

# МЕТОД ОЦІНКИ ЗВ'ЯЗНОСТІ ВУЗЛІВ БЕЗДРОТОВИХ ЕПІЗОДИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА УМОВИ ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

*Станіслав Валуйський, Олександр Лисенко, Сергій Чумаченко,  
Олександр Гуйда, Олена Фуртат, Ігор Сушин*

В роботі розглянутий метод оцінки зв'язності вузлів бездротових епізодичних мереж (БЕМ) за умови застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Запропоновано виконання оцінки зв'язності пари вузлів методом, який ґрунтується на: оцінці геометричної зв'язності, що обмежується максимальною дальністю радіовидимості на фізичному рівні та інтервалом уразливості заданого протоколу множинного доступу на каналному рівні; оцінці інформаційної зв'язності, що враховує наявність не тільки фізичного з'єднання заданої достовірності, а й наявність вільного каналного ресурсу, заданої величини затримки передачі при заданому граничному значенні трафіку; оцінці тривалості зв'язності з урахуванням мобільності вузлів мережі.

На основі аналітичних математичних моделей було досліджено тривалість зв'язності мобільних абонентів (вузлів) (МА) БЕМ, що складається із МА та БПЛА в умовах прямої радіо видимості та з урахуванням ретрансляції. Зв'язність пари вузлів визначається характеристиками різних рівнів інформаційної взаємодії OSI, такими як дальність радіозв'язку, пропускна здатність каналів, затримка передачі інформації та ін. Показано, що тривалість зв'язності прямо пропорційна розміру зони покриття та обернено пропорційна швидкості переміщення вузлів. На величину тривалості зв'язності також впливає характер (сценарій) мобільності вузлів. Було виконано моделювання переміщення вузлів за 4-ма сценаріями: «марш», «різнобій», «випадкове блукання в полі» та «випадкове блукання в місті». Найбільші значення тривалості зв'язності відповідають третьому сценарію, а найменші – другому (за умови фіксованого радіусу зони покриття та швидкості переміщення вузлів). Так середня тривалість зв'язності з'єднання «БПЛА-пішохід» на випадок «різнобою» становитиме порядку 36 хвилин, а з'єднання «БПЛА-автомобіль» порядку 5 хвилин. Отримані результати можуть бути використані у методі управління топологією мережі БПЛА.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, мобільна епізодична радіомережа, алгоритм, топологія, розміщення.

The paper considers a method for assessing the connectivity of nodes of wireless episodic networks (WEN) under the condition of using unmanned aerial vehicles (UAVs). It is proposed to perform an evaluation of the connectivity of a pair of nodes according to a method, which is based on: an evaluation of geometric connectivity, which is limited to the maximum range of radio visibility at the physical level and the vulnerability interval of a given multiple access protocol at the channel level; assessment of information connectivity, which takes into account the presence of not only a physical connection of a given reliability, but also the presence of a free channel resource, a given amount of transmission delay at a given traffic limit value; assessment of the duration of connectivity taking into account the mobility of network nodes.

On the basis of analytical mathematical models, the duration of connectivity of mobile subscribers (nodes) (MS) of the WEN consisting of MS and UAVs in direct radio visibility conditions and taking into account relaying was investigated. The connectivity of a pair of nodes is determined by the characteristics of different levels of OSI information interaction, such as radio range, channel bandwidth, information transmission delay, etc. It is shown that the duration of connectivity is directly proportional to the size of the coverage zone and inversely proportional to the speed of movement of nodes. The nature (scenario) of node mobility also affects the duration of connectivity. The simulation of the movement of nodes was carried out under 4 scenarios: «march», «skirmish», «random wandering in the field» and «random wandering in the city». The largest values of the duration of connectivity correspond to the third scenario, and the smallest to the second (with a fixed radius of the coverage area and the speed of movement of nodes). Thus, the average connection duration of the UAV-pedestrian connection in the event of a «difference» will be of the order of 36 minutes, and the UAV-car connection of the order of 5 minutes. The obtained results can be used in the UAV network topology control method.

Keywords: unmanned aerial vehicle, mobile episodic radio network, algorithm, topology, placement.

## Постановка проблеми

Рух наземних мобільних абонентів призводить до швидкої і непередбачуваної зміни топології епізодичних радіомереж, що може викликати порушення зв'язності мережі і втрату зв'язку між деякими абонентами. Підвищення зв'язності таких мереж можливе шляхом введення нових додаткових вузлів повітряного базування БПЛА, що мають більшу зону радіопокриття і можуть поєднувати роз'єднані ділянки мережі. На сьогодні не достатньо вирішеною є проблема оптимального управління положенням таких БПЛА, а саме проблема поєднання управління рухом існуючих БПЛА та розгортання нових БПЛА, щоб кількість нових розгорнутих БПЛА для підтримки зв'язку наземних абонентів могла бути мінімізована.

## Аналіз останніх досліджень і публікацій

Роботи Лисенка О.І., Романюка В.А., Чумаченка С.М., Валуйського С.В. присвячені теоретичним і практичним дослідженням методів підвищення пропускної здатності епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ [1-3]. У роботі [4] автори також досліджують проблему підвищення зв'язності мобільних епізодичних радіомереж за рахунок розміщення нових і переміщення існуючих БПЛА, але математична модель не враховує дальність зв'язку повітря-повітря, що буде враховано у даній роботі.

## Постановка завдання

Зв'язність пари вузлів визначається характеристиками різних рівнів інформаційної взаємодії OSI, такими як дальність радіозв'язку, пропускна здатність каналів, затримка передачі інформації тощо. В даній роботі пропонується розрахунок зазначених характеристик та їх аналіз залежно від системних параметрів мережі.

Оцінку зв'язності пари вузлів пропонується виконувати таким методом:

1. Оцінка геометричної зв'язності (у вузькому змісті), що обмежується максимальною дальністю радіовидимості на фізичному рівні (із заданим відношенням сигнал/шум на приймачі) та інтервалом уразливості заданого протоколу множинного доступу на каналному рівні.

2. Оцінка інформаційної зв'язності (у широкому змісті), що враховує наявність не тільки фізичного з'єднання заданої достовірності, а й вільного каналного ресурсу (заданої пропускної здатності каналу), заданої величини затримки передачі при заданому граничному значенні трафіку.

3. Оцінка тривалості зв'язності з урахуванням мобільності вузлів мережі.

Результатом даного дослідження будуть системні та функціональні параметри мережі, що ляжуть в основу вихідних даних і обмежень математичної моделі, а також дадуть змогу на етапі планування визначити початкове розміщення мережі БПЛА

## Виклад основного матеріалу.

### 1. ОЦІНКА ДАЛЬНОСТІ РАДІОВИДИМОСТІ ПАРИ «ВУЗОЛ-ВУЗОЛ»

Бездротова епізодична мережа передачі даних зазвичай функціонує у межах прямої радіо видимості вузлів. Однак слід розрізняти пряму геометричну видимість та пряму радіо видимість (*line of site, LOS*), що передбачає наявність не лише прямої геометричної видимості, а й вільної першої зони Френеля, у якій розповсюджується основна енергія радіосигналу.

Під час роботи на рівнинній поверхні Землі радіус зони прямої (геометричної) видимості ( $R$ , км) визначається висотами розміщення передавальної ( $H$ , м) та приймаючої ( $h$ , м) антени:  $R = 3,57(\sqrt{KH} + \sqrt{Kh})$ , де  $K$  – поправочний коефіцієнт, що враховує рефракцію радіохвиль.

На рис.1 наведені радіуси прямої видимості при  $K=1$  (а) та  $K=4/3$  (б).

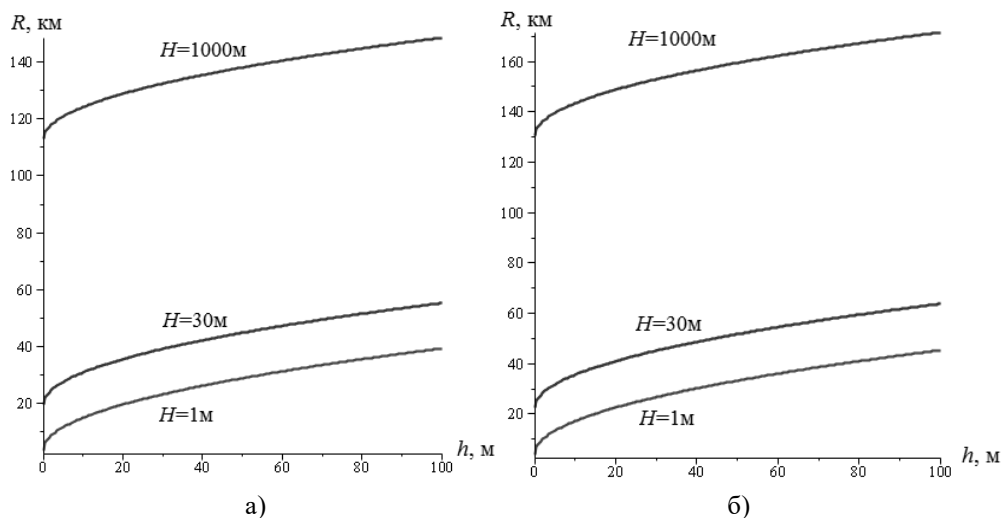


Рис.1. Дальність прямої видимості з урахуванням висоти підвісу антен за різних поправочних коефіцієнтах:  $K=1$  (а) та  $K=4/3$  (б)

Із графіків видно, що типове значення геометричної видимості пари абонентів (пішоходів), що розміщені на рівнинній місцевості, в ідеалі може становити 7-10 км. Тоді як дальність прямої видимості між пішоходом та БПЛА сягає понад 130 км.

Крім цього, дальність зв'язку визначається енергетикою радіолінії, коли відношення сигнал-шум в точці прийому не менше визначеної величини для забезпечення заданої імовірності бітової помилки (BER) при заданому виді модуляції (відповідній швидкості передачі). Розглянемо це детальніше.

Для розрахунку дальності радіозв'язку скористаємося формулою розрахунку втрат у вільному просторі:

$$FSL = 32,45 + 20(\lg F + \lg D), \quad (1)$$

де  $FSL$  (Free Space Loss) – втрати у вільному просторі, дБ;

$F$  – центральна частота, на якій працює система, МГц;

$D$  – відстань між приймачем і передавачем, км.

З іншого боку  $FSL$  визначається сумарним підсиленням системи  $Y$  (дБ):

$$Y = P_t + G_t + G_r - P_{r \min} - L_t - L_r, \quad (2)$$

де  $P_t$  - потужність передавача, дБмВт;

$G_t$  - коефіцієнт підсилення передавальної антени, дБі;

$G_r$  - коефіцієнт підсилення приймальної антени, дБі;

$P_{rmin}$  - чутливість приймача на заданій швидкості передачі, дБмВт;

$L_t$  - втрати у антенно-фідерному тракті (АФТ) передавача, дБ;

$L_r$  - втрати у АФТ приймача, дБ.

Тоді  $FSL$  можна визначити так:

$$FSL = Y - SOM,$$

де  $SOM$  (*System Operating Margin*) – запас енергетики радіолінії (дБ), що враховує можливі негативні фактори, які впливають на дальність зв'язку, такі як:

- температурний дрейф чутливості приймача та вихідної потужності передавача;
- різноманітні атмосферні явища: туман, сніг, дощ і т.п.;
- неузгодженість антени приймача (передавача) з АФТ;
- завмирання сигналу через його багатопроменевість (multi pass) тощо.

Зазвичай  $SOM$  береться рівним 10-15 дБ [1-13].

Таким чином дальність зв'язку визначатиметься наступною формулою:

$$D = 10^{\left(\frac{P_t + G_t + G_r - P_{rmin} - L_t - L_r - SOM - 33}{20} - \lg F\right)}, \quad (3)$$

Враховуючи характеристики типових точок бездротового доступу стандарту 802.11a,b,g [9-13] та покладаючи  $G_t = G_r = 0$ дБі,  $L_t = L_r = 0$ дБ,  $SOM = 10$ дБ,  $F = 2437$ МГц, отримаємо з (3) значення максимальної дальності стійкого радіозв'язку залежно від параметрів енергетики радіолінії. Максимальна дальність стійкого радіозв'язку на мінімальній швидкості (1Мбіт/с) не перевищує 1000м.

Реальний рельєф земної поверхні та наявність будівель, дерев, високовольтних ліній передачі тощо, може ще більше обмежувати дальність зв'язку. Існують безліч емпіричних моделей, що дозволяють спрогнозувати середні втрати передачі в умовах сучасного міста, серед яких відомі такі: Окамура, Хата, Уолфіша – Ікегами, Ксіа – Бертоні, Бардіна – Димовича та ін. [9-13].

Згідно із моделлю Хата [9-13] середні втрати передачі можна визначити з такої формули:

$$L = 69,55 + 26,15 \lg F - 13,82 \lg H - \alpha(h) + (44,9 - 6,55 \lg H) \lg D,$$

де в умовах великого міста  $\alpha(h) = 3,2(\lg 11,75h)^2 h - 4,97$ .

Звідси максимальна дальність радіозв'язку дорівнюватиме:

$$D^* = 10^A, \text{ де } A = \frac{Y - 69,55 - 26,15 \lg F + 13,82 \lg H + 3,2(\lg 11,75h)^2 h - 4,97}{44,9 - 6,55 \lg H}. \quad (4)$$

Підставляючи наступні вихідні дані:  $H=h=1$ м,  $F=2437$ МГц,  $Y=100$ дБмВт у (4), отримаємо  $D^*=0,630$  км. Іншими словами, в умовах міста типова дальність радіозв'язку «вузол-вузол» в епізодичних мережах не перевищує 500-600м. Крім цього максимальна дальність може бути обмежена інтервалом уразливості за умови функціонування певного протоколу множинного доступу, що буде визначено у наступному підрозділі.

## 2. ОЦІНКА ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КАНАЛІВ БЕМ

Основними характеристиками, що визначають ефективність функціонування протоколу множинного доступу до загального каналного ресурсу, є [9-13]: середня швидкість передачі, середня затримка передачі та граничне значення трафіку, за якого досягається межа стійкої роботи мережі (межа стійкості). Ці параметри визначаються як функція системних параметрів, серед яких основними є інтенсивність трафіку, швидкість передачі, довжина пакету, геометричні розміри мережі або узагальнюючий їх інтервал уразливості.

Під інтенсивністю  $G$  надходження пакетів на передачу, що була вказана раніше, будемо розуміти сумарну інтенсивність, що включає як вхідний потік первинних пакетів  $Z_1$ , так і потік пакетів  $Z_2$ , що передаються повторно. Потік  $Z_1$  кожного вузла формують як власні пакети, так ті, що потрібно ретранслювати від інших вузлів (визначаються згідно заданої матриці тяжіння  $\Gamma$ ), а потік  $Z_2$  визначаються процедурними характеристиками протоколу МД та значеннями його системних параметрів, а саме інтервалом часу перед повторною передачею. На практиці для стійкої роботи мережі інтенсивність поточного трафіку не має перевищувати  $0,8g$ , де  $g$  – поріг стійкості, що визначається типом протоколу МД [2-8].

На практиці зазвичай для взаємодії МА на каналному рівні використовують протокол випадкового множинного доступу із контролем несучої (МДКН). Для нашого випадку оберемо гнучку стратегію МДКН, тоді, згідно із [9-13] середню швидкість передачі можна визначити за наступною формулою:

$$S = \frac{G \exp(-aG)}{G(1+2a) + \exp(-aG)}, \quad (5)$$

де  $a$  – нормований максимальний час розповсюдження радіосигналу в мережі.

Враховуючи, що  $a = \frac{x \cdot V}{c \cdot L}$ , де  $x$  – максимальна відстань між ретранслятором і абонентом (тобто між

МА),  $m$ ;  $c$  – швидкість розповсюдження сигналу, м/с;  $L$  – довжина пакету, біт;  $V$  – швидкість передачі, біт/с, та підставляючи  $a$  в 5 отримаємо:

$$S = \frac{G \cdot \exp\left(-\frac{x \cdot V}{c \cdot L} G\right)}{G\left(1 + 2\frac{x \cdot V}{c \cdot L}\right) + \exp\left(-\frac{x \cdot V}{c \cdot L} G\right)} \quad (6)$$

Підставляючи наступні вихідні дані:  $V=11\text{Мбіт/с}$ ,  $c=3 \cdot 10^8\text{м/с}$ ,  $L=1000\text{біт}$  у вираз (5), матимемо такі графіки залежності  $S$  на каналному рівні МА-МА (рис.2, 3, 4).

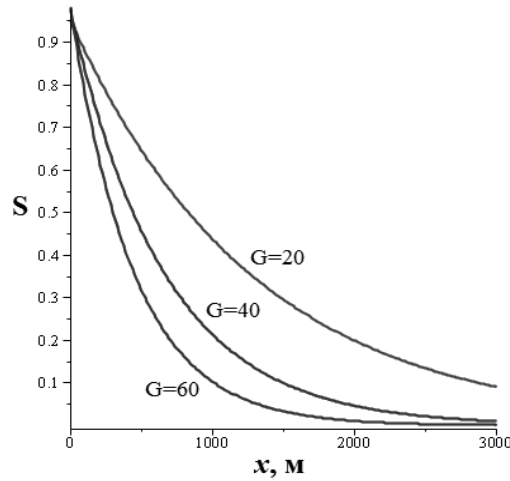


Рис.2. Графіки залежності ПЗ каналу МА-МА від відстані між вузлами при різних значеннях інтенсивності трафіку

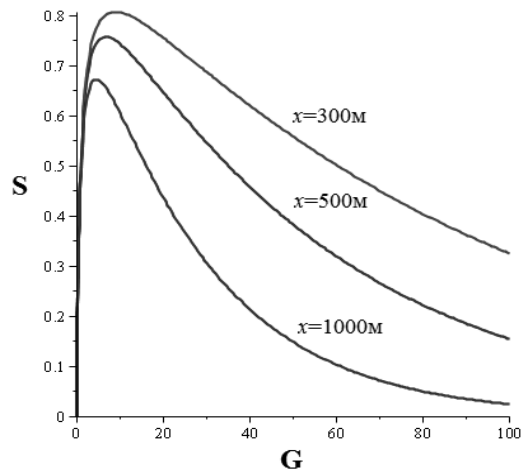


Рис.3. Графіки залежності ПЗ каналу МА-МА від інтенсивності трафіку при різних значеннях відстані між вузлами

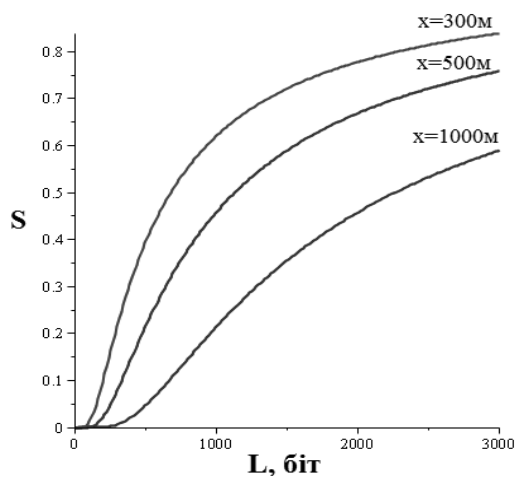


Рис.4. Графіки залежності ПЗ каналу МА-МА від довжини пакету при різних значеннях відстані між вузлами (при  $G=40$ )

Аналізуючи графіки на рис.2, можемо бачити, що середня швидкість передачі монотонно спадає у разі збільшенні максимальної відстані між вузлами  $x$ . Це пов'язано з тим, що при збільшенні  $x$  зростає зона уразливості  $a$ , що спричиняє зростання кількості колізій при організації МД. Також згідно з рис.3 збільшення  $x$  призводить до зменшення межі стійкості  $g$  та діапазону стійкої роботи протоколу МД. Так при  $x=300\text{м}$  ( $a=0,011$ )  $g$  становить приблизно 9 ( $S_{\text{max}} \approx 0,81$ ), при  $x=500\text{м}$  ( $a=0,0183$ )  $g \approx 6,8$  ( $S_{\text{max}} \approx 0,76$ ), а при  $x=1000\text{м}$  ( $a=0,0366$ )  $g \approx 4,6$  ( $S_{\text{max}} \approx 0,67$ ). Згідно з рис.10 проблему збільшення пропускної здатності при заданому  $x$  (або ж еквівалентно збільшення максимальної відстані між МА  $x$  при заданій  $S$ ) можна вирішити, збільшуючи довжину пакету  $L$ , однак водночас зростає ймовірність ураження пакета завадою та час доставки пакетів у мережі. Також цю проблему можна вирішити шляхом зменшення швидкості передачі  $V$  (тобто виділеної частотної смуги  $\Pi$ ), але це – нерационально, оскільки одночасно знижуються інші основні характеристики мережі – пропускна здатність та коефіцієнт використання смуги частот. Отже, вибір максимальної відстані між вузлами (радіусу радіо покриття МА)  $x$  визначається мінімальним допустимим значенням пропускної здатності протоколу МД при заданих  $V$  та  $L$ .

Організація доступу до каналного ресурсу мережі БПЛА можлива декількома способами:

1. Організація  $n$ - частотного моно каналу, до якого підключені всі абоненти. В роботі [9, 12] детально розглянуто 2- частотний моно канал. Такий спосіб дозволяє кожен з переданих абонентом пакетів ретранслювати через мережу ретрансляторів в усіх стільниках мережі. Однак для уникнення самозбудження ланцюжка ретрансляторів, кожен з них після передачі пакету повинен мати період нечуттєвості, рівний  $2a+1$ , що значно збільшує затримку передачі кожного пакету. Окрім цього, мобільність БПЛА значно ускладнює дотримання захисних інтервалів між стільниками, що працюють на однакових частотах. Ці проблеми можна вирішити шляхом застосування більшої кількості робочих частот та розробки ефективного методу розподілення радіочастотного ресурсу, адаптивного до переміщення БПЛА у просторі, що може бути предметом окремого дослідження.

2. Вище перелічені проблеми також можна вирішити за допомогою спеціальних процедур МД та пакетної маршрутизації, що можуть значно зменшити кількість ретрансляції та збільшити пропускну здатність мережі. Отож, завдяки адаптивним процедурам резервування пакетів та вирішення конфліктів можливо забезпечити пропускну здатність МД  $S$  не нижче 0,9 при  $a=0,01$  у досить широкому діапазоні трафіку  $G$  [9, 12]. Інтервал уразливості  $a=0,01$  відповідає відстані між ретрансляторами порядку 5-15км (в залежності від системних параметрів), що цілком прийнятно для організації мережі на основі мініатюрних БПЛА. Більше того, ці процедури, на відміну від звичайного МДКН, дозволять швидко адаптуватися до змін вхідного трафіку, викликаного мобільністю МА та БПЛА.

Отже, застосовуючи, наприклад, адаптивний протокол випадкового МД із резервуванням (АПР), значення середньої швидкості передачі у каналах МА-БПЛА та БПЛА-БПЛА можна визначити таким чином:

$$S = \frac{GN \exp(-aG)}{1 + GB}, \quad (7)$$

де  $N$  – розмір блоку пакетів, що резервуються;

$B$  – середній час зайнятого стану каналу, який можна визначити так:

$$B = (N + b + 2a - r) \exp(-aG) + b + a + r \quad (8)$$

де  $b$  – тривалість пакету резервування, що надсилає абонент, та пакету дозволу на передачу, що надсилає у відповідь ретранслятор;

$r$  – тривалість часу від надходження останнього конфліктного пакету, який можна визначити таким чином:

$$r = a - \frac{1 - \exp(-aG)}{G}, \quad (9)$$

Враховуючи, що  $G$  – це інтенсивність надходження блоків з  $N$  пакетів, пропускну здатність каналів МА-БПЛА, БПЛА-БПЛА можна записати так:

$$S = \frac{GN \exp(-aG)}{1 + G((N + b + a + \frac{1 - \exp(-aG)}{G}) \exp(-aG) + b + 2a - \frac{1 - \exp(-aG)}{G})}, \quad (10)$$

Підставляючи наступні вихідні дані:  $V=11\text{Мбіт/с}$ ,  $c=3 \cdot 10^8\text{м/с}$ ,  $L=1000\text{біт}$  у вираз (10), матимемо наступні графіки залежності  $S$  каналів МА-БПЛА та БПЛА-БПЛА (рис.5, 6, 7, 8, 9).

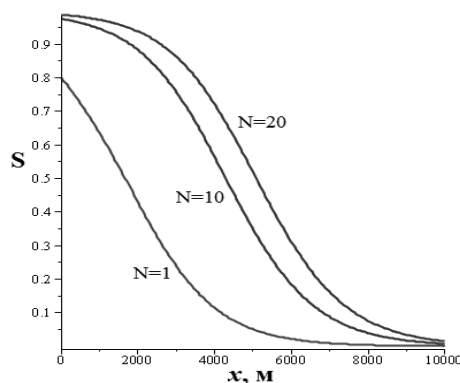


Рис.5. Графіки залежності ПЗ каналу БПЛА-БПЛА (БПЛА-МА) від відстані між вузлами при різних значеннях розміру блоку резервування (при  $G=20$ )

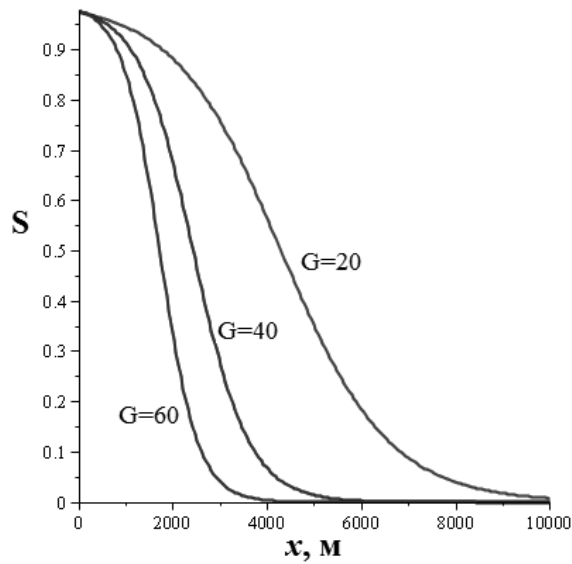


Рис.6. Графіки залежності ПЗ каналу БПЛА-БПЛА (БПЛА-МА) від відстані між вузлами при різних значеннях інтенсивності трафіку (при  $N=10$ )

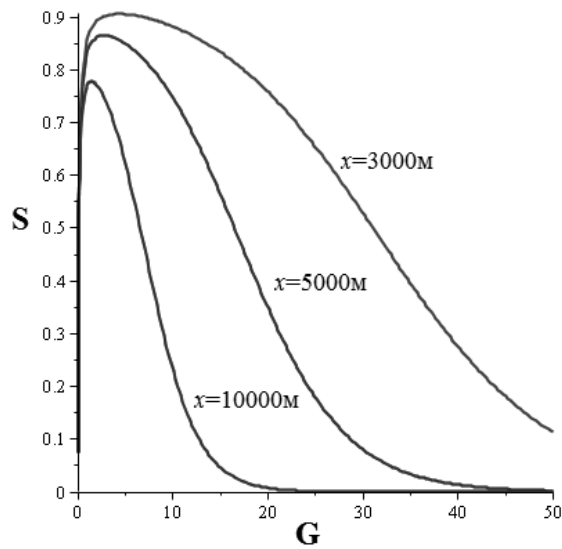


Рис.7. Графіки залежності ПЗ каналу БПЛА-БПЛА (БПЛА-МА) від інтенсивності трафіку при різних значеннях відстані між вузлами (при  $N=10$ )

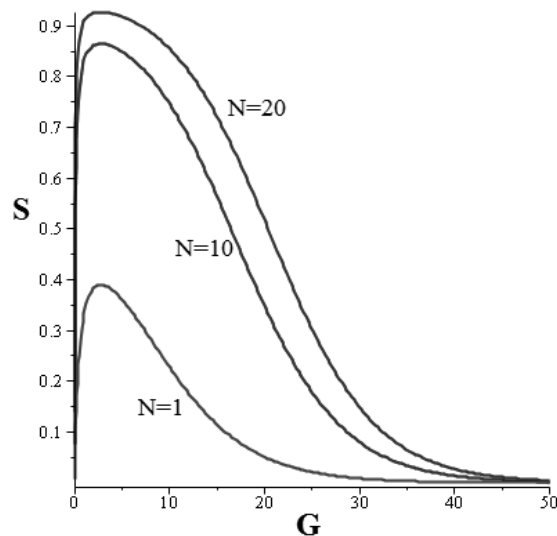


Рис.8. Графіки залежності ПЗ каналу БПЛА-БПЛА (БПЛА-МА) від інтенсивності трафіку при різних значеннях розміру блоку резервування (при  $x=5000$ м)

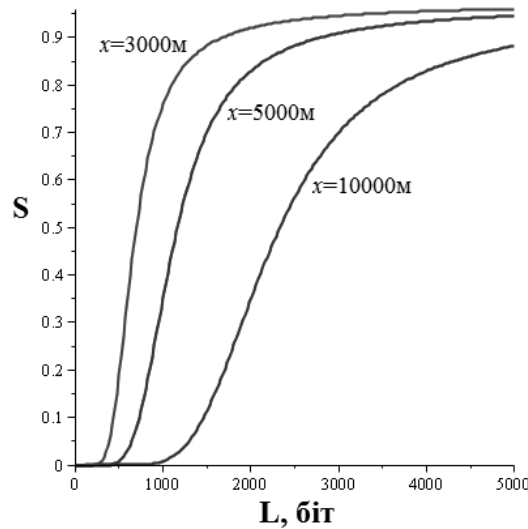


Рис.9. Графіки залежності ПЗ каналу БПЛА-БПЛА (БПЛА-МА) від довжини пакету при різних значеннях відстані між вузлами (при  $N=10$ ,  $G=20$ )

Аналізуючи рис.5, можемо бачити, що застосування блочного ( $N=10$ ,  $N=20$ ) резервування дає змогу значно розширити максимальну відстань між БПЛА та МА (БПЛА та БПЛА) при заданій пропускній здатності на відміну від звичайного гнучкого протоколу МДКН ( $N=1$ ). Також згідно з рис.6-9 можна бачити, що протокол АПР дозволяє значно розширити діапазон можливої інтенсивності трафіку та підвищити стійкість роботи мережі БПЛА зі зміною вхідного навантаження.

Отже, проведений аналіз залежності пропускної здатності каналів МА-МА та БПЛА-БПЛА (МА-БПЛА) від системних параметрів дозволяє визначити зв'язність мережі на каналному рівні та оцінити максимальну дальність зв'язку при заданій пропускній здатності каналу. Так, при заданому рівні  $S$ , наприклад, 0,5, максимальна відстань між МА має становити не більше 500м за умови інтенсивності трафіку пакетів не більше 38, максимальна відстань МА-БПЛА має становити не більше 5000м при інтенсивності трафіку блоків пакетів ( $N=10$ ) не більше 17, а максимальна відстань БПЛА-БПЛА має становити не більше 10000м при інтенсивності трафіку блоків пакетів ( $N=30$ ) не більше 10. Визначивши у такий спосіб максимальні інтервали уразливості, можна визначити необхідну енергетику, потрібну для реалізації заданого протоколу МД.

Однак, отримані вище значення дальності зв'язку пари «вузол-вузол» не дозволяють оцінити геометрію всієї мережі (дальність зв'язку із ретрансляцією), що визначається величиною затримки пакету із кінця в кінець на мережному рівні при заданому типі трафіку. Дослідженню цього питання присвячений наступний підрозділ.

### 3. ОЦІНКА ЗАТРИМКИ ПЕРЕДАЧІ ПАКЕТУ В КАНАЛАХ БЕМ

Організація інформаційної взаємодії на мережному рівні між будь-якою парою абонентів мережі потребує наявності маршруту передачі даних заданої якості (QoS). Критерієм якості або метрикою маршруту (наприклад, при передачі голосового трафіку) може виступати кількість ретрансляцій або ж величина затримки передачі пакету із кінця в кінець через мережу проміжних вузлів-ретрансляторів. У загальному вигляді ця величина матиме наступний вигляд:  $D = T_{\text{пак}} + T_{\text{дост}} + T_{\text{росн}} + T_{\text{обр}} + T_{\text{буф}}$ , де  $T_{\text{пак}}$  – час пакетизації (формування пакету у вузлі-відправнику), що залежить від типу трафіку (алгоритму формування пакету, наприклад, для голосу – від типу кодеку);  $T_{\text{дост}}$  – середній час затримки доступу до каналу (для випадкового МД), що залежить від інтенсивності трафіку та пропускної спроможності каналу;  $T_{\text{росн}}$  – час розповсюдження сигналу в середовищі передачі (не залежить від типу трафіка);  $T_{\text{обр}}$  – час обробки пакету в проміжних вузлах мережі (залежить від типу трафіку);  $T_{\text{буф}}$  – час затримки у буфері проміжних вузлах мережі (залежить від типу трафіку, дисципліни обслуговування, пріоритетності трафіку (SLA)). Для пакету IP середньої довжини 576 біт та при швидкості кодування 64кбіт/с час пакетизації становитиме 9 мс, чим можна знехтувати при грубій оцінці затримки передачі. Час обробки пакету в проміжних вузлах мережі теж будемо вважати несуттєвим. Також припустимо, що в мережі передається однорідний трафік, на проміжних вузлах застосовується дисципліна FIFO («перший прийшов, перший обслуговується»), при чому пакет в вузлі обробляється відразу без відправки його у чергу, тобто часом затримки в буфері можна знехтувати.

Тоді середній час затримки передачі пакету на ланці МА-МА матиме спрощений вигляд:

$$D_1 = \left( \frac{G}{S} - 1 \right) (X + (1+a)P_1) + 1 + a, \tag{11}$$

де  $P_1$  – ймовірність вільного стану радіоканалу;  $X$  – нормований за  $T$  середній час затримки перед повторною передачею ( $X \gg T$ ).

Покладаючи, що  $P_1 = \frac{1}{G(1+2a) + \exp(-aG)}$ ,  $a = \frac{x_1 \cdot V}{c \cdot L}$  та з урахуванням (5), матимемо:

$$D_1 = \frac{G(1 + 2 \frac{x_1 \cdot V}{c \cdot L})}{\exp(-\frac{x_1 \cdot V}{c \cdot L} G)} \left( X + \frac{1 + \frac{x_1 \cdot V}{c \cdot L}}{G(1 + 2 \frac{x_1 \cdot V}{c \cdot L}) + \exp(-\frac{x_1 \cdot V}{c \cdot L} G)} \right) + 1 + \frac{x_1 \cdot V}{c \cdot L}. \quad (12)$$

У свою чергу середній час затримки передачі пакету на ланці БПЛА-БПЛА (МА-БПЛА) матиме такий вигляд:

$$D_2 = \frac{1}{N} \left( \left( \frac{1}{P} - 1 \right) (X + (b + a + r)P_i) + N + a \right), \quad (13)$$

де  $P = \frac{\exp(-aG)}{1 + GB}$  – ймовірність вдалої передачі блоку пакетів;

$P_i = \frac{1}{1 + GB}$  – ймовірність вільного стану радіоканалу.

Підставляючи наступні вихідні дані:  $V=11\text{Мбіт/с}$ ,  $c=3 \cdot 10^8\text{м/с}$ ,  $L=1000\text{біт}$ ,  $b=0,1$ ,  $X=2$  у вирази (12), (13), матимемо такі графіки залежності середньої затримки передачі однієї ланки МА-МА (при  $x=500\text{м}$ ) та однієї ланки БПЛА-МА (БПЛА-БПЛА) (при  $x=3000\text{м}$ ,  $N=10,20,30$ ) від інтенсивності трафіку (рис. 10).

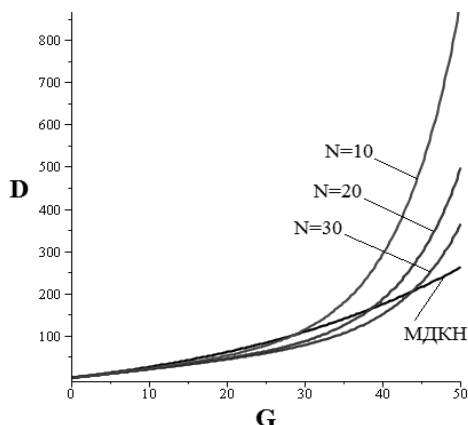


Рис.10. Графіки залежності середньої затримки передачі однієї ланки МА-МА (при  $x=1000\text{м}$ ) та однієї ланки БПЛА-БПЛА, БПЛА-МА (при  $x=5000\text{м}$ ,  $N=5,10,15$ ) від інтенсивності трафіку

Аналізуючи рис.10 можемо бачити, що при інтенсивності трафіку менше, ніж 30, менший час затримки має ланка мережі із застосуванням БПЛА, аніж ланка МА-МА, при чому граничне значення інтенсивності трафіку тим більше, чим більше розмір блоку пакетів у протоколі АРП. Також слід зазначити, що при однаковій затримці передачі ланка із БПЛА має шестикратний вигреш у відстані. Отже для мінімізації затримки при передачі інформації на великі відстані доцільніше передавати інформацію через мережу БПЛА, а на короткі – через мережу МА. Тоді виникає практичний інтерес визначення граничної кількості ретрансляцій через МА, за якої необхідно переключатися на мережу БПЛА, що й буде розглянуто далі.

Якщо вважати, що маршрут передачі інформації складається з  $M$  ланок, тоді загальна затримка пакету «із кінця в кінець» для мережі МА та мережі БП становитиме відповідно:

$$D_1' = D_1 \cdot M, \quad D_2' = D_2 \cdot M. \quad (14)$$

Припустимо, що середнє навантаження однієї ланки МА-МА становить  $G_1=20$ , а навантаження однієї ланки БПЛА-БПЛА –  $G_2=50$ , тоді залежність затримки передачі від кількості ланок маршруту матиме такий вигляд (рис.11).

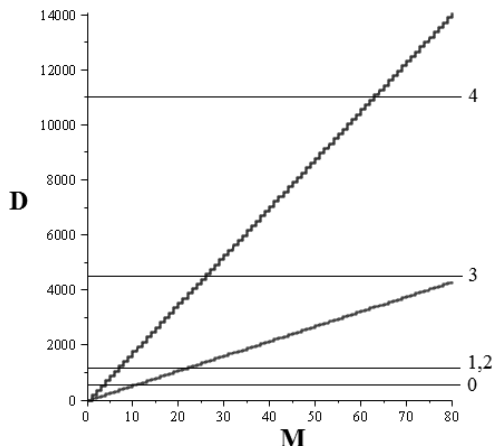


Рис.11. Графіки залежності середньої затримки передачі пакету «із кінця в кінець» через мережу МА (1) та через мережу БПЛА (2) із зазначенням рівнів QoS (ITU-T Y.1541)



Аналізуючи рис.11, можемо бачити, що при вдвічі більшому навантаженні затримка передачі на одній ланці із БПЛА втричі переважає затримку передачі на одній ланці МА. Отже, при кількості ланок у маршруті мережі МА більше, ніж 3, доцільніше передавати інформацію через мережу БПЛА, або через мережу МА. Також отриманий графік дозволяє оцінити максимальну дальність передачі інформації «із кінця в кінець» (геометрію всієї мережі) із ретрансляцією через проміжні вузли. Вона обмежується вимогами щодо величини затримки передачі для окремого типу трафіку. На рис.11 горизонтальними лініями показані рівні якості QoS для IP мереж згідно з ІТУ-Т Y.1541.

#### 4. ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ АБОНЕНТІВ У СТІЛЬНИКАХ МА ТА БПЛА

Популяція мережі (число абонентів  $n$ ) може бути визначена наступним чином. Для обраного протоколу МД встановлюється залежність пропускної спроможності каналу  $S$  від трафіку  $G$  при заданому значенні  $a$ , що визначається максимальною відстанню  $x$ . Наприклад, для гнучкого МДКН вказана залежність відображається виразом (5), а для АПР – виразом (7). Графік вказаних залежностей показано на рис.3 та рис.7 відповідно. Абсциса екстремума функції  $S(G)$  або деякого її граничного значення (наприклад, 0,5) визначає гранично допустимий трафік  $G_{\max}$  для заданого протоколу при  $a=a_{\max}$ . Виходячи з вимог стійкості режиму мережі, ставимо

наступну вимогу  $\sum_{i=1}^n \bar{G}_i < G_{\max}$ , де  $\bar{G}_i$  – середній трафік, що генерує кожен абонент стільника мережі.

Задаючись  $\bar{G}_i$ , знаходимо верхню границю числа абонентів стільника мережі:

$$n_{\max} \leq G_{\max} / \bar{G}_i. \quad (15)$$

Однак, із такою кількістю абонентів не виключено, що середня затримка передачі пакетів  $D$  може мати значення, що перевищують допустимі. Тому скористуємось залежністю величини середньої затримки передачі від пропускної здатності протоколу МД  $D(S)$ , що визначається виразом (11) для гнучкого МДКН та виразом (13) для АПР. Задаючись допустимим значенням  $D_{\text{доп}}$ , знаходимо величину оптимального значення пропускної здатності протоколу  $S_{\text{опт}}$  та відповідну величину трафіку  $G_{\text{опт}}$ . Тоді оптимальну кількість абонентів стільника мережі можна визначити так:

$$n_{\text{опт}} = G_{\text{опт}} / \bar{G}_i. \quad (16)$$

Використовуючи вирази (5) та (7) та обмеження ПЗ  $S=0,5$  отримаємо наступні граничні допустимі трафіки: для стільника МА трафік пакетів становитиме  $G'_{\max} \approx 35$  при  $x=500\text{м}$ , для стільника БПЛА трафік пакетів (при  $N=10$ ) становитиме  $G'_{\max} \approx 300$  при  $x=3000\text{м}$ . Тоді задаючись середнім трафіком пакетів одного абонента  $\bar{G}_i = 5$  та використовуючи вираз (15), максимальна кількість абонентів в зоні дії МА становитиме  $n'_{\max} \leq 7$ , а в зоні дії БПЛА – становитиме  $n_{\max} \leq 60$ . Максимальна кількість БПЛА в зоні дії одного БПЛА залежить від плану розподілу потоків між абонентами мережі, (тобто величини трафіку, що передається за межі стільника), але вочевидь, не переважає декількох одиниць із міркувань щодо забезпечення заданої ЕМС та безаварійного переміщення БПЛА у просторі.

Зрозуміло, що наведений розрахунок має суто наближений характер через те, що окрім припущення щодо пуассонівського характеру потоку пакетів, ми задаємося середнім та рівним значенням трафіку, генерованого усіма абонентами, що не виконується на практиці. Не дивлячись на це, наведений розрахунок залишається справедливим за умови неперевикнення усіма абонентами сумарної допустимої величини трафіку в мережі, що обмежується максимальною середньою затримкою передачі. Саме цей параметр, вимірний кожним абонентом мережі шляхом обліку часу отримання квитанцій на ряд переданих пакетів, може бути обмеженням на генерований їм трафік або визначати момент переключення передачі пакетів з мережі МА на мережу БПЛА та навпаки. Знаючи кількість наземних абонентів, їхні координати і трафік, створюваний ними, БПЛА може знайти своє оптимальне розміщення у просторі, що дасть змогу не тільки забезпечити геометричну зв'язність абонентів, а й підвищити інформаційні характеристики мережі (такі як пропускна здатність) завдяки з'єднанню віддалених абонентів та розвантаженню перевантажених каналів у районах скупчення абонентів.

#### 5. РОЗРАХУНОК ТРИВАЛОСТІ ЗВ'ЯЗНОСТІ З УРАХУВАННЯМ МОБІЛЬНОСТІ АБОНЕНТІВ

Через свою мобільність абоненти БЕМ не можуть постійно перебувати у зоні радіо видимості один одного та зони покриття БПЛА, тож виникає практичний інтерес розрахунку тривалості зв'язності між ними, протягом якого вони можуть здійснювати інформаційний обмін (побудувати маршрут та передати певну кількість інформації).

БЕМ передбачають довільне (за напрямком та швидкістю) переміщення вузлів. На практиці, якщо йде мова про мобільний зв'язок «пішохід-пішохід», у місті напрямок руху змінюється відповідно до плану його забудови (частіше всього повороти на  $90^\circ$ ), а швидкість реально не перевищує 2 м/с, автомобілі з урахуванням обмежень швидкості у місті переміщуються з граничною швидкістю до 16 м/с.

##### 5.1. Розрахунок на випадок прямої радіо видимості між вузлами

Розглянемо переміщення вузла  $B$  відносно вузла  $A$ , розташованого спочатку від нього на відстані  $d$ , зі швидкістю  $v$  під кутом  $\phi$  (рис.12, а). Будемо вважати, що тривалість зв'язності ( $t$ ) – це проміжок часу, поки вузол  $B$  не опиниться в точці  $B'$ , що обмежена радіусом радіо видимості  $R$  [14]. Тоді із використанням апарату тригонометрії отримаємо:

$$t = \frac{d \cos \phi + \sqrt{R^2 - d^2 \sin^2 \phi}}{v}.$$

Для вихідних даних  $d = 100\text{м}$ ,  $v_1 = 2\text{ м/с}$ ,  $v_2 = 15\text{ м/с}$  та  $\varphi = 90^\circ$  отримуємо результати, наведені на рис.12, б. Згідно із цими даними випливає, що тривалість зв'язку МА-МА ( $R = 500\text{ м}$ ) може становити не більше 2-3 хвилин для пішоходів та не більше 0,5 хвилини для авто, а на випадок БПЛА-МА ( $R = 2500\text{ м}$ ) становитиме приблизно 20-25 хв. для пішоходів та приблизно 6-7хв. для авто. Отже, ефективність застосування БПЛА очевидна. Управляючи положенням БПЛА у просторі можна досягти ще більших значень тривалості зв'язності абонентів.

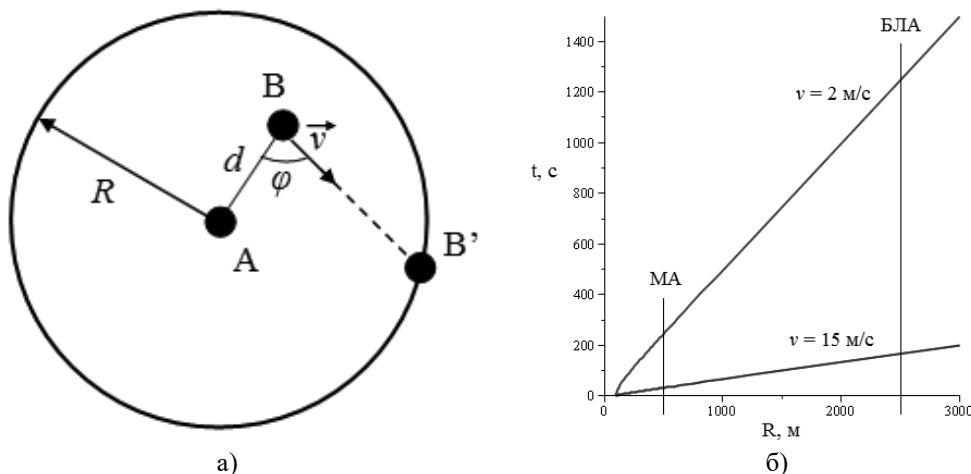


Рис. 12. Модель (а) та результати розрахунку тривалості зв'язності (б)

### 5.2. Розрахунок на випадок ретрансляції через проміжний вузол

Розглянемо модель, в якій вузол  $A$  може здійснювати зв'язок з вузлом  $C$  тільки за рахунок ретрансляції сигналу через вузол  $B$ . Вузол  $C$  знаходиться поза межами радіо видимості вузла  $A$ , при цьому  $C$  знаходиться в зоні видимості  $B$ . Для спрощення будемо вважати, що радіус радіо видимості  $R$  для всіх вузлів однаковий.

Для здійснення зв'язку вузол  $A$  будує маршрут до  $C$ , і на це витрачається деякий час  $t$ . Оскільки  $B$  та  $C$  рухаються один відносно одного (та відносно  $A$  зі швидкостями  $v$  та  $w$  відповідно) (рис. 13, а), наприклад, розходяться, тоді існує ймовірність, що за час  $t$  встановлення маршруту від  $A$  до  $C$  ретранслятор  $B$  та кінцевий вузол  $C$  розійдуться настільки, що передача повідомлень від  $A$  до  $C$  виявиться неможливою. Розрахуємо цей час.

Будемо вважати, що тривалість зв'язності ( $t$ ) – це проміжок часу, поки вузол  $C$  не опиниться за межами видимості ретранслятора, тобто у точці  $C'$ . Тоді з використанням формул геометрії та кінематики матеріальної точки отримуємо:

$$t = \frac{\sqrt{AB^2 + AC^2 - 2AB \cdot AC \cdot \cos(\alpha + \beta + \gamma)}}{v^*}$$

де  $v^*$  – відносна швидкість вузлів  $B$  та  $C$ , величина якої визначається напрямками та величинами векторів  $\vec{v}$  та  $\vec{w}$ .

Задаючи відстані між вузлами  $AB=200\text{м}$ ,  $AC=600\text{м}$ , отримуємо залежність тривалості зв'язності з однією ретрансляцією від відносної швидкості вузлів для різних значень кутів між вузлами (рис.13, б).

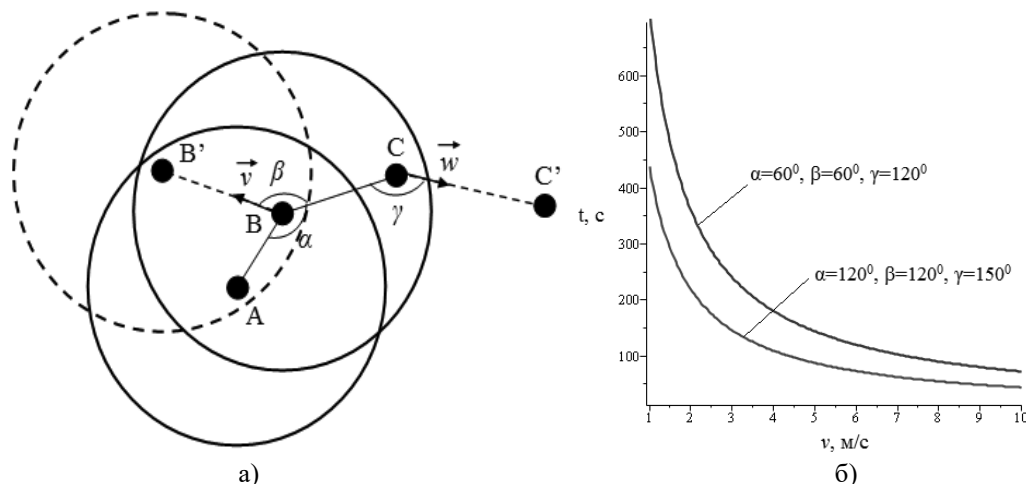


Рис. 13. Модель (а) та результати розрахунку тривалості зв'язності з однією ретрансляцією (б)

Аналізуючи рис. 13 можемо бачити, що значення тривалості зв'язності з однією ретрансляцією лежать у тих самих межах, що й у попередньому випадку (без ретрансляції), й визначаються розміщенням вузлів та напрямком і величиною швидкості їх переміщення.

У разі передачі довгих повідомлень це може призвести до втрати інформації, якщо не вживати спеціальних заходів. Такими заходами можуть бути:

Дроблення повідомлень на пакети та відправка пакетів тільки після підтвердження наявності зв'язності та прогнозу на її підтримку протягом часу пересилки одного пакету. Для гарантії пересилки у вузла-відправника має існувати (або передбачатися) можливість «розширення» зони покриття за рахунок збільшення потужності передавача або зміни діаграми направленості антени [2-9]. Тобто вузол *A* «не відпускає» *B* протягом передачі хоча б одного пакету.

Передбачення наявності «резервних маршрутів», які автоматично включаються (м'яка естафетна передача) при перериванні основного.

Застосування алгоритмів локального відновлення маршруту на основі розрахунку координат вузлів в локальних координатах, як, наприклад, у [14].

Використання архітектурних або алгоритмічних змін, у тому числі тих, що порушують принцип однорангової мережі, тобто застосування мережі БПЛА як додаткових повітряних вузлів-ретрансляторів.

## Висновки

1. Максимальна дальність зв'язку (діапазону УКВ) обмежується кривизною земної поверхні та висотами підвісу передавальної та приймаючої антени. Так, з урахуванням рефракції, максимальна протяжність радіолінії МА-МА може становити 7-10 км, а БПЛА-МА – понад 130км при висоті баражування БПЛА понад 1км. Крім того, максимальна дальність радіозв'язку обмежується енергетикою радіолінії, за якої відношення сигнал-шум в точці прийому не менше визначеної величини для забезпечення заданої ймовірності бітової помилки (BER) при заданому виді модуляції (відповідній швидкості передачі). Так, застосовуючи типове обладнання 802.11a/b/g, максимальна протяжність радіолінії МА-МА не перевищує 1000м (на швидкості передачі 1Мбіт/с), а при реальному рельєфі місцевості – не більше 630м (для великого міста).

2. Максимальна дальність зв'язку «вузол-вузол» також визначається ефективністю функціонування протоколу множинного доступу до спільного каналного ресурсу. У разі збільшення протяжності радіолінії зростає кількість колізій при організації МД, а, отже, зменшується пропускна здатність та зростає затримка передачі. Тому максимальна дальність зв'язку може визначатися граничним значення пропускної здатності при заданій швидкості передачі, розмірі пакету даних та інтенсивності трафіку. Так при  $S=0,5$  максимальна протяжність радіолінії МА-МА має становити не більше 500м (для МДКН), БПЛА-МА – не більше 5000м (для АПР,  $N=10$ ), а БПЛА-БПЛА – не більше 10000м (для АПР,  $N=30$ ).

3. За необхідності передачі інформації на більші відстані, аніж дальність прямого з'єднання, необхідно застосовувати механізм ретрансляції (комутації) пакетів через проміжні вузли. Максимальна дальність в зв'язку даному випадку визначається заданою величиною затримки передачі «із кінця в кінець» для забезпечення необхідної QoS. Так для застосувань реального часу (VoIP, відеоконференції і т.п.) кількість ретрансляцій мережею БПЛА не має перевищувати 6-ти, а для застосувань не критичних до затримки (короткі трансакції, масиви даних, потокове відео і т.п.) може становити декілька десятків при заданій інтенсивності трафіку. Також показано, що за вдвічі більшої інтенсивності трафіку середня затримка передачі ланки БПЛА-БПЛА втричі переважає середню затримку передачі на ланці МА-МА. Отже, якщо кількість ланок у маршруті мережі МА більша за 3, доцільніше передавати інформацію через мережу БПЛА за умови покриття останньої.

## Література

1. Lysenko O. I., Valuiskyi S. V., Kirchu P. I., Romaniuk A. V.. Optimal control of telecommunication aeroplatform in the area of emergency Telecommunication sciences. 2013. Vol. 4, no.1., P. 14-20. DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12013.14-20>.
2. S. Valuiskyi, A. Lysenko, T. Pryshchepa and S. Chumachenko. The problem of finding a rational topology of wireless sensor networks using UAVs. Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), 2015, pp. 213-215, DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2015.7357316>.
3. Lysenko O., Romaniuk V., Tachinina O., Valuiskyi S. The Problems of Control in Wireless Sensor and Mobile Ad-Hoc Networks. In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1113. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_33).
4. Ming Zhu, Fei Liu, Zhiping Cai, Ming Xu, Maintaining Connectivity of MANETs through Multiple Unmanned Aerial Vehicles. Mathematical Problems in Engineering, vol. 2015, Article ID 952069, 14 pages, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/952069>.
5. Using FITRs for different purposes. URL: <https://racurs.ru/press-center/articles/bespilotnye-letatelnye-apparaty/UAV-for-mapping-1/> (date of access: 21.07.2022).
6. Unmanned aerial vehicles for military purposes. URL: [https://www.imemo.ru/files/File/magazines/puty\\_miru/2019/02/09-Yevtodieva.pdf](https://www.imemo.ru/files/File/magazines/puty_miru/2019/02/09-Yevtodieva.pdf) (date of access: 21.07.2022).
7. Research and development of the FITRs management software complex for monitoring industrial objects. URL: <http://masters.donntu.org/2017/fkita/beskrovny/diss/index.htm> (date of access: 21.07.2022).
8. Use of FITRs in combat conditions. URL: <https://www.alb.aero/about/articles/primenenie-bpla-v-usloviyakh-boevykh-deystviy> (date of access: 21.07.2022).
9. Бунин С. Г., Войтер А. П. Вычислительные сети с пакетной радиосвязью. Київ : Техника, 1989. 223 с.
10. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / ред. В. И. Нейман ; пер. з англ И. И. Грушко. М : Машиностроение, 1979. 432 с.
11. Kleinrock L., Tobagi F. A. Packet switching in radio channels: Part 1 – Carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics. IEEE Transactions on communications. 1975. Vol. 22, no. 12. P. 1400–1416.

12. Ильченко М. Е., Бунин С. Г., Войтер А. П. Сотовые радиосети с коммутацией пакетов. Київ : Наук. думка, 2003. 266 с.
13. Клейнрок Л. Вычислительные сети с очередями. Пер. с англ. / Под ред. Б. С. Цыбакова. М.: Мир, 1979. 600 с.
14. Бахтин А. А. Разработка методов управления связностью и обеспечения качества обслуживания в мобильной эпизодической сети с ретрансляцией: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. Наук : спец. 05.12.13 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций». М., 2009. 27 с.

## References

1. Lysenko, O. I., Valuiskyi, S. V., Kirchu, P. I., Romaniuk, A. V., (2013). Optimal control of telecommunication aeroplatfrom in the area of emergency Telecommunication sciences. Vol. 4, no.1, P. 14-20. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12013.14-20>.
2. Valuiskyi, S., Lysenko, A., Pryshchepa, T and Chumachenko, S. (2015). The problem of finding a rational topology of wireless sensor networks using UAVs. Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), P. 213-215, <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2015.7357316>.
3. Lysenko, O., Romaniuk, V., Tachinina, O., Valuiskyi, S., (2020). The Problems of Control in Wireless Sensor and Mobile Ad-Hoc Networks. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1113. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_33)
4. Ming Zhu, Fei Liu, Zhiping Cai, Ming Xu, (2015). Maintaining Connectivity of MANETs through Multiple Unmanned Aerial Vehicles. Mathematical Problems in Engineering. vol. 2015. Article ID 952069. 14 pages. <https://doi.org/10.1155/2015/952069>
5. Using FITRs for different purposes. [Online] Available from: <https://racurs.ru/press-center/articles/bespiilotnye-letatelnye-apparaty/UAV-for-mapping-1/> (Accessed: 21 July 2022).
6. Unmanned aerial vehicles for military purposes. [Online] Available from: [https://www.imemo.ru/files/File/magazines/puty\\_miru/2019/02/09-Yevtodieva.pdf](https://www.imemo.ru/files/File/magazines/puty_miru/2019/02/09-Yevtodieva.pdf) (Accessed: 21 July 2022).
7. Research and development of the FITRs management software complex for monitoring industrial objects. [Online] Available from: <http://masters.donntu.org/2017/fkita/beskrovny/diss/index.htm> (Accessed: 21 July 2022).
8. Use of FITRs in combat conditions. [Online] Available from: <https://www.alb.aero/about/articles/primenenie-bpla-v-usloviyakh-boevykh-deystviy> (Accessed: 21 July 2022)
9. Bunin, S. G. and Voiter, A. P., (1989). Computing networks with packet radio communication. Kiev: Technique.
10. Kleinrock, L., (1979). Theory of queuing. Editor V. I. Neiman. Translation from English I. I. Grushko. M: Mechanical engineering.
11. Kleinrock, L. та Tobagi, F. A., (1975). Packet switching in radio channels: Part 1 – Carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics. IEEE Transactions on communications. 22(12), 1400–1416.
12. Ilchenko, M. E., Bunin, S. G. and Voiter, A. P., (2003). Cellular radio networks with packet switching. Kiev: Science thought.
13. Kleinrock, L., (2009). Computing networks with queues. Editor B. S. Tsybakova. M: Peace.
14. Bakhtin A. A. Development of methods for managing connectivity and ensuring the quality of service in a mobile episodic network with relaying: author. dis. for the scientific degree cand. tech. Sciences: special. 05.12.13 «Systems, networks and devices of telecommunications». М., 27 p.

Одержано 17.08.2022

## Про авторів:

*Валуїський Станіслав Вікторович,*

кандидат технічних наук, доцент кафедри телекомунікацій,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
Кількість публікацій в українських виданнях – 75.  
Кількість зарубіжних публікацій – 20.

Індекс Хірша – 7.

<https://orcid.org/0000-0002-6625-9969>

Тел. +380638876077

E-mail: [valuiskyi.stanislaw@iit.kpi.ua](mailto:valuiskyi.stanislaw@iit.kpi.ua)

*Лисенко Олександр Іванович,*

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри телекомунікацій  
Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем,  
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»  
Кількість публікацій в українських виданнях – 300.

Кількість зарубіжних публікацій – 50.

Індекс Хірша – 11.

<http://orcid.org/0000-0002-7276-9279>

Тел. +380962252820

E-mail: [lysenko.a.i.1952@gmail.com](mailto:lysenko.a.i.1952@gmail.com)

*Чумаченко Сергій Миколайович,*  
доктор технічних наук, старший науковий співробітник,  
завідувач кафедри інформаційних систем  
Національного університету харчових технологій,  
Кількість публікацій в українських виданнях – 350.  
Кількість зарубіжних публікацій – 40.  
Індекс Хірша – 10  
<https://orcid.org/0000-0002-8894-4262>.  
Тел. +380679551761  
E-mail: [sergiy23.chumachenko@gmail.com](mailto:sergiy23.chumachenko@gmail.com),

*Гуйда Олександр Григорович,*  
кандидат наук з державного управління,  
завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій,  
Таврійський національний університет імені В.І.Вернадського  
Кількість публікацій в українських виданнях – 100.  
Кількість зарубіжних публікацій – 5.  
Індекс Хірша – 2.  
<https://orcid.org/0000-0002-2019-2615>.  
Тел. +380637377701  
E-mail: [guydasg@ukr.net](mailto:guydasg@ukr.net)

*Фуртат Олена Вікторівна,*  
старший викладач кафедри автоматизованого  
управління технологічними процесами,  
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського,  
Кількість публікацій в українських виданнях – 20.  
<https://orcid.org/0000-0001-8192-4026>  
Тел. +380679347972  
E-mail: [furtatlina@gmail.com](mailto:furtatlina@gmail.com)

*Сушин Ігор Олексійович,*  
аспірант кафедри телекомунікацій,  
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
Кількість публікацій в українських виданнях – 13.  
Кількість зарубіжних публікацій – 1.  
<https://orcid.org/0000-0003-4866-4351>.  
Тел. +380637699694  
E-mail: [rubin268@ukr.net](mailto:rubin268@ukr.net)

**Місце роботи авторів:**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, Україна.  
Тел.: (38)(044) 204 9494  
E-mail: [mail@kpi.ua](mailto:mail@kpi.ua)

Національний університет харчових технологій,  
01033, м. Київ, вулиця Володимирська, 68, Україна.  
Тел.: (38)(044) 287-93-33  
E-mail: [info@nuft.edu.ua](mailto:info@nuft.edu.ua)

Таврійський національний університет імені В.І.Вернадського,  
01042, м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33, Україна.  
Тел.: (38)(044) 529 05-16  
E-mail: [crimea.tnu@gmail.com](mailto:crimea.tnu@gmail.com)

**Прізвища та ініціали авторів і назва доповіді англійською мовою:**

Valuiskyi S.V., Lysenko O.I., Chumachenko S. M., Guida O.G.,  
Furtat O.V., Sushyn I.O  
The method for assessing the connectivity of nodes  
of wireless episodic networks under the condition  
of using unmanned aeral vehicles

**Прізвища та ініціали авторів і назва доповіді українською мовою:**

Валуйський С.В., Лисенко О.І., Чумаченко С.М., Гуйда О.Г.,  
Фуртат О.В., Сушин І.О.  
Метод щітки зв'язності вузлів бездротових епізодичних мереж  
за умови застосування безпілотних літальних апаратів

**Контакти для редактора:** Гуйда Олександр Григорович,  
кандидат наук з державного управління, завідувач кафедри  
комп'ютерних та інформаційних технологій, Таврійський національний  
університет імені В. І. Вернадського,  
Тел. +380637377701, E-mail: [guydasg@ukr.net](mailto:guydasg@ukr.net)