

УДК 621.396.4

Лисенко О. І., д. т. н., професор,
Валуйський С. В.,
НТУУ «КПІ»

ПІДВИЩЕННЯ СТРУКТУРНО-ІНФОРМАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ БЕЗПРОВОДОВИХ ЕПІЗОДИЧНИХ МЕРЕЖ

Запропоновано показники для локальної та глобальної оцінки структурно-інформаційної надійності. Запропоновано метод підвищення надійності епізодичних мереж на основі оптимального розміщення повітряних ретрансляторів у просторі. Він заснований на розміщенні безпілотних літальних апаратів в районах, які є найбільш проблемними частинами мережі. Адаптивна зміна положення таких ретрансляторів дозволяє забезпечити і підтримувати заданий рівень надійності мережі, яка безперервно розвивається.

Предложены показатели для локальной и глобальной оценки структурно-информационной надежности. Предложен метод повышения надежности эпизодических сетей на основе оптимального размещения воздушных ретрансляторов в пространстве. Он основан на размещении беспилотных летательных аппаратов в районах, которые являются наиболее проблемными частями сети. Адаптивное изменение положения таких ретрансляторов позволяет обеспечить и поддерживать заданный уровень надежности сети, которая непрерывно развивается.

The reliability indices of structural-informational and informational connectivities were developed. A method to improve the reliability of ad hoc 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 maintain a specified level of network reliability, which is continuously in progress.

Вступ. Значна частина телекомунікаційних систем заснована на використанні стаціонарної мережної інфраструктури. Для забезпечення потрібної якості обслуговування абонентів стаціонарні мережі повинні мати достатню потужність. Поряд з цим вони характеризуються значним надлишком надвисокочастотного обладнання. 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 справного 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 і 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 розміром r . Другий (повітряний) рівень складає мережа БЛА, що баражують на деякій висоті h над землею та утворюють зону покриття МА радіусу R , поєднуючи таким чином нез'єднанні між собою вузли (наприклад, БЛА2 з'єднує між собою МА3 та МА4, як показано на рисунку). Кожен МА оснащений двома радіо інтерфейсами – для зв'язку з іншими МА та для зв'язку з БЛА. Застосування двох окремих радіо інтерфейсів дозволяє 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 радіо інтерфейсів є можливість використання різних частотних смуг для кожного інтерфейсу, що забезпечує кращу якість послуг (QoS) та баланс навантаження в мережі. БЛА у свою чергу також оснащений двома радіо інтерфейсами, що дозволяє розв'язати локальний (БЛА-МА) та міжстільниковий (БЛА-БЛА) трафік.

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.

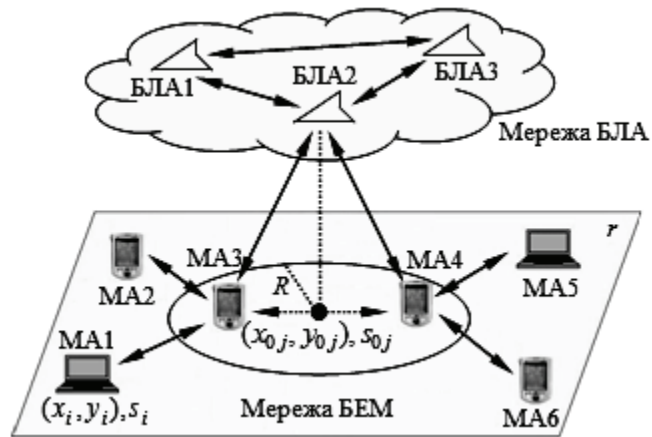


Рис.1. Приклад архітектури БЕМ із використанням БЛА

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 БЕМ із урахуванням інформаційних характеристик мережі; 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 $P_{kl}, k, l = \overline{1, N}$, 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 менше 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 цей параметр 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 надійність лінії зв'язку телекомунікаційної мережі можна визначити як ймовірність безпомилкового прийому пакету даних протягом часу t

$$p_{ij} = 1 - P_{er\ ij}. \quad (1)$$

Зазвичай структуру мережі можна представити у вигляді графу, що представляє собою сукупність послідовно або паралельно з'єднаних ребер (в даному випадку ненадійних ліній зв'язку). Тоді надійність таких структур в деякому напрямку (між вузлами k і l) визначаються 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 від вузла k до вузла l ; $C_{надх}$ — інтенсивність потоку заявок, що приходять 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:

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

де $P_{er\ kl}$ — 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 (пакетів) у даному напрямку, а також способом обслуговування заявок в вузлах мережі.

Це обслуговування залежить в 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 час знову перевіряє наявність несучої. У випадку 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; розмір буферу 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 великий розмір буферу, то ймовірність втрати пакету через протокол множинного доступу прямує до нуля. У цьому випадку обслуговування заявок в 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 задане значення структурно-інформаційної зв’язності.

Таким чином, 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 невстановлений не тільки із-за порушення працездатності каналів, а також з причини відсутності вільних каналних ресурсів в 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:

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

де $P_{er\ kl}$ – 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 всіма її вузлами та задається вимога на ймовірність такої події. У порівнянні з іншими 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 $G(N, A)$, показаного 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. Тобто більш віддалені вузли мають меншу ймовірність зв'язності між собою. БЛА на рисунку зображений 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. Тоді глобальну пакетну зв'язність можна визначити 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 такого МКД, кожне ребро якого відповідає вимозі $P_{er\ kl} < P_{er\ 0}$, свідчатиме про те, що в будь-якому двополюсному напрямку мережі існуватиме принаймні один справний шлях.

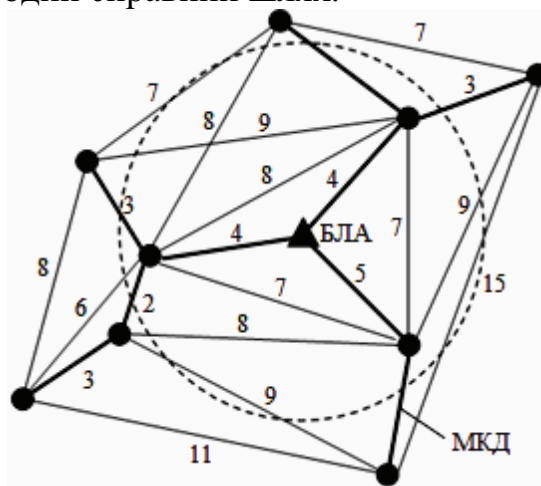


Рис. 2. Приклад графу $G(N, A)$ БЕМ при $N=9$ із одним БЛА

Значення кожного з розглянутих показників структурної надійності (СІЗ, ІЗ, ГПЗ) може бути значно підвищена шляхом оптимального розміщення повітряних ретрансляторів (БЛА) 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 в 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 – 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 в 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 в результаті розв'язання задачі оптимізації, яку сформулюємо наступним чином (*задача 1*): необхідно знайти таке розташування БЛА, яке дозволяє максимізувати локальну структурно-інформаційну надійність за показниками (1), (5), (7).

Запропонований показник глобальної структурно-інформаційної надійності обчислюємо в результаті розв'язання наступної задачі оптимізації (*задача 2*): потрібно знайти такі координати розміщення множини БЛА у просторі $X_j = (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}), j = \overline{1, K}$, при яких цільова функція зв'язності U , що визначається з виразу (8), буде мінімальною. При чому для кожного ребра МКД має виконуватись умова $\Omega: \{P_{er\ kl} < P_{er0}, H_{kl} > H_{\min} \forall kl \in \text{МКД}, k \neq l\}$. Математично задачу оптимізації можна записати у наступному вигляді:

$$X_{\min j} = \arg \min_{\Omega} U. \quad (9)$$

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

Метод управління положенням БЛА у просторі для підвищення структурно-інформаційної надійності. Метод управління положенням БЛА у просторі для оптимізації показників локальної або глобальної структурно-інформаційної надійності включає у себе наступні етапи:

планування (перепланування), розгортання та оперативне управління. Розглянемо їх детальніше.

На етапі планування (перепланування) кожен БЛА здійснює:

- збір вихідних даних про початкову топологію мережі (координати МА та виведених БЛА), 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 пропускнуної 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 т.ч. попередньо виведені БЛА) мають фіксовані координати на момент розрахунку.

На етапі розгортання здійснюється:

- вивід (переміщення) БЛА в точку свого початкового (наступного) розміщення. При чому під відпрацювання отриманого розміщення розуміється 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 БЛА (потужності передавача, протоколів МД, маршрутизації та ін.) до реальних умов функціонування.

Дані етапи відпрацьовуються послідовно на періодичній основі в залежності від швидкості зміни топології мережі. У роботі [8] досліджується тривалість існування зв'язності між МА та МА і БЛА БЕМ в залежності від різного характеру переміщення МА, що може бути покладено в основу періодичності запропонованих алгоритмів.

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.

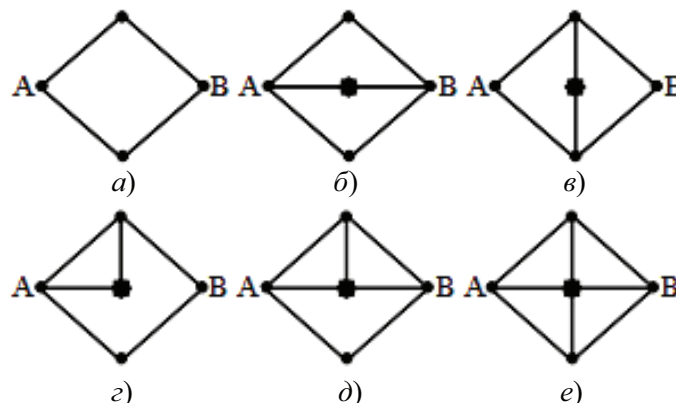


Рис. 3. Приклади структури БЕМ з чотирьома наземними вузлами та одним БЛА

На рис. 3 схематично показано спрощені структури БЕМ з чотирьома 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. Прийmemo, що надійність всіх ребер графа 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.

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

На рис.4 зображені 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 приведені графіки залежності ймовірності інформаційної зв'язності Q_{AB} від надійності ребер p , якщо пропускна спроможність ліній зв'язку обмежена і ймовірність відсутності вільних каналів складає 0,5.

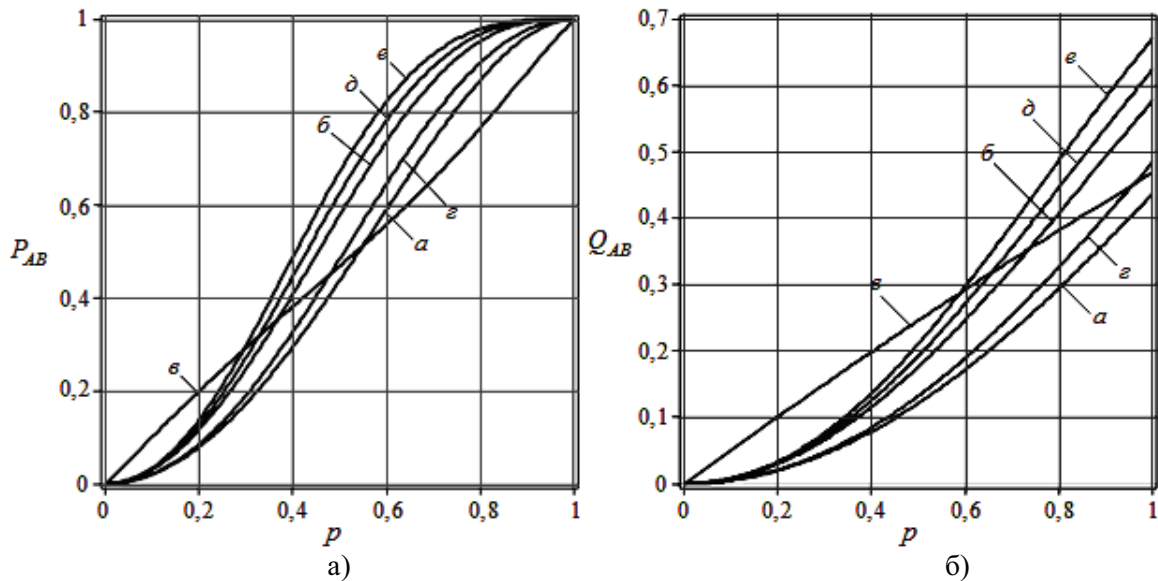


Рис. 5. Залежність структурної (а) та інформаційної (б) зв'язності від надійності ребра

Із приведених на рис. 4, 5 графіків 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. Також 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 БЛА 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).

Тоді алгоритм розміщення БЛА для підвищення СІЗ та ІЗ (алгоритм 1) буде мати 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 умов виконується, тоді переходимо на Крок 3, інакше $t=t+1$ та розміщуємо БЛА в точці $A^{(t)}$, що належить відрізьку $A^{(t-1)}B$ та

дозволяє покрити один з 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 знову переходимо на Крок 2, інакше – КІНЕЦЬ.

Крок 3. Відбір точок у радіусі R від середини відрізка $A^{(t)}B$. 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 відрізка $A^{(t)}B$. Перевірка залишку апаратного ресурсу: якщо $j \leq K$, тоді переходимо на Кроку 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 переходимо на Крок 5, інакше – КІНЕЦЬ.

Крок 5. Перевірка наявності заданих пар вузлів для підвищення структурно-інформаційної надійності: якщо є такі пари, тоді переходимо 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. Розглядаючи випадок глобальної пакетної зв'язності, БЛА будемо розміщувати таким чином, щоб мінімізувати МКД. В цьому випадку градієнт функції зв'язності визначається наступним чином:

$$\nabla U(X) = \left(\frac{\partial U(X)}{\partial x_0}, \frac{\partial U(X)}{\partial y_0}, \frac{\partial U(X)}{\partial z_0} \right) \quad (10)$$

де $X = (x_0, y_0, z_0)$ – вектор точки розміщення БЛА у просторі.

Основна ідея градієнтного методу [9] стосовно до рішення даної задачі полягає в тому, щоб вести пошук екстремуму в напрямку найшвидшого спуску, а цей напрямок задається антиградієнтом $-\nabla U$, тобто

$$X^{(t+1)} = X^{(t)} - \lambda^{(t)} \nabla U^{(t)}, \quad (11)$$

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

$$\lambda^{(t)} = \arg \min U[X^{(t)} - \lambda^{(t)} \nabla U^{(t)}].$$

Тобто 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 (ініціалізації), що можна визначити одним із наступних способів: решітчаста ініціалізація або центроїдна ініціалізація, що детально розглядаються в роботі [4].

Тоді загальний алгоритм оптимального розміщення множини БЛА у випадку глобальної пакетної зв'язності (алгоритм 2) матиме 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 $X_j^{(0)}$, $j=1,2,\dots,K$, шляхом використання решітчастої або центроїдної ініціалізацій [4].

Етап ітерацій:

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

Крок 3. Перевірка умов зупинки алгоритму:

якщо $|X^{(t+1)} - X^{(t)}| > \varepsilon$, то $t=t+1$ та перехід на крок 2; інакше $X_j = X_j^{(t+1)}$, зупинка та виведення j -го БЛА у точку 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 вказаними вихідними даними включала у себе наступні кроки:

1. Розрахунок ймовірності зв'язності $p_{ij}, i, j = \overline{1, N}$ для кожного вузла мережі з кожним згідно (1), де P_{erij} визначається згідно виразам виведеним у [10].

2. Побудова МКД згідно алгоритму Пріма [11].

3. Визначення оптимального розміщення БЛА згідно алгоритму 2, використовуючи вираз (8) для розрахунку ГПЗ. Для кращої візуалізації будемо трансформувати значення ГПЗ наступним чином: $U' = 10^{-U}$.

Приклад МКД з 7 МА та 1 оптимально розміщеним БЛА наведено на рис. 6. Відповідно розміщенню вузлів, вказаному на рис. 6, побудовано графік залежності ГПЗ від координат проекції точки розміщення БЛА (рис. 7) та графіки залежності ГПЗ від кількості БЛА, що застосовуються у мережі (рис. 8).

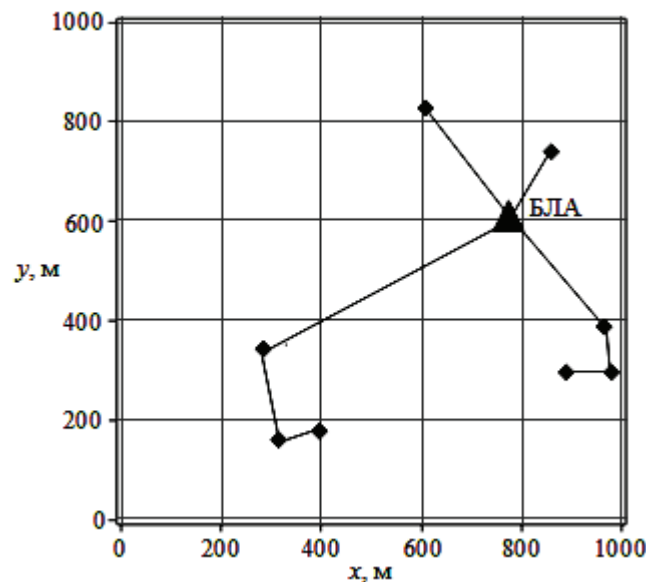


Рис. 6. Приклад побудови МКД з 7 МА та 1 БЛА

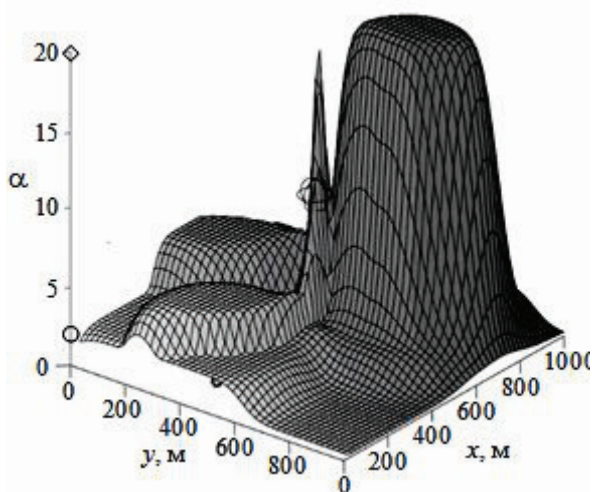


Рис. 7. Залежність глобальної пакетної зв'язності $U' = 10^{-3} \alpha$ від координат проекції розміщення одного БЛА

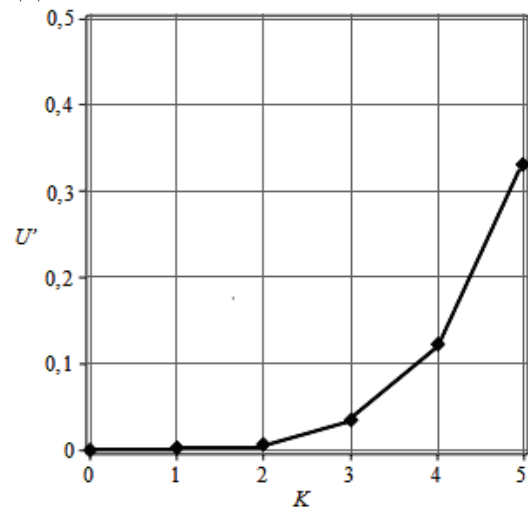


Рис. 8. Залежність глобальної пакетної зв'язності від кількості БЛА

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, координатами проекції якої становлять (223м;384м) від початку координат точки О (0,0), як показано на рис. 6 та 7. Значення ГПЗ до застосування БЛА помічено кружком на вертикальній осі та становить 0,0021. Значення ГПЗ при застосуванні одного оптимально БЛА помічено ромбом на вертикальній осі та становить 0,02. Тобто при застосуванні 1 БЛА ГПЗ збільшується майже на порядок. Як показує рис. 8, при застосуванні більшої кількості БЛА ГПЗ ще більш зростає, однак приріст поступово зменшується. Це пояснюється тим, що при виведенні достатньої кількості БЛА, щоб покрити всі вузли, вивід наступних БЛА майже не збільшує надійність мережі. Крім того, збільшення кількості вузлів у мережі буде призводити до збільшення кількості інформації в мережі, що при обмеженій пропускній спроможності каналів призведе до зменшення структурно-інформаційної надійності. Отже застосування великої кількості БЛА потребує більш детального розрахунку трафіку в мережі та моделювання процесу функціонування БЕМ за допомогою САПР, що є етапом подальшого дослідження.

Висновки. Запропоновано локальні та глобальний показники структурно-інформаційної надійності БЕМ, що враховують одночасно як структурні, так і функціональні характеристики мережі. Використання запропонованих показників дозволяє оцінити потенційну надійність мережі, а також її наявну надійність з урахуванням алгоритму обслуговування заявок в вузлах мережі (протоколу множинного доступу), плану розподілення потоків (протоколу маршрутизації), обмежених пропускних спроможностей каналів. На прикладі мереж з різноманітною структурою показано, що ймовірність зв'язності між вузлами мережі істотно залежить від надійності ліній зв'язку мережі, 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 положення повітряних ретрансляторів (на основі БЛА), що складається з відповідних алгоритмів. Застосування принаймні одного БЛА дозволяє збільшити показник глобальної структурно-інформаційної надійності майже на порядок. Застосування більшої кількості БЛА в мережі дозволяє ще більше збільшити цей показник, однак при цьому ускладнюється інформаційний обмін в мережі, що потребує додаткового дослідження.

Використані джерела інформації:

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 // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2010. – № 1. – С. 66–70.
6. Минович А. І., 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. Лисенко А. І., Валуйський С. В. Расчет времени связности узлов мобильных радиосетей // Матеріали 21-ї міжнародної Кримської конференції (КрыМиКо '2011) «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – 2011. – Т.1. – С. 361 – 362.
9. Жиглявский А. А., Жилинкас А. Г. Методы поиска глобального экстремума. – М.: Наука, 1991. – 248 с.
10. Лисенко О.І., Валуйський С.В. Визначення показників векторного критерію для оцінки зв'язності безпроводових епізодичних мереж із використанням безпілотних літальних апаратів // Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАНУ. – 2010. – Вип.57. – С. 134-141.
11. Поповський В. В., Сабурова С. О., Олійник В. Ф. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / За загальною ред. В. В. Поповського. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 564с.