

ПІДВИЩЕННЯ СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ БЕЗПРОВОДОВИХ ЕПІЗОДИЧНИХ МЕРЕЖ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ РЕТРАНСЛЯТОРІВ

Розроблені показники для локальної оцінки структурної надійності безпроводових епізодичних мереж, які враховують одночасно як структурні, так і функціональні характеристики мережі, такі як: навантаження, створюване вузлами мережі, спосіб обробки заявок на вузлах мережі, обмежені пропускні спроможності каналів та ін. Також запропоновано інтегральний показник, який дозволяє оцінити надійність мережі в цілому. Розроблено чисельні алгоритми розміщення повітряних ретрансляторів для оптимізації показників локальної та глобальної оцінки структурної надійності мережі.

Ключові слова: безпроводові епізодичні мережі, структурна надійність, локальні показники, глобальні показники, функціональні характеристики, безпілотні літальні апарати, алгоритми розміщення

Вступ

Прагнення відмовитись від використання стаціонарної мережної інфраструктури обумовлює розвиток такого виду телекомунікаційних мереж, як безпроводові епізодичні мережі (БЕМ). Абоненти таких мереж можуть вільно переміщуватись в заданому районі та з'єднуватись між собою безпосередньо шляхом радіозв'язку, утворюючи таким чином багатострибкові мобільні радіомережі [1]. Через високу мобільність таких вузлів та нестабільність каналів зв'язку між ними структура БЕМ постійно змінюється, що значно ускладнює оцінку та забезпечення надійності таких мереж.

До цього часу структурна надійність мережі визначалася 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 для обміну інформації інших абонентів. Отже актуальною на сьогодні є задача оцінки надійності мережі із урахуванням як структурних, так й інформаційних характеристик мережі.

Одним із способів підвищення структурної надійності мережі є внесення надлишковості в її структуру. Це можна здійснити шляхом застосування додаткових вузлів повітряного базування, роль яких можуть грати мініатюрні безпілотні літальні апарати (БЛА) [4]. Оснащенні більш потужним передавачем, БЛА мають змогу

© Лисенко О.І., Валуйський С.В., 2010

з'єднатися з більшою кількістю вузлів, аніж мобільні абоненти (МА), та значно підвищити таким чином структурну надійність мережі (рис.1). Оскільки мережа постійно змінює структуру, виникає практичний інтерес розробки алгоритму адаптивного розміщення групи БЛА у просторі для забезпечення/підтримки заданого рівня надійності.

Отже, метою роботи є підвищення структурної надійності безпроводової епізодичної мережі в умовах постійної зміни структури та з урахуванням інформаційних характеристик мережі.

Для досягнення поставленої мети пропонується вирішення наступних часткових наукових задач:

1. Визначення та обґрунтування показників для оцінки локальної та глобальної структурної надійності БЕМ із урахуванням інформаційних характеристик мережі.

2. Розробка чисельних алгоритмів пошуку просторового розміщення групи БЛА, який дозволяє досягти екстремальних значень показників структурної надійності мережі.

3. Програмна реалізація запропонованих алгоритмів, обчислювальний експеримент та аналіз отриманих результатів.

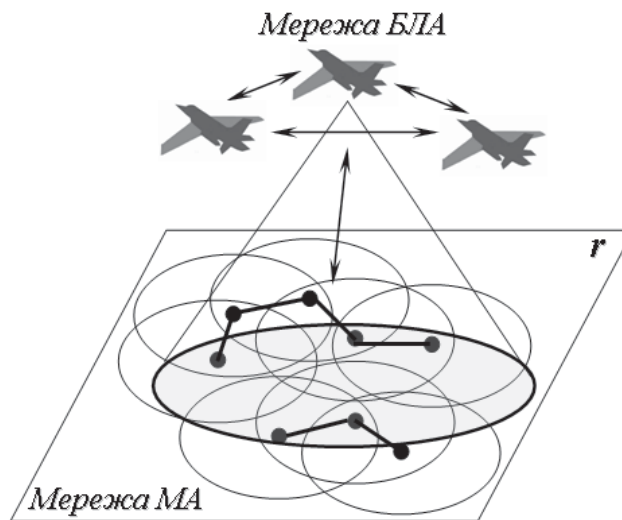


Рисунок 1 – Приклад архітектури БЕМ із використанням БЛА

Визначення показників для оцінки структурної надійності

Під структурно надійністю слід розуміти об'єктивну властивість мережі забезпечувати зв'язність абонентів із якістю (QoS) не гірше заданої [5]. Під наявністю зв'язку (зв'язності) розуміється існування принаймні одного справного шляху між відповідними вузлами [2]. Ймовірність такої події позначимо P_{kl} , $k, l = \overline{1, N}$, де N – кількість

вузлів у мережі. Справність визначається таким поняттям, як відмова. Під відмовою каналу зв'язку слід розуміти такий стан, при якому обладнання каналу повністю вийшло з ладу, або ж його параметри настільки погіршились, що подальше використання каналу неможливе. Оскільки обладнання кожного МА БЕМ поєднує у собі функції як терміналу, так й вузлу комутації, то вихід з ладу цього вузла призведе до одночасної відмови усіх ребер (ліній зв'язку), інцидентних цьому вузлу. Відмова вузла приводить до порушення більшого числа шляхів, аніж відмова ребра, однак ймовірність такої події значно менше ймовірності відмови ребра. Тому при оцінці структурної надійності каналів зв'язку будемо розглядати тільки вплив ребер, вважаючи, що надійність вузлів (ймовірність їх відмови) дорівнює одиниці. Під надійністю p_{ij} ребра (лінії зв'язку) будемо вважати ймовірність знаходження ребра у справному стані. 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, наприклад: гарантована пропускна спроможність (потоківі мультимедіа), час затримки передачі інформації та джиттер (VoIP, відеоконференції) та ін. Але для більшості типів трафіку необхідна гарантована достовірність (точність) передачі інформації. Тому пропонується в якості пріоритетного параметру для оцінки структурної надійності лінії зв'язку обрати ймовірність помилкового прийому пакету даних (PER). Оскільки цей параметр має статистичну природу, потрібен деякий час спостереження за лінією зв'язку, перш ніж можна буде визнати її несправною. Тому будемо вважати ребро несправним, якщо протягом деякого часу t буде зберігатися нерівність $PER > PER_0$. Тоді надійність ребра мережі можна визначити як ймовірність безпомилкового прийому пакету даних протягом часу t :

$$p_{ij(t)} = 1 - PER_{ij(t)}, \quad i, j = \overline{1, N} \quad (1)$$

Надалі будемо вважати, що $p_{ij(t)} = p_{ij}$.

Якщо структура мережі представляє собою сукупність послідовних або паралельних з'єднань ненадійних елементів (в даному випадку ребер), то надійність таких структур в деякому напрямку (k, l) визначаються наступними формулами:

$$P_{kl} = \prod_{i,j=1}^m p_{ij}, \quad (2)$$

$$P_{kl} = 1 - \prod_{i,j=1}^n q_{ij}, \quad (3)$$

де m, n – кількість ребер, що з'єднані послідовно та паралельно, відповідно; p_{ij} – надійність ребра між вузлами i та j ; q_{ij} – ймовірність відмови ребра між вузлами i та j .

Практично будь-який вихідний граф двополюсної мережі може бути перетворений на просте послідовне або паралельне з'єднання елементів шляхом одного з відомих методів перетворення, наприклад, методом розкладання Шеннона – Мура [2,3]. Якщо надійність P_{kl} будь-якої пари вузлів мережі більше заданої P_{kl}^0 , то мережу можна вважати структурно зв'язаною.

Однак критерій структурної зв'язності не може в повній мірі охарактеризувати 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 для оцінки надійності мережі розглянемо критерій структурно-інформаційної та критерій інформаційної зв'язності, що характеризують якість обслуговування запитів в умовах ненадійності елементів.

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

В якості критерію структурно-інформаційної зв'язності від вузла k до вузла l вводиться показник:

$$H_{kl} = \frac{Z_{kl} - R_{kl}}{Z_{kl}} = 1 - p_c \quad (4)$$

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 ; $p_c = \frac{C_{emp}}{C_{надх}}$ – втрати по заявкам, де $C_{надх}$ – інтен-

сивність потоку заявок, що знаходяться на обслуговування; $C_{втр}$ – інтенсивність потоку заявок, що отримали відмову в обслуговуванні.

Оскільки БЕМ відносяться до класу мереж з комутацією пакетів, то під p_c будемо мати на увазі ймовірність втрати пакету даних протягом часу t , що на відміну від критерію структурної зв'язності визначається не тільки втратами на лінії зв'язку, а й інтенсивністю заявок (пакетів), що надходять в даному напрямку, а також способом обслуговування заявок в вузлах мережі.

Цей спосіб залежить в першу чергу від обраного способу множинного доступу (МД), що визначається технологією побудови мережі. В умовах високої мобільності вузлів, характерної для більшості БЕМ, переважним є стандарт IEEE 802.11, що передбачає використання протоколу множинного доступу з контролем несучої (МДКН), наприклад, CSMA/CA [6]. Згідно даного протоколу вузли здійснюють передачу сигналу на одній частоті. Для уникнення колізій при доступі кожен вузол перед початком передачі (у разі надходження заявки) прослуховує ефір на наявність несучої. У випадку зайнятості ефіру, вузол зберігає пакет в буфері та через певний проміжок час знову перевіряє ефір. У випадку зайнятості ефіру вузол чекає випадковий проміжок часу, що визначається розміром «вікна змагань», і знову перевіряє ефір: якщо ефір вільний, розпочинає передачу. Колізія може виникнути лише у випадку збігу випадкових інтервалів вузлів, що чекають доступ на передачу. Ймовірність цієї події тим менша, чим більший розмір «вікна змагань». Виходячи з цього аналізу на величину PER при даному протоколі МД впливають наступні чинники: інтенсивність надходження заявок (пакетів) на вузлах мережі; кількість вузлів у мережі; розмір буферу вузлів мережі, час перебування заявки у буфері, пріоритет заявки у буфері; розмір «вікна змагань».

Якщо припустити, що при заданій інтенсивності надходження заявок (пакетів) однакового пріоритету від заданої кількості вузлів мережі обрано достатньо великий розмір «вікна змагань», та вузли мають достатньо великий розмір буферу, то ймовірність втрати пакету через протокол МД прямує до нуля. У цьому випадку модель обслуговування заявок в вузлах мережі зводиться до моделі з очікуванням без обмеження довжини черги [7]. Тоді параметр структурно-

інформаційної зв'язності зводиться до параметру структурної зв'язності:

$$H_{kl} = \frac{Z_{kl} - Z_{kl}(1 - P_{kl})}{Z_{kl}} = P_{kl} \quad (5)$$

Оцінка структурно-інформаційної зв'язності мережі в цілому проводиться по матриці $H = \|H_{kl}\|$, елементами якої є значення H_{kl} , якщо $Z_{kl} > 0$. Якщо $Z_{kl} = 0$, то значення елемента невизначене. 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 оцінює потенційну надійність мережі та є верхньою мережею ймовірності зв'язності між вузлами мережі. Однак, зв'язок між вузлами може бути невстановлений не тільки з причини порушення працездатності каналів, а з причини відсутності в даний момент часу вільних каналних ресурсів. Для визначення ймовірності зв'язності між вузлами мережі в умовах обмеженої пропускної спроможності каналів введено поняття *інформаційної зв'язності (ІЗ)* Q_{kl} від вузла k до вузла l , що визначається формулою:

$$Q_{kl} = \frac{Z_{kl} - R_{kl}}{Z_{kl}} = 1 - p_c \quad (6)$$

Формула (6), так само як і її параметрами, аналогічна (4). Різниця полягає лише у методиці визначення втраченого навантаження R_{kl} . При визначенні H_{kl} враховується втрачене навантаження тільки з причини відмови ребра (лінії зв'язку) та відмови доступу до каналного ресурсу, а при визначенні Q_{kl} – ще й з причини зайнятості всіх каналних ресурсів. З ростом пропускної спроможності каналів $H_{kl} \rightarrow Q_{kl}$.

До цих пір ми розглядали показники структурної надійності мережі відносно виділеної пари вузлів. Сукупність таких показників для всіх або деякої підмножини пар може достатньо повно охарактеризувати структурну надійність мережі в цілому. Але в умовах швидкої зміни структури БЕМ може бути занадто складним постійно перераховувати показники для всіх пар, тому пропонується використо-

вувати інший, інтегральний, критерій структурної надійності. По цьому критерію мережа вважається справною, якщо є зв'язок між всіма її вузлами та задається вимога на ймовірність такої події. Крім цього бажано б було знати наскільки надійною є зв'язана мережа, що постійно розвивається, на що не можуть дати відповідь вище розглянуті показники. Тому в даній роботі запропонований інтегральний показник – *глобальна пакетна зв'язність* (ГПЗ). Розглянемо його детальніше.

Представимо БЕМ у вигляді ненаправленого зваженого графу $G(N,A)$ (рис.2), що складається з N вершин (вузлів мережі) та сукупності ребер (каналів зв'язку) A , позначених певною вагою, що обернено пропорційна ймовірності зв'язності пари вузлів. Тоді ГПЗ 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 ГПЗ матиме наступний вигляд:

$$U = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N [A']_{ij} W_{ij}, \quad (7)$$

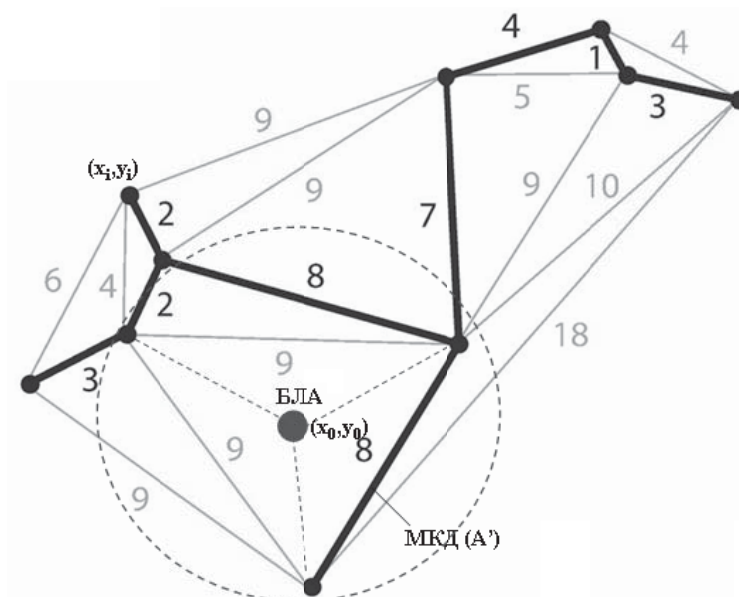
де $[A']_{ij}$ – набір ребер графу $G(N,A)$, що входять до складу МКД;

$W_{ij} = -\lg P_{ij}$ – вага ребра МКД, яка обернено пропорційна надійності пари вузлів, що визначається з (2)-(3), (4) чи (6).

Значення кожного з вище розглянутих показників структурної надійності може бути значно підвищено шляхом використання додаткових вузлів, повітряних ретрансляторів, роль яких можуть грати БЛА.

Постановка задачі у математичному вигляді

Нехай задано: множина наземних вузлів $V_i, i = \overline{1, N}$, де N – кількість наземних вузлів (МА), розосереджених в деякому районі r, m^2 ; множина БЛА $B_j, j = \overline{1, K}$, де K – кількість БЛА; $R = \text{const}$ – радіус зони покриття кожного БЛА (якщо вони знаходяться на однаковій висоті h відносно земної поверхні), м; $(x_i, y_i), i = \overline{1, N}$ – координати розміщення наземних вузлів по земній поверхні (отримані через GPS). Будемо вважати, що всі МА знаходяться на однаковій висоті відносно земної поверхні.

Рисунок 2 – Приклад графу $G(N,A)$ БЕМ (при $N=10$ та 1 БЛА)

Також для визначення структурно-інформаційної зв'язності та інформаційної зв'язності нехай задано: структура мережі (без застосування БЛА), значення PER для всіх ребер мережі, спосіб обслуговування заявок в вузлах мережі (протокол МД); план розподілення потоків (протокол маршрутизації); ймовірність відсутності каналного ресурсу в заданому напрямку.

Тоді постановку задачі можна сформулювати наступним чином.

Постановка задачі оптимізації за показниками локальної структурно надійності (задача 1): знайти таке розташування БЛА, яке дозволяє максимізувати локальну структурну надійність за показниками (2)-(3), (4), (5).

Постановка задачі оптимізації за показником глобальної структурної надійності (задача 2): знайти такі координати розміщення множини БЛА у просторі (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}) , $j = \overline{1, K}$, в яких цільова функція глобальної пакетної зв'язності U , що визначається з виразу (7), буде мінімальною. Математична постановка задачі буде мати наступний вигляд:

$$\min_{(x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}), j = \overline{1, K}} U \quad (8)$$

Алгоритм розміщення БЛА для підвищення СІЗ та ІЗ

Для знаходження оптимального принципу розміщення БЛА для підвищення СІЗ та ІЗ проаналізуємо наступні структури (рис.3).

На рис.3 зображені примітивні структури БЕМ з 4 наземними вузлами (показані крапками) та 1 БЛА (показаний зіркою), які відображають різні способи з'єднання БЛА із вузлами мережі. Проведемо аналіз структурно-інформаційної надійності даних структур у напрямку вузлів АВ.

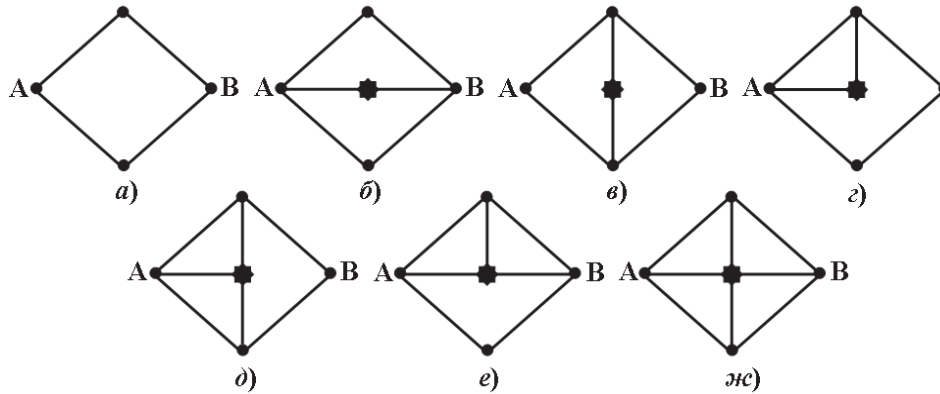


Рисунок 3 – Приклади структури БЕМ (з 4 МА та 1 БЛА)

Припустимо, що в якості протоколу МД використовується CSMA/CA, при цьому розмір «вікна змагань» та буферної пам'яті МА достатньо великий. В якості протоколу маршрутизації застосовується протокол, який визначає маршрут передачі даних за вимогою (наприклад, AODV), що дозволяє просте додавання/видалення вузлів до мережі без втрати інформаційних пакетів. Тоді пошук СІЗ зводиться до пошуку структурної зв'язності. Покладемо надійність всіх ребер однаковою та рівною p . Використовуючи формули для послідовного та паралельного з'єднання елементів (2), (3) та метод розкладання Шеннона – Мура, знайдемо відповідні вирази для ймовірності зв'язності вище вказаних структур.

$$P_{AB}^{(a)} = -p^4 + 2p^2 \quad (9)$$

$$P_{AB}^{(б)} = p^6 - 3p^4 + 3p^2 \quad (10)$$

$$P_{AB}^{(в)} = -2p^6 + 4p^5 - 2p^4 + p \quad (11)$$

$$P_{AB}^{(г)} = p^6 - p^5 - 2p^4 + p^3 + 2p^2 \quad (12)$$

$$P_{AB}^{(д)} = p^7 + 2p^6 + 2p^5 - 4p^4 + 4p^3 - p^2 + p \quad (13)$$

$$P_{AB}^{(е)} = -2p^7 + 5p^6 - 7p^4 + 2p^3 + 3p^2 \quad (14)$$

$$P_{AB}^{(ж)} = 4p^8 - 18p^7 + 27p^6 - 10p^5 - 9p^4 + 4p^3 + 3p^2 \quad (15)$$

Графічне відображення формул (9)-(15) показано на рис.4. Якщо вважати, що ймовірність відсутності каналного ресурсу в заданому напрямку дорівнює 0,5, тоді надійність кожного ребра структури становитиме: $p' = p \cdot 0,5$. Графік залежності інформаційної зв'язності від надійності ребра зображено на рис.5.

Аналізуючи графіки залежності структурної та інформаційної зв'язності (рис.4,5) при надійності ребра, наприклад, 0,8, можемо бачити, що значення інформаційної зв'язності менші відповідних значень структурної зв'язності. Та навіть при максимальній надійності ребра ($p = 1$) інформаційна зв'язність буде значно менше 1 через обмежену пропускну спроможність каналів мережі.

Також аналізуючи вище вказані графіки можемо бачити, що більшу надійність мають структури (ж), (е) і (б). Виходячи з цього можна зробити висновок, що для підвищення структурної 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.

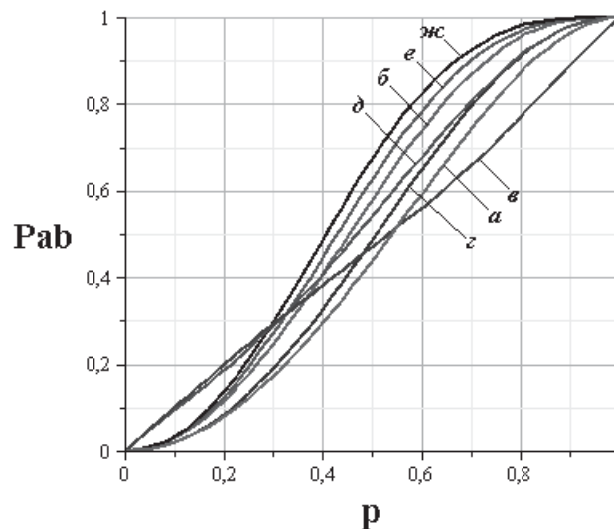


Рисунок 4 – Залежність структурної зв'язності від надійності ребра

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

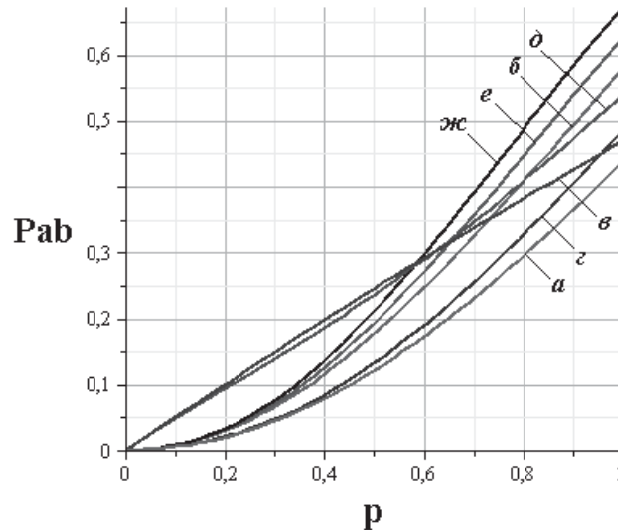


Рисунок 5 – Залежність інформаційної зв'язності від надійності ребра

Тоді алгоритм розміщення БЛА для підвищення СІЗ та ІЗ буде мати наступні кроки:

Крок 1. Вибір пари заданих вузлів БЕМ між якими треба підвищити структурну надійність. Відбір точок у радіусі $2R$ від середини відрізка між заданими вузлами.

Крок 2. Побудова кіл, описаних навколо кожного з відібраних вузлів та двох заданих. Відбір тих кіл, радіус яких не перевищує R та включає задані вузли мережі. Якщо таких кіл не має, то БЛА треба піднятися на більшу висоту, та здійснити перехід на Крок 1. Якщо є такі кола, то перехід на Крок 3.

Крок 3. Вибір серед побудованих кіл такого, що при розміщенні у його центрі БЛА, буде покрита найбільша кількість інших вузлів мережі. Якщо немає більше заданих пар вузлів для підвищення структурної надійності або скінчився апаратний ресурс (БЛА), то **КІНЕЦЬ**, інакше перехід на Крок 1.

Алгоритм розміщення БЛА для підвищення ГПЗ

Оскільки задача пошуку оптимального розміщення БЛА згідно формулювання (9) є NP-складною, тому алгоритм оптимального розміщення множини БЛА пропонується засновувати на градієнтному методі пошуку оптимуму.

У випадку ГПЗ БЛА будемо розміщувати таким чином, щоб мінімізувати МКД. Градієнт функції зв'язності для ГПЗ визначається наступним чином:

$$\nabla U(\vec{x}) = \left(\frac{\partial U(\vec{x})}{\partial x_0}; \frac{\partial U(\vec{x})}{\partial y_0}; \frac{\partial U(\vec{x})}{\partial z_0} \right), \quad (16)$$

де $\vec{x} = (x_0; y_0; z_0)$ – вектор точки розміщення БЛА у просторі.

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

$$\vec{x}^{-t+1} = \vec{x}^{-t} - \lambda^t \nabla U^t \quad (17)$$

де $\vec{x}^{-t}, \vec{x}^{-t+1}$ – поточне та наступне розміщення БЛА у просторі; λ^t – деяке число, що вибирається:

- постійним (в цьому випадку метод може розходитися);
- дробовим кроком, тобто довжина кроку в процесі спуску ділиться на деяке число;
- найшвидшим спуском: $\lambda^t = \arg \min_{\lambda} U(\vec{x}^{-t} - \lambda^t \nabla U(\vec{x}^{-t}))$.

В даній роботі випадку будемо користуватись найшвидшим спуском.

Умова зупинки (точність розрахунку) задається деяким малим числом ε .

Для того, щоб зменшити ймовірності потрапляння БЛА у локальний оптимум та зменшення кількості ітерацій алгоритму пропонується застосування градієнтного методу починати з деяких точок початкового наближення (ініціалізації), що можна визначити одним з наступним способів: решітчаста ініціалізація, центроїдна ініціалізація. Детально ці способи розглянуті в [4].

Таким чином загальний алгоритм оптимального розміщення множини БЛА у випадку ГПЗ матиме наступний вигляд (табл.1).

Обчислювальний експеримент

Для перевірки запропонованого алгоритму розміщення БЛА будемо використовувати наступні вихідні дані: кількість наземних вузлів (МА) $N = 7$, що випадковим чином розміщені в районі $r = 1000 \times 1000 \text{ м}^2$; потужність кожного МА становить 100 мВт; потужність кожного БЛА становить 300 мВт; спектральна потужність шуму становить 10^{-12} Вт/Гц; висота БЛА становить 100м; діелектричні втрати поширення сигналу пропорційні кубу відстані між вузла-

ми; тип коду – згортковий $133_8, 171_8$ зі швидкістю $1/2$; довжина пакету 1000 біт; модель каналів МА-МА, МА-БЛА – Релея із незалежними завмираннями; модель каналу БЛА-БЛА – канал із адитивним білим гаусовим шумом (АБГШ).

Таблиця 1

Алгоритм розміщення БЛА у випадку ГПЗ

Ініціалізація	$j = 0$, визначення точності розрахунку ε . <i>Крок 1.</i> $t = 0, j = j + 1$ Визначення початкової точки пошуку оптимального розміщення j -го БЛА $\vec{x}_j, j = \overline{1, K}$, використовуючи решітчасту або центроїдну ініціалізацію.
Ітерації	<i>Крок 2.</i> Найшвидший спуск для оптимізації зв'язності U , тобто $\vec{x}_j^{t+1} = \vec{x}_j^t - \lambda^t \nabla U_j^t$, де $\lambda^t = \arg \min_{\lambda} U(\vec{x}_j - \lambda^t \nabla U_j(\vec{x}_j))$. <i>Крок 3.</i> Перевірка умов зупинки: - якщо $\left \vec{x}_j^{t+1} - \vec{x}_j^t \right > \varepsilon$, то $t = t + 1$ та перехід на Крок 2; - інакше зупинка: $\vec{x}_j = \vec{x}_j^{t+1}$ та вивід j -го БЛА у точку \vec{x}_j . <i>Крок 4.</i> Перевірка залишку БЛА та проблемних ребер: якщо $j < K$ та $[A_{np}] \neq 0$ перехід на Крок 1, інакше КІНЕЦЬ.

Використовуючи вище вказаний алгоритм розміщення множини БЛА отримуємо графік залежності ГПЗ від координат розміщення 1 БЛА у просторі (рис.6) та графіки залежності ГПЗ від кількості БЛА при різній кількості МА N (рис.7) та при різному розмірі району розташування МА r (рис.8).

Аналізуючи рис.6 можемо бачити, що ГПЗ має глобальний оптимум та декілька локальних оптимумів. При розміщенні БЛА в точці з координатами (125,801,100) ГПЗ сягає свого максимального значення. Приріст ГПЗ від застосування 1 БЛА може сягати понад 500%.

Аналізуючи рис.7,8 можемо бачити, що ГПЗ може бути ще більше підвищеною при застосуванні декількох БЛА. Ефективність застосування множини БЛА залежить від кількості вузлів МА в мережі та розміру району розташування МА. При більшій кількості МА або при меншому районі розташування МА ГПЗ буде більшою для заданої кі-

лькості БЛА, оскільки МА матимуть більш міцну зв'язність між собою.

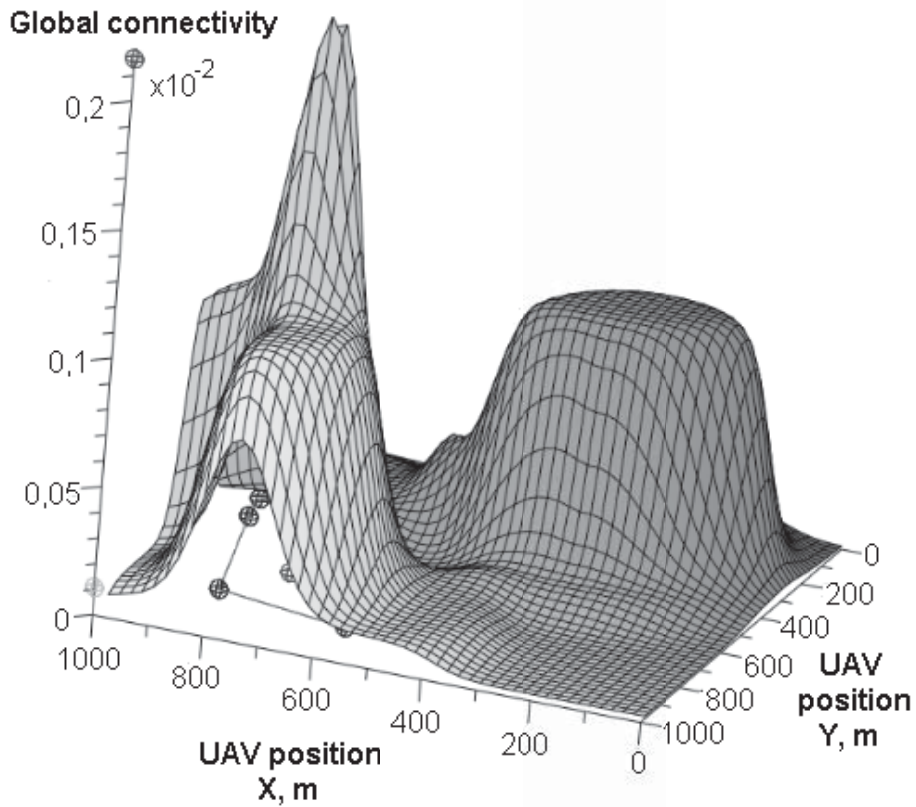


Рисунок 6 – Залежність ГПЗ від розміщення 1БЛА (N=8)

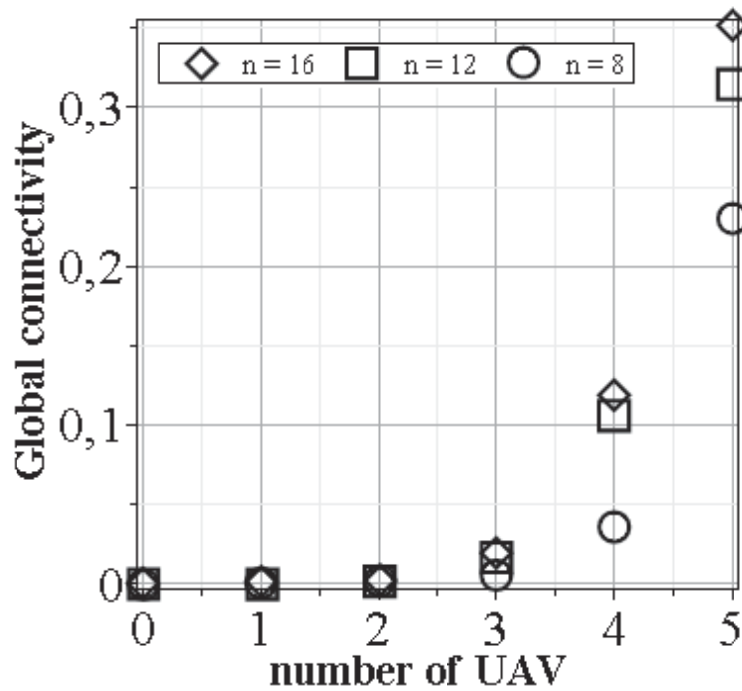
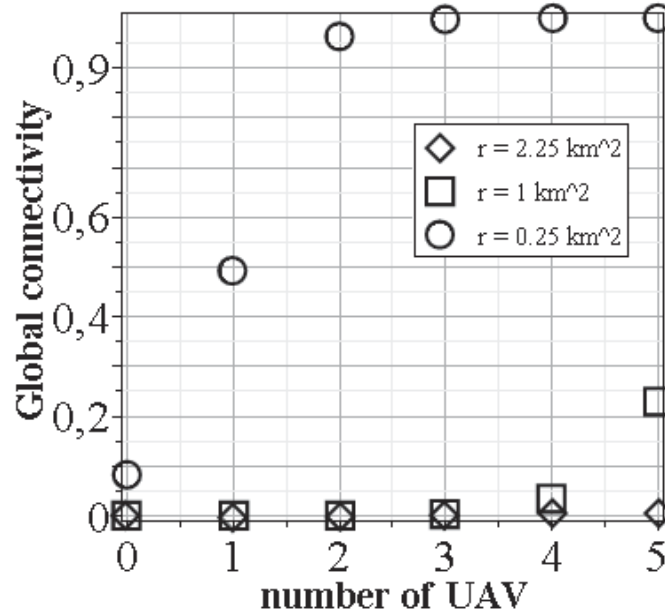


Рисунок 7 – Залежність ГПЗ від кількості БЛА (при $r=1\text{км}^2$)

Рисунок 8 – Залежність ГПЗ від кількості БЛА (при $N=8$)

Висновки

В даній роботі запропоновані показники локальної (СІЗ та ІЗ) та глобальної (ГПЗ) структурної надійності БЕМ, що враховують одночасно як структурні, так й функціональні характеристики мережі. Використання запропонованих показників для оцінки надійності БЕМ дозволяє оцінити не тільки потенційну надійність мережі – верхню межу структурної надійності мережі, а й її надійність з урахуванням алгоритму обслуговування заявок в вузлах мережі (протоколу МД), плану розподілення потоків (протоколу маршрутизації), обмежених пропускних спроможностей каналів. На прикладі мереж з різноманітною структурою було показано, що ймовірність зв'язності між вузлами мережі істотно залежить не тільки від надійності ребер (ліній зв'язку) мережі, а й від ймовірності наявності в даний момент часу вільних каналних ресурсів.

Для підвищення вище вказаних локальних та глобального показників структурної надійності БЕМ запропоновано алгоритми розміщення додаткових вузлів, роль яких виконують БЛА. Приріст ГПЗ від застосування одного БЛА може сягати понад 500%. При застосуванні більше ніж одного БЛА структурна надійність може бути ще більш підвищена.

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. 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(14). – С. 218–224.
5. Калекина 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.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 «Киевский университет», 2003. – 247 с.
8. Жиглявский А.А., Жилинкас А.Г. Методы поиска глобального экстремума. – М.: Наука, 1991. – 248 с.