j \in m_{ab}\},$$

Пропускнуну здатність мережі у даному випадку можна визначити, як сумарну пропускнуну здатність усіх маршрутів мережі, тобто

$$S(C) = \sum_{m=1}^M \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N s(m_{ab}), a \neq b, \text{ де } s(m_{ab}) = \min_{(i,j) \in m} \{s(c_{ij})\}. \quad (2)$$

де c_{ij} – ПЗ радіоканалу i - j .

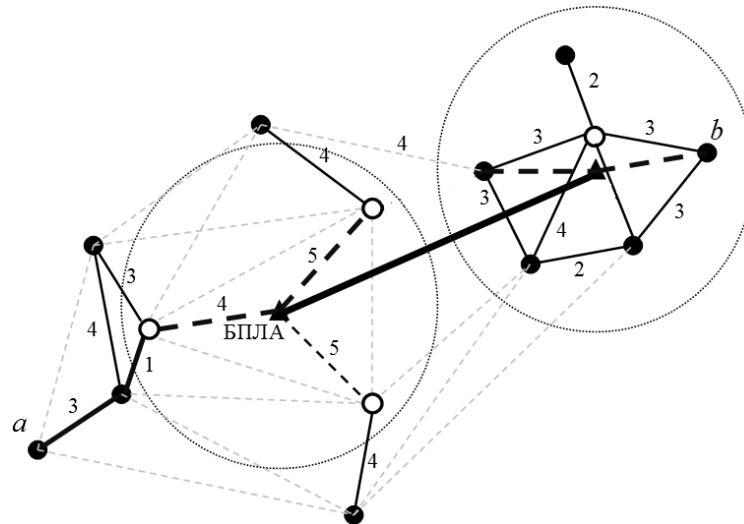


Рис. 1. Приклад графу $G(V,E)$ ЕРМ з 14 наземних вузлів та двох БПЛА

Метод підвищення пропускної здатності ЕРМ з управлінням положенням ТА

Для вирішення поставленої математичної задачі (1) запропонован метод на основі управління положенням телекомунікаційних аероплатформ ЕРМ, який представлений у вигляді схеми-алгоритму на рис. 2.

Запропонований метод складається з таких основних складових, поєднаних в єдину обчислювальну процедуру [8]:

1. Удосконалена математична модель оцінки зв'язності вузлів ЕРМ із телекомунікаційними аероплатформи.

2. Уточнені математичні моделі оцінки показників функціонування ЕРМ із телекомунікаційними аероплатформи.

3. Удосконаленого алгоритму пошуку квазіоптимального положення телекомунікаційних аероплатформ, загальна схема якого показана на рис. 3.

Цикл управління топологією (місцеположенням) мережі ТА включає в себе наступні кроки:

Крок 1. Збір інформації про початкову топологію мережі та ввід вихідних даних (на етапі планування) (блок 1):

- параметрів наземних вузлів: $N, (x_i, y_i), S_i, i = \overline{1, N}$, та виведених попередньо БПЛА: $(x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}), S_{0j}, j = \overline{1, K}$ (отримані через систему збору інформації по окремому каналу);

- допустимих значень параметрів: $d^0, s^0, t_3^0 (l^0), D^0(R^0), r$;

- кількість БПЛА на операцію K ;

- параметри протоколу МД та протоколу маршрутизації.

Крок 2. Зазначені вище параметри та їх обмеження визначають початкову топологію мережі БЕМ (безпроводової епізодичної мережі) без застосування БПЛА $C_k, k = \overline{1, K}$, де $k=0$ – номер ітерації пошуку рішення.

Крок 3. Аналіз наявності структурної зв'язності (блок 3):

1. Розрахунок параметрів d_{ij}, D_{ik}, D_{kl} .

2. Перевірка виконання обмежень Ω_1 . Якщо умови виконуються (блок 16), перехід до кроку 5, інакше переходимо на крок 4.

Крок 4. Пошук нової топології по забезпеченню зв'язності (блок 4). Застосування сукупності правил [8], які дозволяють переміщенням БПЛА забезпечити зв'язність структурних компонент. Якщо зв'язність забезпечити неможливо, то КІНЕЦЬ.

Крок 5. Перевірка часу затримки в маршрутах (блок 5):

1. Розрахунок параметру функціонування мережі $t_3(l(m_{ab}))$ згідно співвідношень [9].

2. Якщо не виконується умова $t_3(m_{ab}) \geq t_3^0$, відбувається перевірка на перевантаженість вузлів (блок 6)

3. Якщо вузли перевантажені, то відбувається пошук рішень по перерозподілу навантаження згідно правила 4, яке розглянуто нижче (блок 14). Інакше відбувається пошук рішень по забезпеченню необхідного часу затримки t_3^0 [8].

4. Якщо рішення знайдено, відбувається його реалізація (блок 13), інакше відбувається пошук нового рішення.

Крок 6. Перевірка необхідної ПЗ маршрута (m_{ab}) (блок 9):

1. Розрахунок параметру функціонування мережі $S(m_{ab})$ згідно співвідношень [9].

2. Якщо не виконується умова $S(m_{ab}) \geq S^0$, відбувається перевірка на перевантаженість вузлів (блок 10)

3. Якщо вузли перевантажені, то відбувається пошук рішень по перерозподілу навантаження згідно правила 4, яке розглянуто нижче (блок 14). Інакше відбувається пошук рішень по забезпеченню необхідного часу затримки S^0 [8].

4. Якщо рішення знайдено, відбувається його реалізація (блок 13), інакше відбувається пошук нового рішення.

Крок 7. Реалізація рішення та вивід БПЛА у знайдену точку (блок 15)

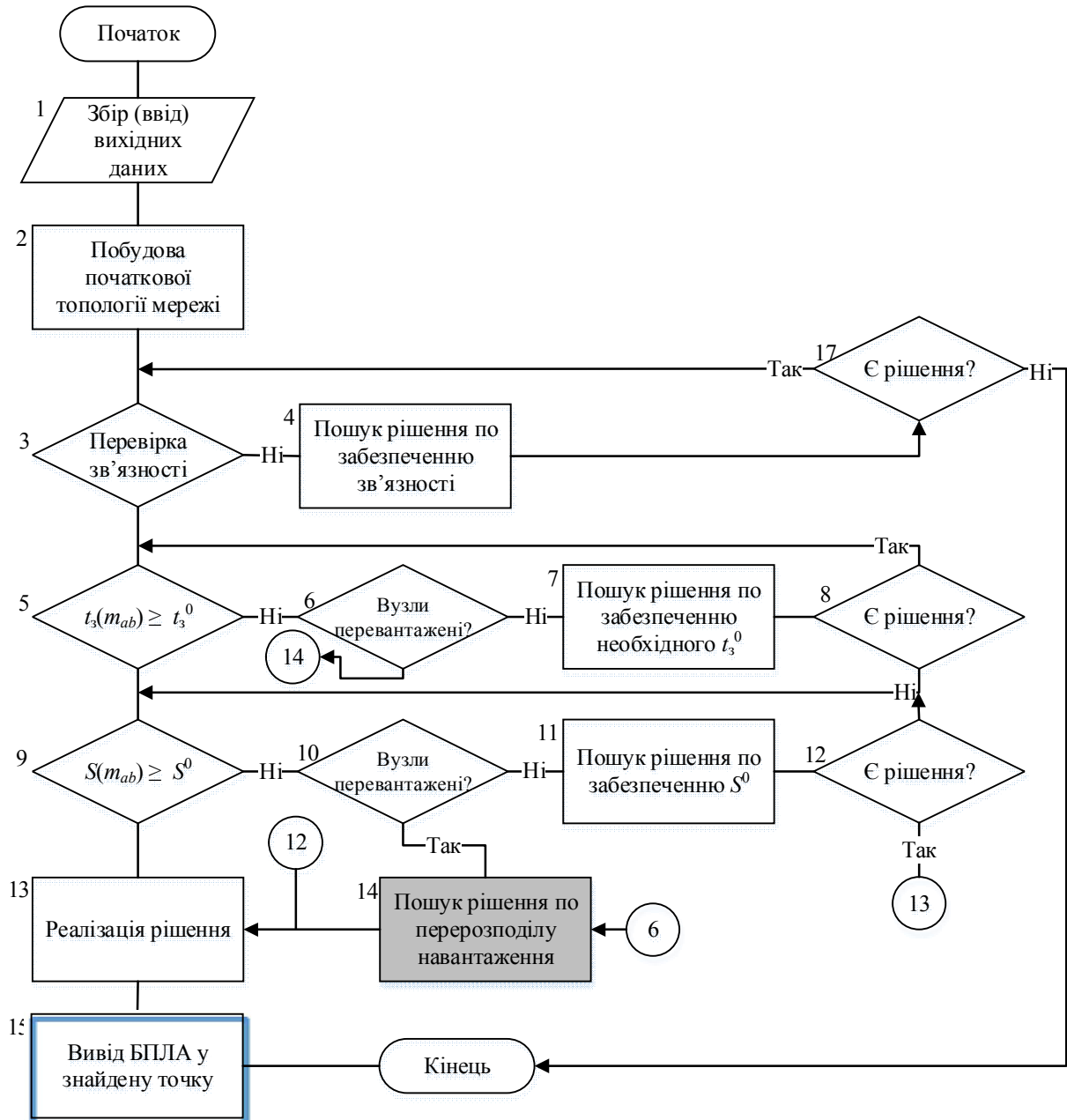


Рис. 2. Схема-алгоритм управління положенням телекомунікаційних аероплатформ ЕРМ для підвищення ПЗ мережі (продовження на рис.3)

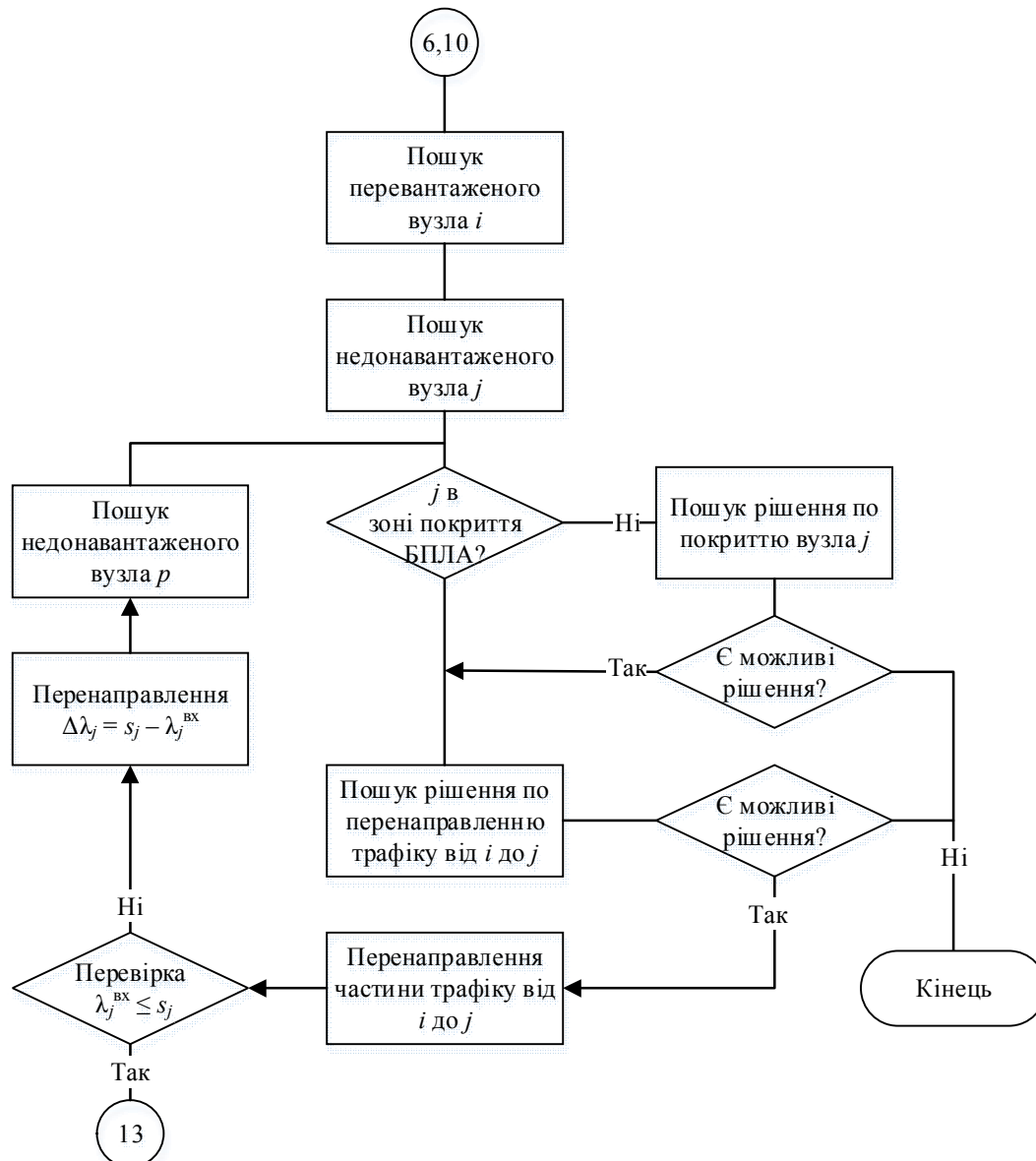


Рис. 3. Схема удосконаленого алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТА із використанням правил – блок 14 (початок на рис. 2)

Удосконалений алгоритм пошуку квазіоптимального положення телекомунікаційних аероплатформ

Задача пошуку оптимального розміщення БПЛА (матриці зв'язності C_k) відноситься до класу NP -повних. Застосування для її вирішення класичних методів приводить до експонентної складності. Отримання точного рішення для мережі, яка налічує сотні (тисячі) вузлів потребує значних затрат часу. Тому для скорочення повного перебору варіантів розміщення БПЛА пропонується використовувати сукупність правил, поєднаних в базу знань, що змінюють зв'язність мережі для підвищення пропускної здатності мережі та скорочують час обчислень. Це дозволяє отримати в реальному часі близькі до оптимальних рішення та

використовувати запропонований алгоритм для оперативного управління положенням БПЛА.

В результаті були отримані нові модифіковані правила та відповідні управлінські дії (щодо квазіоптимального розміщення БПЛА у просторі) [8]:

Правило №1. Якщо кількість компонент зв'язності (незв'язних підграфів) графу мережі $k > 1$, тоді телекомунікаційну аероплатформу (ТА) необхідно розмістити так, щоб з'єднати якомога більшу кількість компонент зв'язності.

Мета-правило №1. Якщо є декілька варіантів розміщення ТА, що поєднує однакову кількість компонент зв'язності, то обрати той, що покриває більшу кількість вузлів цих компонент.

Правило №2. Якщо середня затримка передачі (кількість ретрансляцій) в деяких маршрутах більше необхідної, тоді ТА необхідно розмістити так, щоб зменшити середню затримку передачі (кількість ретрансляцій) в маршруті.

Мета-правило №2. Якщо є декілька варіантів розміщення ТА, що однаково зменшує затримку в маршрутах, то слід обрати той, що дозволяє максимізувати ПЗ маршрутів.

Правило №3. Якщо необхідно підвищити пропускну здатність мережі, то ТА необхідно розмістити таким чином, щоб покрити максимальну кількість перевантажених вузлів мережі.

Але ці правила не враховують ситуації, коли перенавантажений вузол може бути розвантажений за допомогою перенаправлення трафіку на недовантажений вузол по іншому маршруту з використанням БПЛА, тому потребують додаткового правила, яке буде включати в себе таку ситуацію.

Правило №4. Якщо вузол i перевантажений, то знайти найближчий до нього неперевантажений вузол j в зоні покриття БПЛА (при відсутності такого вузла перемістити БПЛА, щоб забезпечити покриття вузла не порушуючи якість функціонування), перенаправити трафік з перенавантаженого вузла i до j (рис.4).

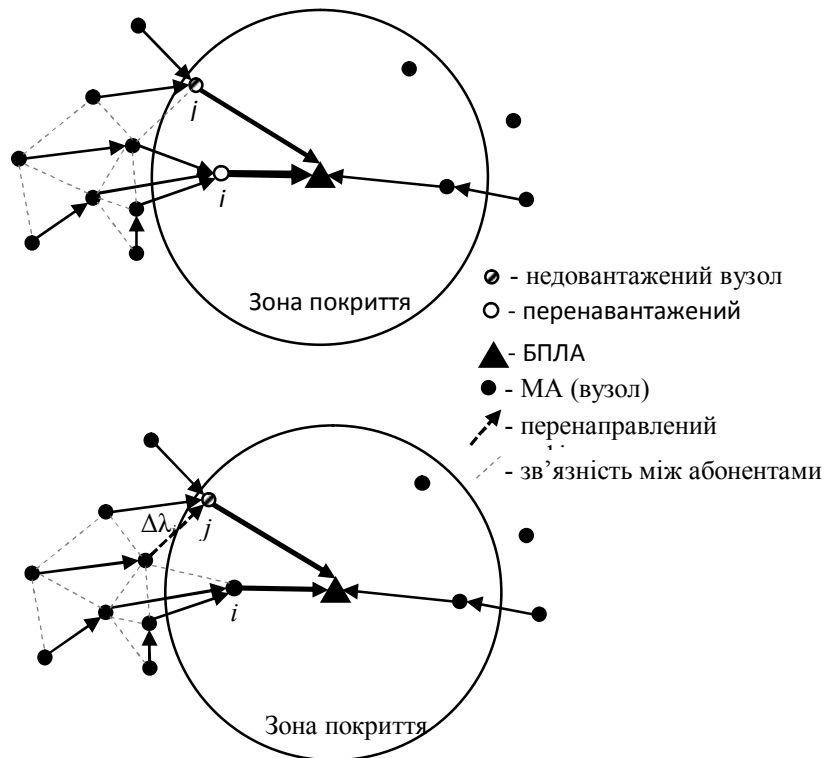


Рис. 4. Приклад перенаправлення трафіку між вузлами ЕРМ згідно правила 4.

Для реалізації правила необхідно:

1. Знайти перевантажений вузол i $\lambda_i^{BX} \gg s_i$
2. На основі матриці зв'язності та матриці найкоротших маршрутів знайти найближчий недовантажений вузол j ;
3. Якщо вузол j знаходиться в зоні покриття цього БПЛА, то перехід на п.4, інакше пошук рішення на переміщення БПЛА для покриття вузла j .
4. Пошук рішення по перенаправленню частини трафіку $\Delta\lambda_i = \lambda_i^{BX} - s_i$ від вузла i до j .
5. Якщо п.4 не приведе до перевантаження вузла j , рішення по перенаправленню трафіку знайдено, перехід на п.6.
- Інакше на цей вузол перенаправляється частина трафіку $\Delta\lambda_j = s_j - \lambda_j^{BX}$, здійснюється пошук ще одного нового недовантаженого вузла p , на який перенаправляється $\Delta\lambda_p = \Delta\lambda_i - \Delta\lambda_j$, перехід до п.3.
6. Кінець.

Висновки. В роботі запропоновано вдосконалений метод підвищення пропускної здатності епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційними аероплатформами, удосконалено алгоритм пошуку квазіоптимального положення телекомунікаційних аероплатформ. Суть удосконалення алгоритму полягає в тому, що при перевантаженні вузла можливо застосувати перенаправлення трафіку між вузлами мережі. Це

дозволяє досягати максимальних значень пропускної здатності епізодичних радіомереж в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення мобільних абонентів.

В подальшому пропонується використання запропонованого методу для управління топологією (положенням ТА) для оптимізації параметрів її функціонування.

Використані джерела інформації:

1. Mladenović D., Jovanović D. Open source uav in manet combat environment // 5th international conference on defense technologies, 2012.
2. Ильченко М. Е. Телекоммуникационные системы на основе высотных аэроплатформ. / М. Е. Ильченко, С. А. Кравчук – К. : НПП „Издательство „Наукова думка” НАН Украины”, 2008. – 580 с.
3. Миночкин А. И. Управление топологией мобильной радиосети / А. И. Миночкин, В. А. Романюк // Зв’язок. – 2003. – №2. – С. 28–33.
4. Kim S. Coordinated trajectory planning for efficient communication relay using multiple UAVs / Kim S., Oh H., Suk J., Tsourdos A. // Control Engineering Practice, Volume 29, August 2014. – С 42-49.
5. Basu P. Coordinated Flocking of UAVs for Improved Connectivity of Mobile Ground Nodes / Basu P., Redi J., Shurbanov V. // Military Communications Conference, 2004. – С 1628–1634.
6. Rubin I. Placement of UAVs as communication relays Aiding Mobile Ad Hoc Wireless Networks / Rubin I., Zhang R. // Electrical Engineering Department University of California, 2007.
7. Миночкин А. И. Задачі управління топологією мережі безпілотних літальних апаратів мобільного компонента мереж зв'язку військового призначення / А. И. Миночкин, В. А. Романюк
8. Lysenko O. I. Capacity increasing of sensor telecommunication networks / Lysenko O. I., Valuiskyi S. V. // Telecommunication Sciences, 2012. – С. 5–14.
9. Романюк А. В. Методика оцінки показників функціонування епізодичних радіомереж із телекомунікаційними аероплатформами // Збірник наукових праць №1 ВІТІ НТУУ «КПІ», 2013. – С. 59–67.