

УДК 621.396.4

СТРУКТУРНО-ІНФОРМАЦІЙНА НАДІЙНІСТЬ БЕЗПРОВОДОВИХ ЕПІЗОДИЧНИХ МЕРЕЖ

О. І. Лисенко, С. В. Валуйський

Національний технічний університет України “КПІ”, Київ, Україна

Розглянуто проблему забезпечення структурної надійності безпроводових епізодичних мереж із повітряними ретрансляторами. Розроблено показники структурно-інформаційної та інформаційної зв'язності для оцінки надійності мереж. Вони враховують одночасно структурні і функціональні характеристики: навантаження, створюване вузлами мережі, спосіб організації множинного доступу, обмежені пропускні спроможності каналів. Запропоновано інтегральний показник (глобальна пакетна зв'язність), який дозволяє оцінити надійність мережі в цілому. Запропоновано спосіб підвищення надійності епізодичних мереж на основі оптимального розміщення повітряних ретрансляторів у просторі. Він заснований на розміщенні безпілотних літальних апаратів у районах, які є найбільш проблемними частинами мережі. Адаптивна зміна положення таких ретрансляторів дозволяє забезпечити і підтримувати заданий рівень надійності мережі, яка безперервно розвивається.

This paper considers the problem of ensuring the structural reliability of wireless episodic networks with aerial repeaters. The reliability indices of structural-informational and informational connectivities were developed. They take into account simultaneously both structural and functional characteristics of the network, such as: load of the nodes in the network, a way of multiple-access organizing, channels limited bandwidth. An integral index of global packet connectivity, which allows to estimate the reliability of the network as a whole is proposed. A way to improve the reliability of episodic networks based on the optimal placement of aerial repeaters in space has been proposed. It is based on the localization of unmanned aerial vehicles in areas of most problematic sections of the network. Adaptive change in the position of such repeaters in space allows to achieve and to maintain a specified level of network reliability, which is being continuously in progress.

Вступ

Телекомунікаційні системи стаціонарної мережної інфраструктури характеризуються значним надлишком надвисокочастотного обладнання. Для забезпечення потрібної якості обслуговування абонентів стаціонарні мережі повинні мати достатню потужність. Такі недоліки стаціонарної мережної інфраструктури обумовлюють необхідність пошуку інших шляхів підвищення ефективності телекомунікаційно-інформаційних технологій. Перспективним напрямком розвитку енергозберігаючих технологій є використання телекомунікаційних безпроводових епізодичних мереж (БЕМ). Вузли таких мереж мають змогу вільно переміщуватися у заданому районі та з'єднуватися безпосередньо один з одним шляхом радіозв'язку. Таким чином утворюються багатопрольотні мобільні радіомережі [1]. Через високу мобільність вузлів та нестабільність каналів зв'язку між ними структура БЕМ постійно змінюється, що значно ускладнює аналіз та забезпечення надійності таких мереж.

Структурна надійність сучасних мереж визначається наявністю або відсутністю справного шляху в заданому напрямку [2, 3]. Однак, наявність справ-

ного шляху ще не гарантує негайного встановлення з'єднання, оскільки елементи шляху можуть бути зайняті іншими абонентами для передачі або приймання інформації. Отже, актуальною задачею у руслі створення ефективних телекомунікаційних технологій є оцінка надійності безпроводових епізодичних мереж із урахуванням їх структурних та інформаційних характеристик.

Одним із шляхів підвищення структурної надійності (зв'язності) безпроводових епізодичних мереж є застосування безпілотних літальних апаратів (БЛА) у якості додаткових вузлів [4]. Архітектура безпроводової епізодичної мережі з використанням безпілотних літальних апаратів схематично зображена на рис. 1. Тут перший (наземний) рівень складає мережа мобільних абонентів (МА), що переміщуються у деякому районі площею r . Другий (повітряний) рівень складає мережа БЛА, що баражують на деякій висоті h над землею та утворюють зону покриття МА радіусом R , поєднуючи таким чином нез'єднані між собою вузли (наприклад, БЛА2 з'єднує між собою МА3 та МА4, як показано на рисунку). Кожен МА оснащений двома радіоінтерфейсами для зв'язку з іншими МА та для зв'язку з БЛА. Застосування двох окремих радіоінтерфейсів дозво-

ляє розсилати маршрутні пакети, як через наземну мережу, так і через повітряну мережу БЛА, та отримувати більшу кількість незалежних маршрутів між парою вузлів. Іншою перевагою застосування окремих радіоінтерфейсів є можливість використання різних частотних смуг для кожного інтерфейсу, що забезпечує кращу якість послуг (QoS) та баланс навантаження у мережі. БЛА у свою чергу також оснащений двома радіоінтерфейсами, що дозволяє розв'язати локальний (БЛА—МА) та міжстільниковий (БЛА—БЛА) трафіки.

Оснащені більш потужним радіоінтерфейсом БЛА мають змогу з'єднуватися з більшою кількістю вузлів, ніж наземні телекомунікаційні мережі. Це дозволяє значно підвищити структурну надійність мережі, приклад якої показано на рис. 1. Оскільки мережа постійно розвивається, виникає практичний інтерес розробки адаптивного алгоритму оптимального розміщення групи БЛА у просторі для забезпечення та підтримки заданого рівня надійності.

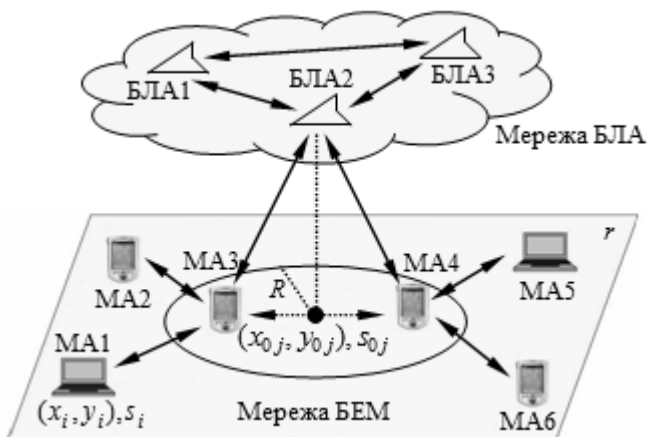


Рис. 1. Приклад архітектури БЕМ із використанням БЛА

Постановка задачі

Мета роботи — запропонувати і дослідити показники структурно-інформаційної надійності безпроводової епізодичної мережі в умовах постійної зміни структури та з урахуванням інформаційних характеристик мережі. Для досягнення поставленої мети передбачається вирішення наступних задач: обґрунтування показників для оцінки локальної та глобальної структурно-інформаційної надійності безпроводової епізодичної мережі із урахуванням її інформаційних характеристик; розробка чисельного алгоритму пошуку просторового розміщення групи БЛА, який дозволяє досягти екстремальних значень показників структурно-інформаційної надійності мережі; програмна реалізація запропонованого алгоритму, обчислювальний експеримент та аналіз отриманих результатів.

Обґрунтування показників для оцінки структурно-інформаційної надійності

Структурно-інформаційну надійність будемо визначати як об'єктивну властивість мережі забезпечувати зв'язність абонентів із якістю надання послуг QoS, не гірше заданої [5]. При цьому наявність зв'язку (зв'язності) означає існування принаймні одного справного шляху між відповідними вузлами мережі. Ймовірність такої події позначимо $P_{kl}, k, l = 1, N$, де N — кількість вузлів у мережі. Справність являє собою категорію, яка є протилежною такому поняттю, як відмова. Відмова каналу зв'язку означає такий його стан, при якому обладнання каналу повністю вийшло з ладу, або ж його параметри настільки погіршились, що подальше використання каналу неможливе.

Оскільки обладнання кожного мобільного абонента БЕМ поєднує у собі функції терміналу і вузла комутації, то вихід з ладу цього вузла призведе до одночасної відмови усіх ліній зв'язку, які до нього приєднуються. Відмова вузла призводить до порушення більшого числа шляхів, ніж відмова лінії зв'язку. Однак ймовірність відмови вузла значно менша ймовірності відмови лінії зв'язку. Тому при визначенні структурної надійності телекомунікаційної мережі будемо розглядати тільки вплив ліній зв'язку, вважаючи, що надійність вузлів дорівнює одиниці. Під надійністю лінії зв'язку між i -им і j -им вузлами p_{ij} будемо вважати ймовірність знаходження її у справному стані, яка чисельно дорівнює одиниці мінус ймовірність відмови даної лінії. Справний стан лінії зв'язку може визначатися одним або декількома показниками якості надання послуг QoS.

В залежності від типу трафіку пріоритетним показником QoS можуть бути різні параметри: гарантована достовірність (точність) передачі інформації, необхідна пропускна спроможність (потоківі мультимедіа), час затримки передачі інформації та джиттер (VoIP, відеоконференції). Найважливішим із цих параметрів для більшості типів трафіку є необхідна гарантована достовірність передачі інформації. Тому в якості пріоритетного параметру для оцінки структурної надійності лінії зв'язку будемо використовувати ймовірність помилкового прийому пакету даних P_{er} .

Оскільки ймовірність помилкового прийому пакету даних має статистичну природу, потрібен деякий час спостереження за лінією зв'язку, перш ніж визнати її несправною. Тому будемо вважати лінію зв'язку несправною, якщо протягом деякого часу t буде зберігатися нерівність $P_{er} > P_{er0}$. Тоді надій-

ність лінії зв'язку телекомунікаційної мережі можна визначити як ймовірність безпомилкового прийому пакету даних протягом часу t

$$P_{ij} = 1 - P_{erij} \quad (1)$$

Структуру мережі, що розглядається, можна представити у вигляді графу як сукупність послідовно або паралельно з'єднаних ребер (ненадійних ліній зв'язку). Тоді надійність таких структур у деякому напрямку (між вузлами k і l) визначається наступними формулами:

$$P_{kl} = \prod_{i=1}^m p_i, \quad k \neq l; \quad (2)$$

$$P_{kl} = 1 - \prod_{i=1}^n q_i, \quad k \neq l, \quad (3)$$

де m, n — кількість ребер, що з'єднані послідовно та паралельно, відповідно; p_i — надійність i -го ребра; q_i — ймовірність відмови i -го ребра.

Практично будь-який граф двополюсної мережі можна перетворити на просте послідовне або паралельне з'єднання його елементів, наприклад, шляхом використання методу розкладання Шеннона — Мура [2, 3]. Якщо надійність структури мережі P_{kl} у будь-якому напрямку kl більше заданої P_{kl0} , то мережу можна вважати структурно зв'язаною.

Однак критерій структурної зв'язності не може повністю характеризувати надійність зв'язку, оскільки він не враховує алгоритми функціонування мережі, зокрема, протокол множинного доступу, алгоритм обробки заявок на вузлах мережі, протокол маршрутизації, пропускні спроможності каналів та ін. Тому розглянемо можливість використання для оцінки надійності мережі критеріїв структурно-інформаційної та інформаційної зв'язності, що характеризують якість обслуговування запитів в умовах ненадійності елементів.

При наявності потоку інформації між двома фіксованими вузлами мережі ймовірність структурно-інформаційної зв'язності (СІЗ) між ними є ймовірність того, що в заданому інтервалі часу при надходженні чергового запиту на передачу інформації в процесі пошуку встановлення з'єднання знайдено принаймні один справний шлях між даними вузлами [5].

У якості критерію структурно-інформаційної зв'язності від вузла k до вузла l використовуємо показник:

$$H_{kl} = \frac{Z_{kl} - R_{kl}}{Z_{kl}} = \frac{C_{надх} t_c + C_{втр} t_c}{C_{надх} t_c} =$$

$$= 1 - \frac{C_{втр}}{C_{надх}} = 1 - p_c, \quad (4)$$

де Z_{kl} — навантаження, що надходить на обслуговування від вузла k до вузла l ; R_{kl} — втрачене навантаження при організації зв'язку між вузлами k і l ; $C_{надх}$ — інтенсивність потоку заявок, що надходять на обслуговування; $C_{втр}$ — інтенсивність потоку заявок, що отримали відмову в обслуговуванні; t_c — середній час обслуговування однієї заявки; p_c — відповідна йому ймовірність втрати заявок.

Для мереж з комутацією пакетів показник (4) матиме наступний вигляд:

$$H_{kl} = 1 - P_{erkl}, \quad (5)$$

де P_{erkl} — ймовірність помилкового прийому пакету даних протягом часу t , що на відміну від критерію структурної зв'язності визначається не тільки втратами на лінії зв'язку, а й інтенсивністю надходження заявок у даному напрямку, а також способом обслуговування заявок у вузлах мережі.

Це обслуговування залежить у першу чергу від обраного способу множинного доступу, що визначається технологією побудови мережі. В умовах високої мобільності вузлів, характерної для більшості БЕМ, передбачається переважно використання протоколу множинного доступу з контролем несучої (МДКН), наприклад, CSMA/CA [6]. Відповідно до даного протоколу вузли мережі здійснюють передачу сигналу на одній частоті.

Для уникнення колізій при доступі у разі надходження заявки кожен вузол перед початком передачі перевіряє канал зв'язку на наявність несучої. У випадку зайнятості каналу зв'язку вузол зберігає пакет у буфері та через певний проміжок часу знову перевіряє наявність несучої. При зайнятості каналу зв'язку вузол чекає випадковий проміжок часу, що визначається розміром "вікна змагань". Потім знову перевіряє канал зв'язку і якщо він вільний, розпочинає передачу. Колізія може виникнути лише у випадку збігу випадкових інтервалів часу, протягом яких вузли чекають доступ на передачу. Ймовірність цієї події тим менша, чим більший розмір "вікна змагань". Виходячи з цього аналізу можна визначити, що на величину P_{er} при даному протоколі множинного доступу впливають: інтенсивність надходження пакетів заявок на вузли мережі; кількість вузлів у мережі; розміри буферів вузлів мережі; розмір "вікна змагань".

Якщо припустити, що при заданій інтенсивності надходження пакетів заявок від заданої кількості вузлів мережі обрано достатньо великий розмір "вікна змагань" та вузли мають достатньо великі роз-

міри буферів, то ймовірність втрати пакету через протокол множинного доступу прямує до нуля. У цьому випадку обслуговування заявок у вузлах мережі проводиться відповідно до моделі з очікуванням без обмеження довжини черги [7]. Тоді параметр структурно-інформаційної зв'язності зводиться до параметру структурної зв'язності:

$$H_{kl} = \frac{Z_{kl} - Z_{kl}(1 - P_{kl})}{Z_{kl}} = P_{kl}. \quad (6)$$

Оцінка структурно-інформаційної зв'язності мережі в цілому проводиться по матриці $[H]$, елементами якої є значення H_{kl} , якщо $Z_{kl} > 0$. У випадку, коли $Z_{kl} = 0$, величина елемента H_{kl} невизначена. Будемо вважати, що мережа знаходиться в працездатному стані, якщо $H_{kl} > H_{\min}$, де H_{\min} — деяке мінімальне значення структурно-інформаційної зв'язності.

Критерій структурно-інформаційної зв'язності визначає потенційну надійність мережі та є верхньою межею ймовірності зв'язності між вузлами мережі. Однак, зв'язок між вузлами може бути невідновлений не тільки із-за порушення працездатності каналів, а також з причини відсутності вільних каналних ресурсів у даний момент часу. Для визначення ймовірності зв'язку між вузлами мережі в умовах обмеженої пропускної спроможності каналів будемо використовувати поняття інформаційної зв'язності (ІЗ) Q_{kl} від вузла k до вузла l у відповідності з формулою:

$$Q_{kl} = \frac{Z_{kl} - R_{kl}}{Z_{kl}} = 1 - p_c = 1 - P_{erkl}, \quad (7)$$

де P_{erkl} — ймовірність помилкового прийому пакету даних протягом часу t , що на відміну від критерію структурно-інформаційної зв'язності визначається не тільки втратами на лінії зв'язку та через організацію множинного доступу, а й через зайнятість усіх каналних ресурсів. З ростом пропускної спроможності каналів H_{kl} прямує до Q_{kl} .

Розглянуті показники структурної надійності мережі стосуються виділеної пари вузлів. Сукупність таких показників для всіх або деякої підмножини пар може достатньо повно визначати структурну надійність мережі в цілому. Але в умовах швидкої зміни структури БЕМ може бути занадто складним постійно перераховувати показники для всіх пар. Тому пропонується використовувати інший, інтегральний, критерій структурної надійності. Відповідно до цього критерію мережа вважається справною, якщо є зв'язок між усіма її вузлами та задається вимога на ймовірність такої події. У порівнянні з ін-

шими показниками цей критерій дає змогу оцінити надійність даної зв'язаної мережі, що постійно розвивається.

Запропонований у даній роботі інтегральний показник визначимо як глобальна пакетна зв'язність (ГПЗ). Розглянемо приклад використання запропонованого критерію.

Представимо БЕМ у вигляді ненаправленого зваженого графу $G(N, A)$, показано на рис. 2. Він складається з N вершин (вузлів мережі) та сукупності ребер (ліній зв'язку) A , позначених певною вагою, обернено пропорційною ймовірності зв'язності пари вузлів. Більш віддалені вузли мають меншу ймовірність зв'язності між собою. БЛА на рис. 2 зображено у вигляді додаткового вузла, що поєднує між собою найбільш віддалені наземні вузли.

Таким чином, задача максимізації надійності зводиться до задачі мінімізації відстаней між вузлами. Тоді глобальну пакетну зв'язність можна визначити, як мінімальне кістякове дерево (МКД), що представляє собою набір ребер графу, які поєднують собою усі вузли графу та сумарна вага яких мінімальна, за наступною формулою:

$$U = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [A]_{ij} W_{ij}, \quad i \neq j, \quad i, j = \overline{1, N}, \quad (8)$$

де $[A]_{ij}$ — набір ребер графу $G(N, A)$, що входять до складу МКД (показані на рис. 2 потовщеними лініями); $W_{ij} = -\lg p_{ij}$ — вага ребра МКД, обернено пропорційна ймовірності зв'язності пари вузлів, що визначається з (1). Наявність МКД, кожне ребро якого відповідає вимозі $P_{erkl} < P_{er0}$, свідчатиме про те, що в будь-якому двополосному напрямку мережі існуватиме принаймні один справний шлях.

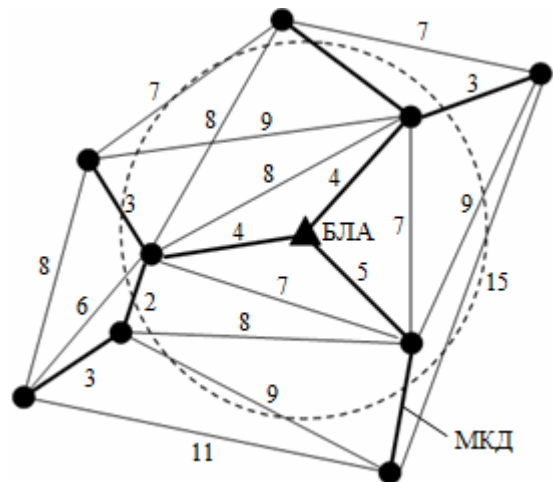


Рис. 2. Приклад графу $G(N, A)$ БЕМ при $N = 10$ із одним БЛА

Значення кожного з розглянутих показників структурної надійності (СІЗ, ІЗ, ГПЗ) може бути значно підвищено шляхом оптимального розміщення повітряних ретрансляторів (безпілотних літальних апаратів) у просторі.

Постановка задачі у математичному вигляді

Подальший математичний аналіз проводимо у наближенні плоскої земної поверхні, розташованої на деякій відстані над рівнем моря. Нехай задано множину наземних вузлів $V_i, i=1,2,\dots,N$, де N — кількість наземних вузлів, зосереджених у деякому районі радіусом r ; множину БЛА $B_j, j=1,2,\dots,K$, де K — кількість БЛА; $R = \text{const}$ — радіус зони покриття кожного БЛА, коли вони знаходяться на однаковій висоті h відносно земної поверхні; $x_i, y_i (i=1,2,\dots,N)$ — координати наземних вузлів на земній поверхні (отримані, наприклад, через супутникову систему глобального позиціонування GPS). Будемо вважати, що всі наземні вузли знаходяться на однаковій висоті відносно земної поверхні.

Для визначення структурно-інформаційної та інформаційної зв'язності повинні бути відомі структура мережі (без застосування БЛА), значення P_{er} для всіх ребер мережі, спосіб обслуговування заявок у вузлах мережі (протокол множинного доступу), план розподілення потоків (протокол маршрутизації), ймовірність відсутності каналного ресурсу в заданому напрямку.

Тоді показники локальної структурно-інформаційної надійності можна визначити шляхом розв'язання задачі оптимізації, яку сформулюємо наступним чином (задача 1): необхідно знайти таке розташування множини безпілотних літальних апаратів у просторі, яке дозволяє максимізувати локальну структурно-інформаційну надійність за показниками (1), (5), (7).

Запропонований показник глобальної структурно-інформаційної надійності знаходимо в результаті розв'язання наступної задачі оптимізації (задача 2): потрібно знайти такі координати розміщення множини безпілотних літальних апаратів у просторі $X_j = (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}), j=1, K$, при яких цільова функція зв'язності U , що визначається з виразу (8), буде мінімальною. При цьому для кожного ребра МКД має виконуватись умова

$$\Omega: \{P_{er\ kl} < P_{er\ 0}, H_{kl} > H_{\min} \forall kl \in \text{МКД}, k \neq l\}.$$

Математично задачу оптимізації можна записати у наступному вигляді:

$$X_{\min j} = \arg \min_{\Omega} U.$$

Для вирішення поставлених задач запропоновано метод, що складається з алгоритмів, які розглядаються нижче.

Метод управління розміщенням БЛА у просторі для підвищення структурно-інформаційної надійності

Метод управління розміщенням безпілотних літальних апаратів у просторі для оптимізації показників локальної або глобальної структурно-інформаційної надійності включає у себе наступні етапи: планування (перепланування), розгортання та оперативне управління.

На етапі планування (перепланування) кожен БЛА здійснює: збір вихідних даних про початкову топологію мережі (координати мобільних абонентів та виведених безпілотних літальних апаратів), об'єм та напрямки передачі інформації; розрахунок показників локальної або глобальної структурно-інформаційної надійності; аналіз виконання умов наявності структурної зв'язності та вільного каналного ресурсу (заданої пропускної спроможності); виконання алгоритму 1 або алгоритму 2 (розглядаються нижче) для пошуку початкового (наступного) розміщення БЛА при наявності можливих рішень, при чому вважається, що усі вузли мережі (у тому числі попередньо виведені БЛА) мають фіксовані координати на момент розрахунку.

На етапі розгортання здійснюється: вивід (переміщення) БЛА в точку свого початкового (наступного) розміщення, при цьому відпрацювання отриманого розміщення означає баражування БЛА по колу мінімального радіусу навколо точки свого оптимального розміщення; корегування маршрутів передачі даних та навантаження каналів.

На етапі оперативного управління здійснюється: адаптація роботи безпілотних літальних апаратів (потужності передавача, протоколів множинного доступу, маршрутизації та ін.) до реальних умов функціонування.

Дані етапи відпрацьовуються послідовно на періодичній основі в залежності від швидкості зміни топології мережі.

Алгоритм розміщення БЛА для оптимізації показників локальної структурно-інформаційної надійності (алгоритм 1)

Для знаходження оптимального розміщення БЛА у просторі з метою підвищення структурно-інформаційної та інформаційної зв'язностей проаналізуємо елементарні структури, схематично зображені на рис. 3.

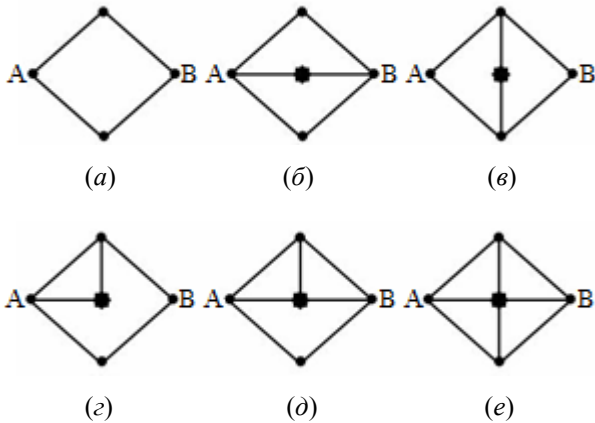


Рис. 3. Приклади структури БЕМ з чотирьма наземними вузлами та одним БЛА

На рис. 3 схематично показано спрощені структури БЕМ з чотирьма наземними вузлами (крапки) та одним БЛА (зірка), які відображають різні способи з'єднання БЛА із вузлами мережі. Проведемо аналіз структурно-інформаційної надійності даних структур у напрямках вузлів *A* і *B*.

Припустимо, що в якості протоколу множинного доступу використовується CSMA/CA, при цьому розмір “вікна змагань” та об'єм буферної пам'яті кожного із наземних вузлів достатньо великі. При цьому застосовуємо протокол маршрутизації, який визначає маршрут передачі даних за вимогою (наприклад, AODV), що дозволяє просте додавання вузлів до мережі або їх видалення з мережі без втрати інформаційних пакетів. Тоді знаходження структурно-інформаційної зв'язності зводиться до пошуку структурної зв'язності. Прийнемо, що надійність всіх ребер графу однакова і дорівнює *p*. Використовуючи формули для послідовного та паралельного з'єднань елементів (2), (3) та метод розкладання Шеннона — Мура, знаходимо відповідні вирази для ймовірності зв'язності зображених на рис. 3 структур.

$$\begin{aligned}
 P_{AB}^{(a)} &= -p^4 + 2p^2; \\
 P_{AB}^{(b)} &= p^6 - 3p^4 + 3p^2; \\
 P_{AB}^{(c)} &= -2p^6 + 4p^5 - 2p^4 + p; \\
 P_{AB}^{(d)} &= p^6 - p^5 - 2p^4 + p^3 + 2p^2; \\
 P_{AB}^{(e)} &= -2p^7 + 5p^6 - 7p^4 + 2p^3 + 3p^2; \\
 P_{AB}^{(f)} &= 4p^8 - 18p^7 + 27p^6 - 10p^5 - \\
 &\quad - 9p^4 + 4p^3 + 3p^2.
 \end{aligned}$$

На рис. 4 зображено отримані із використанням наведених вище формул графіки залежності ймовірності структурної (структурно-інформаційної)

зв'язності P_{AB} від надійності ребер p досліджуваних структур. При визначенні інформаційної зв'язності Q_{AB} необхідно враховувати потік, втрачений через зайнятість всіх каналів. На рис. 5 приведено графіки залежності ймовірності інформаційної зв'язності Q_{AB} від надійності ребер p , якщо пропускна спроможність ліній зв'язку обмежена і ймовірність відсутності вільних каналних ресурсів складає 0,5.

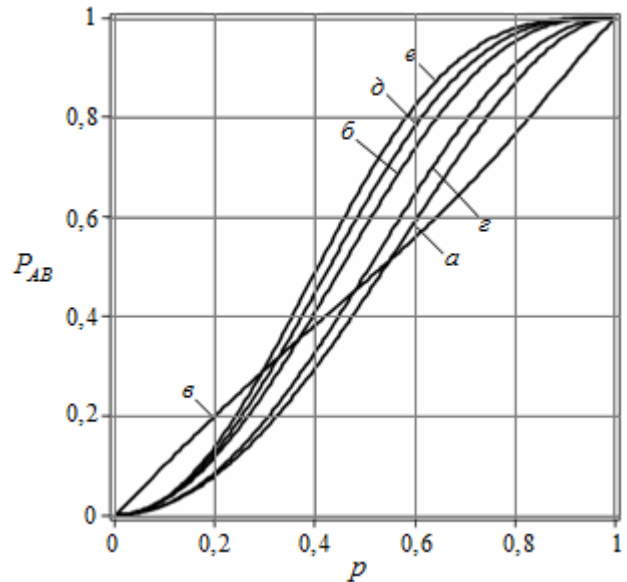


Рис. 4. Залежність структурної зв'язності від надійності ребра

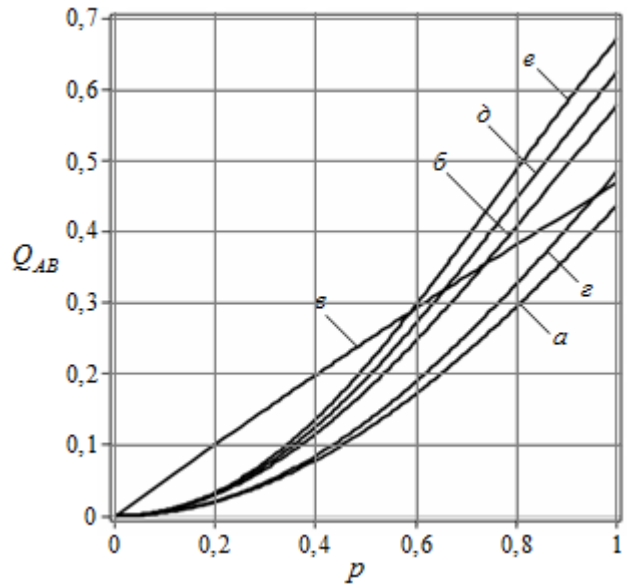


Рис. 5. Залежність інформаційної зв'язності від надійності ребра

На рис. 4, 5 можна бачити, що при надійності ребра, наприклад, 0,8, значення інформаційної зв'язності менші відповідних значень структурної зв'язності. Та навіть при максимальній надійності

ребра ($p = 1$) інформаційна зв'язність буде значно менше одиниці через обмежену пропускну спроможність каналів мережі. Із приведених графіків слідує також, що більшу надійність мають структури (б), (д) і (е).

Виходячи з цього, можна зробити висновок, що для підвищення структурно-інформаційної надійності мережі безпілотних літальних апаратів у просторі слід розміщувати таким чином, щоб покрити (зв'язати) пару вузлів, в напрямку яких оцінюється надійність, та якомога більшу кількість інших вузлів мережі.

Якщо зв'язати пару заданих вузлів не вдається (через малий розмір зони покриття БЛА), то БЛА необхідно розміщувати таким чином, щоб зв'язати один із заданих вузлів з якомога більшою кількістю інших вузлів мережі. Усі наступні БЛА слід розташовувати таким чином, щоб зв'язати попередній БЛА з другим заданим вузлом та (або) якомога більшою кількістю інших вузлів мережі. Збільшення кількості БЛА слід продовжувати до тих пір, поки не буде досягнута задана структурно-інформаційна надійність або не скінчиться заданий апаратний ресурс (БЛА).

Алгоритм розміщення БЛА для підвищення СІЗ та ІЗ (алгоритм 1) має наступні кроки.

Ініціалізація: $j = 0$.

Крок 1. $t = 0$. Вибір пари заданих вузлів БЕМ, між якими треба підвищити структурну надійність. Позначимо їх $A^{(t)}$ та B .

Крок 2. Перевірка можливості покриття j -м БЛА заданих вузлів $A^{(t)}B < 2R$. Якщо ця умова виконується, тоді перехід на крок 3, інакше $t = t + 1$ та розміщення БЛА в точці $A^{(t)}$, що належить відрізьку $A^{(t-1)}B$ і дозволяє покрити один із заданих вузлів (наприклад, $A^{(t-1)}$) та мінімізувати залишкову відстань у напрямку іншого заданого вузла $A^{(t)}B$. $j = j + 1$. Перевірка залишку апаратного ресурсу (БЛА): якщо $j \leq K$, то перехід на крок 2, інакше КІНЕЦЬ.

Крок 3. Відбір точок у радіусі R від середини відрізьку $A^{(t)}B$. Побудова кіл, описаних навколо кожного з відібраних вузлів та двох заданих $A^{(t)}$ і B . Відбір тих кіл, радіус яких не перевищує R та включає задані вузли мережі. Якщо є такі кола, то перехід на крок 4, інакше j -й БЛА розміщується в центрі відрізьку $A^{(t)}B$. Перевірка залишку апаратного ресурсу: якщо $j \leq K$, тоді перехід на крок 1, інакше КІНЕЦЬ.

Крок 4. Розміщення j -ого БЛА в центрі такого кола, що забезпечує покриття найбільшої кількості інших вузлів мережі. $j = j + 1$. Перевірка залишку апаратного ресурсу: якщо $j \leq K$, то перехід на крок 5, інакше КІНЕЦЬ.

Крок 5. Перевірка наявності заданих пар вузлів для підвищення структурно-інформаційної надійності: якщо є такі пари, тоді перехід на крок 1, інакше КІНЕЦЬ.

Алгоритм розміщення БЛА для оптимізації показників глобальної структурно-інформаційної надійності (алгоритм 2)

Для розв'язання задачі оптимального розміщення БЛА згідно з формулюванням (9) будемо використовувати градієнтний метод пошуку оптимуму. При знаходженні глобальної пакетної зв'язності БЛА будемо розміщувати таким чином, щоб мінімізувати МКД. В цьому випадку градієнт функції зв'язності визначається наступним чином:

$$\nabla U(\mathbf{x}) = \left(\frac{\partial U(\mathbf{x})}{\partial x_0}, \frac{\partial U(\mathbf{x})}{\partial y_0}, \frac{\partial U(\mathbf{x})}{\partial z_0} \right),$$

де $\mathbf{x} = (x_0, y_0, z_0)$ — вектор точки розміщення БЛА у просторі.

Основна ідея градієнтного методу [8] стосовно до рішення даної задачі полягає в тому, щоб вести пошук екстремуму в напрямку найшвидшого спуску, а цей напрямок задається антиградієнтом $-\nabla U$, тобто

$$\mathbf{x}^{(t+1)} = \mathbf{x}^{(t)} - \lambda^{(t)} \nabla U^{(t)},$$

де $\mathbf{x}^{(t)}$, $\mathbf{x}^{(t+1)}$ — вектори поточного та наступного положень БЛА у просторі; $\lambda^{(t)}$ — деяке число, що вибирається. В даній роботі будемо користуватись моделлю найшвидшого спуску, при якій

$$\lambda^{(t)} = \arg \min_{\lambda} U[\mathbf{x}^{(t)} - \lambda^{(t)} \nabla U(\mathbf{x}^{(t)})].$$

Спочатку для деякої початкової точки знаходиться напрямок спуску, а потім у даному напрямку знаходиться наступна точка, в якій цільова функція набуває найменшого значення. Та ж сама процедура повторюється для нової точки. Умовою зупинки такого алгоритму і виведення результатів є точність розрахунку, яка задається деяким малим числом ϵ .

Щоб зменшити ймовірність потрапляння розташування БЛА у локальний екстремум та зменшити кількість ітерацій алгоритму, застосування градієнтного методу слід починати з деяких точок початкового наближення (ініціалізація), що можна визначити шляхом решітчастої або центроїдної ініціалізацій [4].

Загальний алгоритм оптимального розміщення множини БЛА для випадку оцінки глобальної пакетної зв'язності (алгоритм 2) має наступний вигляд.

Етап ініціалізації:

$j = 0$, визначення точності розрахунку ϵ .

Крок 1. $t = 0$, $j = j + 1$. Визначення початкової точки пошуку оптимального розміщення j -го БЛА $\mathbf{x}_j^{(0)}$, $j = 1, 2, \dots, K$, шляхом решітчастої або центроїдної ініціалізації [4].

Етап ітерацій:

Крок 2. Найшвидший спуск для оптимізації зв'язності U , тобто $\mathbf{x}_j^{(t+1)} = \mathbf{x}_j^{(t)} - \lambda^{(t)} \nabla U_j^{(t)}$, де $\lambda^{(t)} = \arg \min_{\lambda} U[\mathbf{x}_j^{(t)} - \lambda^{(t)} \nabla U_j^{(t)}]$.

Крок 3. Перевірка умов зупинки алгоритму: якщо $|\mathbf{x}_j^{(t+1)} - \mathbf{x}_j^{(t)}| > \epsilon$, то $t = t + 1$ та перехід на крок 2; інакше $\mathbf{x}_j = \mathbf{x}_j^{(t+1)}$, зупинка та виведення j -го БЛА у точку \mathbf{x}_j .

Крок 4. Перевірка залишку БЛА: якщо $j < K$, то перехід на крок 1, інакше КІНЕЦЬ.

Для ілюстрації ефективності запропонованого алгоритму 2 розглянемо задачу знаходження оптимального розміщення БЛА, використовуючи наступні вихідні дані: кількість наземних вузлів $N = 7$, що випадковим чином розміщені в районі площею $r = 1000 \times 1000 \text{ м}^2$; потужність передавача на кожному з них становить 100 мВт; потужність передавачів для всіх БЛА однакова і складає 300 мВт; спектральна потужність шуму становить 10^{-12} Вт/Гц ; всі БЛА розташовані на висоті 100 м; діелектричні втрати сигналу пропорційні кубу відстані між вузлами; тип коду згортковий $133_8, 171_8$ зі швидкістю $1/2$; довжина пакету 1000 біт; канали зв'язку між БЛА мають модель із адитивним білим гаусовим шумом; решта каналів відповідає моделі Релея із незалежними завмираннями.

Методика розрахунку ГПЗ за цими даними включає: обчислення ймовірності зв'язності $p_{ij}, i, j = 1, N$ для кожного вузла мережі з кожним за допомогою формули (1); знаходження МКД зваженого графу безпроводової епізодичної мережі та його побудову відповідно до алгоритму Пріма [9]; визначення оптимального розміщення БЛА за алгоритмом 2 з використанням формули (8) для розрахунку ГПЗ і виразу $U^i = 10^{-U}$ для трансформування його значення.

Результати розрахунків за одержаними співвідношеннями показано на рис. 6 — рис. 8. Приклад побудови МКД графу мережі з сімома МА та одним оптимально розміщеним БЛА ілюструється рис. 6. Відповідно до вказаного на рисунку розміщення вузлів розраховано ГПЗ даної мережі. Результати обчислень у вигляді залежності глобальної пакетної зв'язності від координат проекції точки розміщення БЛА представлено на рис. 7. Графік залежності ГПЗ від кількості БЛА, що застосовуються у мережі, показано на рис. 8.

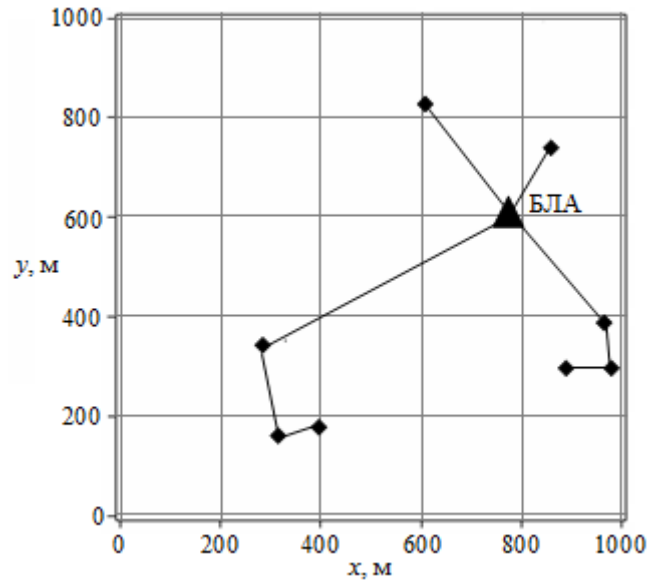


Рис. 6. Приклад побудови МКД з сімома МА та одним БЛА

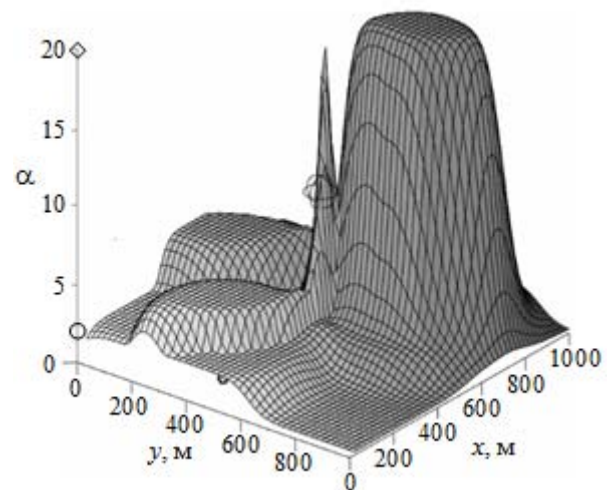


Рис. 7. Залежність глобальної пакетної зв'язності $U^i = 10^{-3} \alpha$ від координат проекції розміщення одного БЛА

На рис. 7 видно, що глобальна пакетна зв'язність має глобальний та декілька локальних екстремумів. Свого максимального значення глобальна пакетна зв'язність досягає при розміщенні БЛА в точці з координатами її проекції (223 м; 384 м), як показано на рис. 6 та рис. 7, де початок координат позначено точкою (0,0). Значення ГПЗ до застосування БЛА, яке становить 0,0021, помічено кружком на вертикальній осі. При застосуванні одного оптимально розміщеного БЛА значення ГПЗ зростає і становить 0,02, як показано ромбом на вертикальній осі. Отже, при застосуванні одного БЛА ГПЗ збільшується майже на порядок.

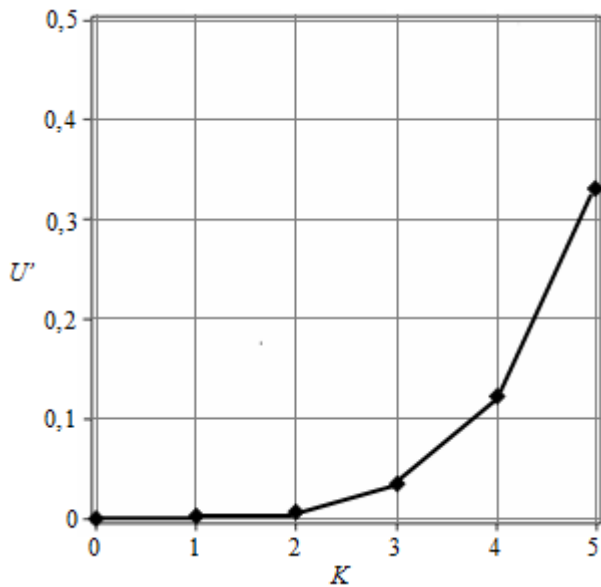


Рис. 8. Залежність глобальної пакетної зв'язності від кількості БЛА

Як показує рис. 8, при збільшенні кількості безпілотних літальних апаратів глобальна пакетна зв'язність зростає, однак її приріст поступово зменшується. Це свідчить про те, що при розташуванні множини безпілотних літальних апаратів у кількості, достатній для покриття всіх вузлів, вивід наступних БЛА майже не збільшує надійність мережі. Збільшення кількості вузлів у мережі зумовлює підвищення її інформаційного завантаження, що при обмеженій пропускнув спроможності каналів призводить до зменшення структурно-інформаційної надійності.

Отже, застосування великої кількості безпілотних літальних апаратів потребує більш детального розрахунку трафіку в мережі. Для оцінки структурно-інформаційної надійності безпроводової епізодичної мережі необхідне моделювання процесу її функціонування.

Висновки

Запропоновано локальні та глобальні показники структурно-інформаційної надійності безпроводових епізодичних мереж. Розроблено і досліджено показники структурно-інформаційної та інформаційної зв'язностей для оцінки надійності таких мереж. Вони враховують одночасно як структурні, так і функціональні характеристики мережі. Запропоновані показники дозволяють оцінити надійність мережі з урахуванням алгоритму обслуговування заявок, протоколу множинного доступу, плану розподілення потоків, протоколу маршрутизації, пропускнув спроможностей каналів.

Проілюстровано використання ненаправленого зваженого графу для аналізу безпроводових епізодичних мереж з різноманітною структурою. Показано, що ймовірність зв'язності між вузлами мережі істотно залежить від надійності ліній зв'язку, а також від ймовірності наявності в даний момент часу вільних каналних ресурсів.

Для покращення локальних та глобальних показників структурно-інформаційної надійності БЕМ запропоновано метод управління положенням повітряних ретрансляторів на основі БЛА. Метод реалізовано у вигляді алгоритмів оптимального розміщення БЛА у просторі для досягнення найкращих показників структурно-інформаційної надійності. Показано, що застосування принаймні одного БЛА дозволяє збільшити показник глобальної структурно-інформаційної надійності майже на порядок. При збільшенні кількості БЛА цей показник ще більш зростає, однак при цьому ускладнюється інформаційний обмін у мережі.

Література

1. Романюк В. А. Мобильные радиосети — перспективы беспроводных технологий // Сети и телекоммуникации. — 2003. — № 12. — С. 62–68.
2. Мизин И. А., Богатырев В. А., Кулешов А. П. Сети коммутации пакетов / Под ред. В. С. Семенихина. — М.: Радио и связь, 1986. — 408 с.
3. Дудник Б. Я., Овчаренко В. Ф., Орлов В. К. Надежность и живучесть систем связи / Под ред. Б. Я. Дудника. — М.: Радио и связь, 1984. — 216 с.
4. Лисенко О. І., Валуйський С. В. Метод оптимального управління топологією мережі безпілотних літальних апаратів за критерієм підвищення зв'язності безпроводових ad-hoc мереж // Системи управління, навігації та зв'язку. — 2010. — Вип. 2. — С. 218–224.
5. Калекіна Т. Г., Коваленко Т. Н. Обоснование критерия структурно-информационной связности при анализе надежности телекоммуникационных систем // Радиоэлектроника, информатика, управління. — 2010. — № 1. — С. 66–70.
6. Минович А. И., Романюк В. А. Методы множественного доступа в мобильных радиосетях // Зв'язок. — 2004. — № 2. — С. 46–50.
7. Романов А. И. Телекоммуникационные сети и управление: Учебное пособие. — К.: Изд-во Киевского университета, 2003. — 247 с.
8. Жиглявский А. А., Жилинкас А. Г. Методы поиска глобального экстремума. — М.: Наука, 1991. — 248 с.
9. Попівський В. В., Сабурова С. О., Олійник В. Ф. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / За загальною ред. В. В. Попівського. — Харків: Сміт, 2006. — 564 с.

Надійшла до редакції 14.09.2010