

ПРОГРАМА ОЦІНКИ ЗВ'ЯЗНОСТІ ВУЗЛІВ БЕЗПРОВОДОВИХ ЕПІЗОДИЧНИХ МЕРЕЖ ПРИ УМОВІ ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА

Сушин І.О., Лисенко О.І.

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

E-mail: rubin268@ukr.net

THE PROGRAM FOR ASSESSING THE CONNECTIVITY OF NODES OF WIRELESS EPISODIC NETWORKS UNDER THE CONDITION OF USING UAVs

The article describes the main problems of the duration of connectivity of mobile subscribers (nodes) (MA) of a wireless episodic network (BEM consisting of MA and UAV) in conditions of direct radio visibility and taking into account relaying. The obtained results can be used in the UAV network topology control method.

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

Безпроводова епізодична мережа передачі даних зазвичай функціонує у межах прямої радіо видимості вузлів. При чому 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 [2, ст. 214].

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

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

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

Основними характеристиками, що визначають ефективність функціонування протоколу множинного доступу (МД) до загального каналного ресурсу, є: середня швидкість передачі, середня затримка передачі та граничне значення трафіку, при якому досягається межа стійкої

роботи мережі (МС). 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 [3].

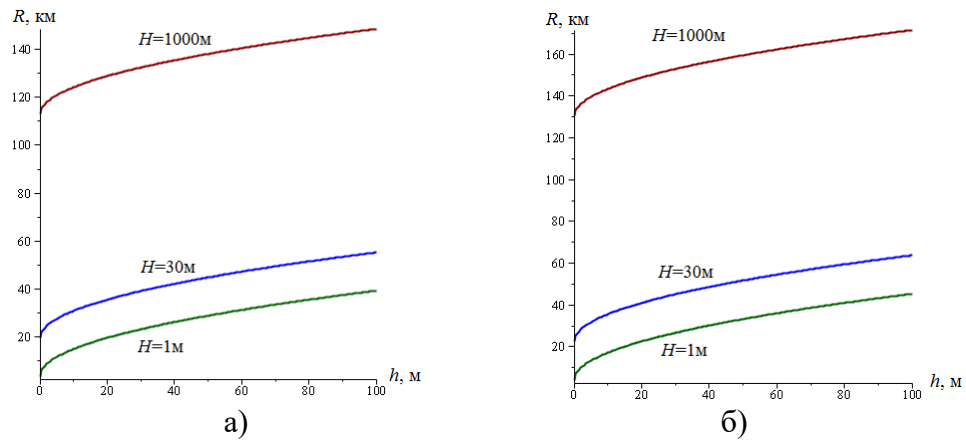


Рис. 1. Дальність прямої видимості з урахуванням висоти підвісу антен при різних поправочних коефіцієнтах: $K=1$ (а) та $K=4/3$ (б).

Середня швидкість передачі представляє собою математичне очікування випадкової величини, що визначає кількість безконфліктно переданих пакетів за одиницю часу. В даній роботі за одиницю часу прийнято час передачі самого пакету T , тоді максимальним теоретичним значенням середньої швидкості передачі буде одиниця. Максимальне значення середньої швидкості передачі у літературі часто називають *пропускною здатністю* (іноді – *ємністю*) протоколу МД.

Середня затримка передачі – це нормований інтервал часу (в одиницях тривалості передачі пакету T) з моменту появи на вході вузла запиту на передачу до завершення безконфліктної передачі пакету даних. При чому враховується тільки два фактори, що перешкоджають передачі: затримка доступу, тобто час до моменту отримання дозволу на передачу, та затримка повторної передачі, що зумовлена лише пошкодженням пакетів при їх інтерференції. Дана характеристика розраховується у наступному підрозділі.

Граничне значення трафіку характеризує область застосування протоколу МД у конкретних умовах, а також визначає кількість вузлів у зоні дії МА та БПЛА, що визначається також у подальших підрозділах.[3]

Для аналізу вище вказаних характеристик та визначення їх потенційно можливих значень будемо використовувати аналітичні моделі, що будуються із використанням елементів теорії відновлення та припущення, що кількість абонентів нескінченно велика, кожен з яких генерує пакети з нескінченно малою швидкістю. Останнє є фактично припущенням про пуасонівський характер процесу надходження пакетів для передачі по радіоканалу. При цьому інтенсивність надходження пакетів вимірюється кількістю за час передачі пакету T та позначається буквою G . Середня швидкість передачі S також вимірюється в кількості пакетів за час T , але що передані безконфліктно. Припускається також, що всі пакети мають однакову

довжину L . Данні моделі оперують із середніми значеннями часових відрізків стану радіоканалу. Також будемо вважати, що службові пакети (квитанції), що підтверджують вдалий прийом пакету даних, мають нормовану довжину та передаються по окремому каналу безконфліктно.

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 Γ), 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.

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 середню швидкість передачі можна визначити за наступною формулою:

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

де a – нормований максимальний час розповсюдження радіосигналу в мережі.

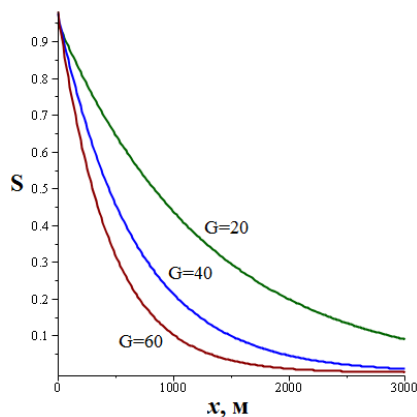


Рис. 2. Графіки залежності ПЗ каналу МА-МА від відстані між вузлами при різних значеннях інтенсивності трафіку.

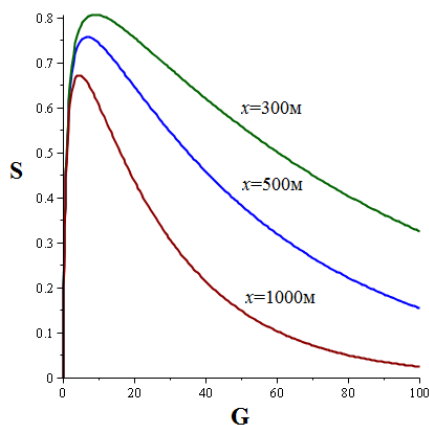


Рис. 3. Графіки залежності ПЗ каналу МА-МА від інтенсивності трафіку при різних значеннях відстані між вузлами.

Враховуючи, що $a = \frac{x \cdot V}{c \cdot L}$, де x – максимальна відстань між ретранслятором і абонентом (тобто між МА), м; c – швидкість розповсюдження сигналу, м/с; L – довжина пакету, біт; V – швидкість передачі, біт/с, та підставляючи (17) в (16) отримаємо:

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

Підставляючи наступні вихідні дані: $V=11\text{Мбіт/с}$, $c=3 \cdot 10^8\text{м/с}$, $L=1000\text{біт}$ у вираз (1), матимемо наступні графіки залежності S на каналному рівні МА-МА (рис.2, 3, 4).

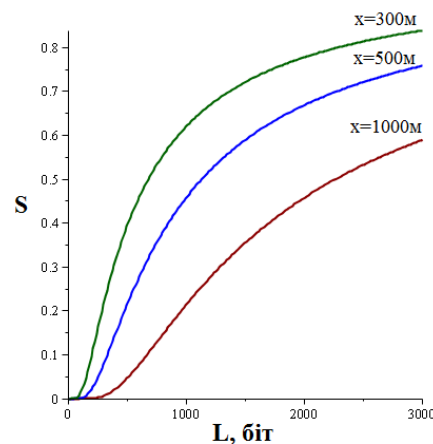


Рис. 4. Графіки залежності ПЗ каналу МА-МА від довжини пакету при різних значеннях відстані між вузлами (при $G=40$).

Аналізуючи графіки на рис.2, можемо бачити, що середня швидкість передачі монотонно спадає при збільшенні максимальної відстані між вузлами x . Це пов'язано з тим, що при збільшенні x зростає зона уразливості a , що спричиняє ріст кількості колізій при організації МД. Також згідно 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 ($S_{\max} \approx 0,81$), при $x=500\text{м}$ ($a=0,0183$) $g \approx 6,8$ ($S_{\max} \approx 0,76$), а при $x=1000\text{м}$ ($a=0,0366$) $g \approx 4,6$ ($S_{\max} \approx 0,67$). Проблему збільшення пропускної здатності при заданому x (або ж еквівалентно збільшенні максимальної відстані між МА x при заданій S) можна вирішити шляхом збільшення довжини пакету L , однак при цьому зростає ймовірність ураження пакета завадою та час доставки пакетів в мережі. Також цю проблему можна вирішити шляхом зменшення швидкості передачі V (тобто виділеної частотної смуги Π), але це – нераціонально, оскільки при цьому знижують 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 . [3]

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: $D = T_{\text{пак}} + T_{\text{дост}} + T_{\text{росп}} + T_{\text{обр}} + T_{\text{буф}}$, де $T_{\text{пак}}$ – час пакетизації (формування пакету у вузлі-відправнику), що залежить від типу трафіку (алгоритму формування пакету, наприклад, для голосу – від типу кодексу); $T_{\text{дост}}$ – середній час затримки доступу до каналу (для випадкового МД), що залежить від інтенсивності трафіку та пропускної спроможності каналу; $T_{\text{росп}}$ – 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 також 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. [5, ст. 223]

Наведений розрахунок є наближенням через те, що окрім припущення щодо пуасонівського характеру потоку пакетів, було розглянуто середнє значення трафіку, генерованого усіма абонентами, що не завжди виконується на практиці. Не дивлячись на це, наведений розрахунок залишається справедливим при умові неперевищення усіма абонентами сумарної допустимої величини трафіку в мережі, що обмежується максимальною середньою затримкою передачі. Саме цей параметр, виміряний кожним абонентом мережі шляхом обліку часу отримання квитанцій на ряд переданих пакетів, може служити обмеженням на генерований їм трафік або визначати момент переключення передачі пакетів з мережі МА на мережу БПЛА та навпаки. Знаючи кількість наземних абонентів, їх координати та 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'єднання віддалених абонентів та розвантаження перевантажених каналів в районах скупчення абонентів.

Висновки. 1. Максимальна дальності зв'язку (діапазону УКВ) обмежується кривизною земної поверхні та висотами підвісу передавальної та прийомної антени. Так, з урахуванням рефракції, максимальна

протяжність радіолінії МА-МА може становити 7-10 км, а БПЛА-МА – більше 130км при висоті баражування БПЛА більше 1км. Крім того, максимальна дальність радіозв'язку обмежується енергетикою радіолінії, при якій 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 при застосуванні типового 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. При необхідності передачі інформації на більші відстані, аніж дальність прямого з'єднання, необхідно застосовувати механізм ретрансляції (комутації) пакетів через проміжні вузли. Максимальна дальність зв'язку у 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 при двічі більшій інтенсивності трафіку середня затримка передачі ланки БПЛА-БПЛА втричі переважає середню затримку передачі на ланці МА-МА. Отже при кількості ланок у маршруті мережі МА більше ніж 3 доцільніше передавати інформацію через мережу БПЛА при наявності покриття останньої.

Література

1. Lysenko O. I. Optimal control of telecommunication aeroplatform in the area of emergency / O. I. Lysenko, S. V. Valuiskyi, P. I. Kirchu, A. V. Romaniuk // Telecommunication sciences. - 2013. - Vol. 4, no. 1. - С. 14-20. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Telnau_2013_4_1_5.
2. S. Valuiskyi, A. Lysenko, T. Pryshchepa and S. Chumachenko, "The problem of finding a rational topology of wireless sensor networks using UAVs," 2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), 2015, pp. 213-215, doi: 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.
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. <https://doi.org/10.1155/2015/952069>.
5. Бунин С. Г. Вычислительные сети с пакетной радиосвязью / С. Г. Бунин, А. П. Войтер. – К.: Техника, 1989. – 223 с.
6. Ильченко М. Е. Сотовые радиосети с коммутацией пакетов / М. Е.Ильченко, С. Г.Бунин, А. П.Войтер. – К.: Наукова думка, 2003. – 266 с.