

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕПІЗОДИЧНИХ РАДІОМЕРЕЖ ІЗ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ

Розроблено методику оцінки основних показників функціонування епізодичних радіомереж із телекомунікаційними аероплатформами.

Романюк А.В. Методика оценки показателей функционирования самоорганизующихся радиосетей с телекоммуникационными аэроплатформами. Разработана методика оценки основных показателей функционирования эпизодических радиосетей с телекоммуникационными аэроплатформами.

A. Romaniuk Method of evaluation of the parameters of functioning mobile ad-hoc networks with unmanned aerial vehicle. Proposed a method of evaluation of the main parameters of functioning mobile ad-hoc networks with unmanned aerial vehicle.

Ключові слова: показники функціонування, епізодичні радіомережі.

Актуальність. Різноманітні надзвичайні ситуації та військові конфлікти приводять до руйнувань систем зв'язку та телекомунікаційних систем. Для забезпечення зв'язку в таких районах для мобільних служб можливо використання епізодичних радіомереж (ЕРМ) з використанням телекомунікаційних аероплатформ (ТА). Особливо актуальним є використання невеликих безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які є більш доцільними з економічної точки зору і можуть бути розгорнуті оперативніше висотних аероплатформ. Такі мережі застосовуються рятувальними службами, для збору інформації в місцях надзвичайних ситуацій, для зв'язку між транспортними засобами, військовими структурами [1 – 3] та ін.

Мобільні абоненти (МА) таких мереж можуть вільно переміщуватись в необхідному районі та з'єднуватись між собою безпосередньо в радіусі радіозв'язку або з використанням ретрансляції через сусідні МА або БПЛА.

Для оптимального використання ресурсів таких радіомереж, особливо під час пікових навантажень, необхідно дотримуватись визначених показників якості маршрутів передачі даних. Для розв'язання цієї задачі необхідно дослідити та удосконалити існуючі моделі показників функціонування даного класу мереж.

Аналіз досліджень і публікацій. В роботі [3 – 9], проведений аналіз різних протоколів множинного доступу та отримані аналітичні залежності пропускної здатності та часу затримки в радіоканалах в залежності від рівня навантаження, однак вони не проводять оцінку функціонування мережі за маршрутами передачі даних та не враховують відстані між абонентами.

Постановка завдання. Таким чином метою даної роботи є розробка методики оцінки показників функціонування епізодичних радіомереж із телекомунікаційними аероплатформами в умовах швидкого і непередбачуваного переміщення абонентів.

Необхідно: оцінити відповідність основних показників функціонування сукупності маршрутів передачі даних в ЕРМ з використанням ТА заданим вимогам.

Для досягнення даної мети поставлені наступні завдання:

1. Визначення інтенсивності трафіку в каналах ЕРМ.
2. Визначення пропускної здатності в каналах ЕРМ.
3. Визначення середньої затримки передачі в каналах ЕРМ.
4. Систематизація удосконалених моделей та поєднання в єдину методику.

Вихідні дані та обмеження (рис. 1). Вихідними даними є наступні параметри:

$V = 11 \text{ Мбіт/с}$ – швидкість передачі; $L = 1024 \text{ біт}$ – довжина пакету даних; $\Pi = \|l(m_{ab})\|$, $a, b = \overline{1, N}$ – маршрутна таблиця найкоротших шляхів, де $l(m_{ab})$ – кількість ретрансляцій в

маршруті m_{ab} ; $s^o = 5,5 \text{ Мбіт/с}$ – мінімально допустиме значення ПЗ (пропускна здатність) маршруту m_{ab} ; $t_3^o = 400 \text{ мс}$ – максимально допустиме значення затримки передачі в маршруті m_{ab} (для послуг реального часу та передачі даних з невисокою інтерактивністю згідно ІТУ Y.1541), $\Gamma = \|\gamma_{ab}(t)\|$ – матриця тяжіння, де γ_{ab} – середня інтенсивність потоку пакетів (на ЧНН), що надходить в маршрут m_{ab} між парою відправник-адресат $a-b$;

Позначимо через γ сумарний трафік користувача, тобто $\gamma = \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}$ $a, b = \overline{1, N}$;

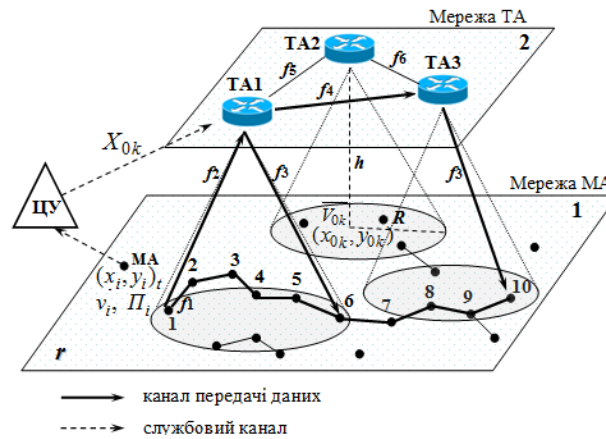


Рис. 1. Приклад архітектури ЕРМ із використанням ТА (h – висота польоту ТА, $f_{(z)}$ – частоти, ЦУ – центр управління)

Обмеження. Якість маршрутів в ЕРМ можна записати наступним чином:

$$\Omega_2: \{ s(m_{ab}) \geq s^o, t_3(m_{ab}) \leq t_3^o, a, b = \overline{1, N}, a \neq b \}.$$

Також зробимо наступні *допущення*:

1) в мережі передається однорідний трафік (без пріоритетів);
 2) потік надходження пакетів на обслуговування в вузлах мережі підкорюється пуасонівському розподіленню, тобто $A(\phi) = 1 - \exp(-\lambda\phi)$, де λ – інтенсивність надходження пакетів на обслуговування.

3) розподілення часу обслуговування $B(t)$ може бути довільним та визначається двома параметрами: інтенсивністю обслуговування μ та дисперсією D .

4) спосіб обслуговування пакетів у вузлах мережі – з очікуванням без обмеження довжини черги.

5) дисципліна обслуговування пакетів в буфері – FIFO («перший прийшов – перший обслуговується»); вважається, що виконується умова не зростання черги $1/m < 1/l$.

6) протоколи МД: МДСЗ (множинний доступ із сигналом «зайнято») (МА-МА); АПР (адаптивний протокол із резервуванням) (МА-БПЛА-МА); FDMA (множинний доступ із розділенням каналів за частотою) (БПЛА-БПЛА).

7) всі МА працюють на одній частоті f_1 , ТА працюють на різних частотах прийому і передачі з МА, ТА працюють на різних частотах між собою; висота баражування БПЛА: $h_j \leq 3000 \text{ м}$, $j = \overline{1, K}$, де K – кількість на операцію БПЛА: $K = 1 \dots 10$

Канал МА-МА: напівдуплексний одно частотний (f_1). Канал МА-БПЛА-МА: дуплексний двох частотний (f_2-f_3). Канал БПЛА-БПЛА: дуплексний багато частотний.

Ширина смуги каналу: $\Delta f_1 = \dots = \Delta f_5 = 20 \text{ МГц}$. Діапазон частот: 2,4 ГГц.

Модель радіоканалу МА-МА – Релея із незалежними завмираннями, усі інші канали – із адитивним білим гаусовим шумом (АБГШ).

8) потужність передавача: $P_j = const, j = \overline{1, K}$; кількість абонентів в мережі: $N < 500$; відомі координати абонентів: $(x_i, y_i), i = \overline{1, N}$; швидкість переміщення: $v_i = const, i = \overline{1, N}$.

9) топологія мережі відома та під час аналізу не змінюється.

10) в мережі функціонує один з протоколів маршрутизації (наприклад, OLSR), який дозволяє отримувати вузлам найкоротші маршрути по критерію мінімуму ретрансляцій, службове навантаження враховувати не будемо.

Таким чином **необхідно**: оцінити відповідність сукупності маршрутів передачі даних мережі $M = \{m_{ab}\}, a, b = \overline{1, N}, a \neq b$ вимогам до параметрів їх функціонування Ω_2 .

Визначення інтенсивності трафіку в каналах ЕРМ.

Для визначення інтенсивності трафіку в каналах ЕРМ використаємо прості математичні моделі (рис. 2) [11].

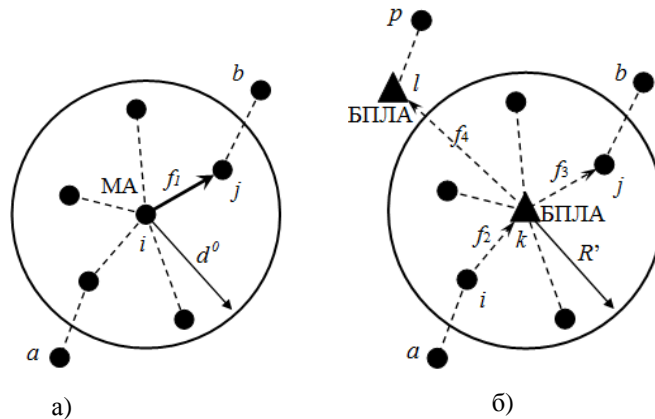


Рис. 2. Моделі для розрахунку інтенсивності трафіку
а) в каналі МА-МА та б) каналах МА-БПЛА, БПЛА-БПЛА

Розрахуємо інтенсивність трафіку в кожному каналі ЕРМ, як суму інтенсивностей потоків між заданою парою відправник-адресат Γ_{ab} , маршрути яких проходять через заданий канал.

Тоді для широкоповного одночастотного каналу МА-МА інтенсивність трафіку можна визначити наступним чином:

$$\Lambda_i^{(1)} = \sum_{j \in N_i} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \Gamma_{ab}, a, b: i \in m_{ab}, a \neq b \quad (1)$$

де N_i – множина сусідів i -ого МА, включаючи i .

Для спільного каналу МА-БПЛА та широкоповного каналу БПЛА-МА відповідно:

$$\Lambda_{ik}^{(2)} = \sum_{i \in N_k} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \Gamma_{ab}, a, b: ik \in m_{ab}; \Lambda_{kj}^{(3)} = \sum_{i \in N_k} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \Gamma_{ab}, a, b: kj \in m_{ab}, a \neq b \quad (2)$$

де N_k – множина МА, що покриті k -м БПЛА.

Для дуплексного багаточастотного каналу БПЛА-БПЛА (в одному напрямку) відповідно:

$$\Lambda_{kl}^{(4)} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \left(\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \Gamma_{ab} \right), a, b: kl \in m_{ab}, k \neq l, a \neq b, \quad (3)$$

де K – кількість введених БПЛА.

Визначення пропускної здатності та середньої затримки каналів ЕРМ.

Ефективність функціонування протоколу множинного доступу до загального каналного доступу залежить від таких ресурсів: середня швидкість передачі, середня затримка передачі, граничне значення трафіку, при якому досягається межа стійкої роботи мережі (межа стійкості) [7, 12].

Пропускна здатність маршруту m_{ab} визначається мінімальною пропускну здатністю каналу (ПЗ), що входить до його складу, тобто

$$s(m_{ab}) = \min_{(i,j) \in m_{ab}} \{s(c_{ij})\}, \text{ де } c_{ij} - \text{ПЗ каналу} \quad (4)$$

Пропускна здатність каналу – це середня швидкість пакетів передачі пакетів, або середня кількість безконфліктно переданих пакетів за інтервал часу.

Середню швидкість передачі каналу МА-МА (мобільний абонент), що працює на частоті f_1 згідно протоколу МДСЗ, можна визначити за наступною формулою [10]:

$$s_{ij}^{(1)} = \frac{G_{\Sigma}^{(1)}}{(\exp(2aG_{\Sigma}^{(1)}) - 1)((5a + \phi + 0,5)G_{\Sigma}^{(1)} + \exp(-2aG_{\Sigma}^{(1)})) + G_{\Sigma}^{(1)}(4a + \phi + 1) + 1}, \quad (5)$$

де τ – нормований максимальний час розповсюдження сигналу «зайнято»;

$$G_{\Sigma}^{(1)} = \frac{\lambda_i^{(1)}}{M} = \lambda_i^{(1)} T - \text{сумарна інтенсивність трафіку, що надходить в канал МА-МА,}$$

нормована до тривалість передачі пакету T .

$$a = \frac{x \cdot V}{c \cdot L} - \text{нормований максимальний час розповсюдження радіосигналу,}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Максимальна дальність безпосереднього радіозв'язку визначається ефективністю функціонування протоколу МД до спільного каналного ресурсу. Максимальна протяжність радіолінії МА-МА d^o має становити не більше 600м для протоколу МД із сигналом «зайнято» (МДСЗ), МА-ТА D^o – не більше 3000м для адаптивного протоколу МД із резервуванням (АПР) n пакетів [6].

Підставляючи наступні вихідні дані: $V = 11 \text{ Мбіт/с}$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, $L = 1024 \text{ біт}$ у вираз (5), отримаємо наступні залежності s на каналному рівні МА-МА (рис. 3, 4).

Згідно отриманим графікам на рис. 3а середня швидкість передачі монотонно спадає при збільшенні максимальної відстані між вузлами x , також згідно рис. 3б збільшення x призводить до зменшення межі стійкості g та діапазону стійкої роботи протоколу множинного доступу. Згідно рис. 3 проблема збільшення пропускну здатності при заданому x (або ж еквівалентно збільшення 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.

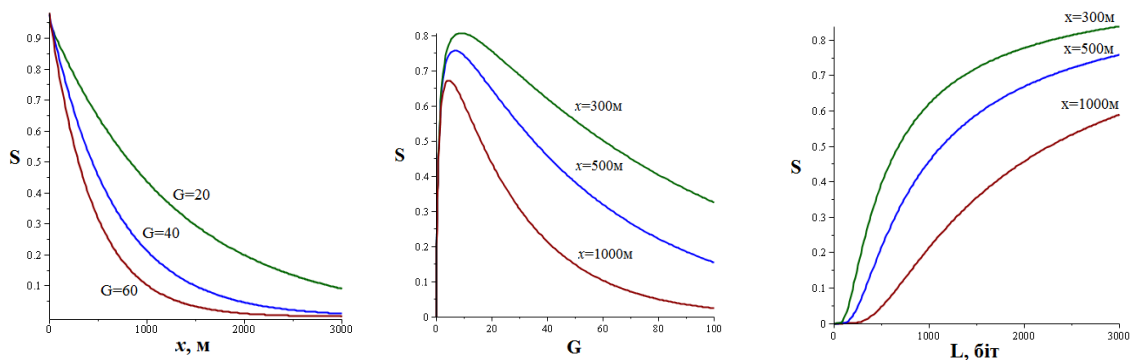


Рис. 3. Графіки залежності ПЗ каналу МА-МА від:
а) відстані між вузлами при різних значеннях інтенсивності трафіку;
б) трафіку при різних значеннях відстані між вузлами

Застосовуючи адаптивний протокол випадкового МД із резервуванням (АПР), значення середньої швидкості передачі у каналах МА-ТА можна визначити наступним чином [10]:

$$s_{ik}^{(2)} = \frac{Gn \exp(-aG)}{1 + GB},$$

де n – розмір блоку пакетів, що резервуються; B – середній час зайнятого стану каналу, який можна визначити наступним чином:

$$B = (n + b + 2a - r) \exp(-aG) + b + a + r,$$

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, яку можна визначити наступним чином: $r = a - \frac{1 - \exp(-aG)}{G}$.

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

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

$$s_{ik}^{(2)} = \frac{Gn \exp(-aG)}{1 + G((n + b + a + \frac{1 - \exp(-aG)}{G}) \exp(-aG) + b + 2a - \frac{1 - \exp(-aG)}{G})} \quad (6)$$

Підставляючи наступні вихідні дані: $V = 11 \text{ Мбіт/с}$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, $L = 1024 \text{ біт}$ у вираз (6), матимемо наступні графіки залежності S каналів МА-БПЛА та БПЛА-БПЛА (рис. 4).

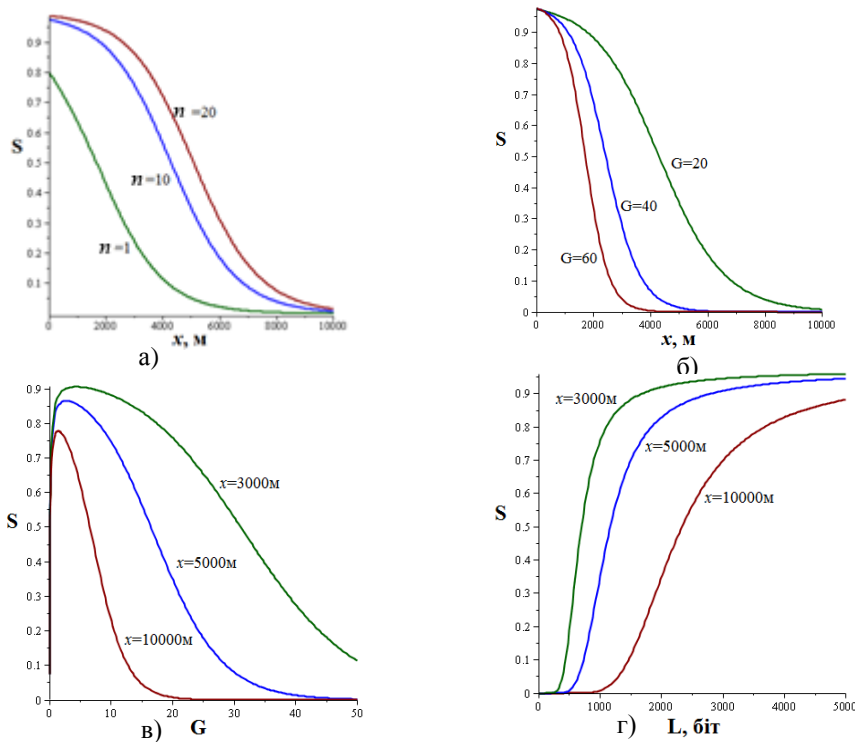


Рис.4. Графіки залежності ПЗ каналу БПЛА-БПЛА (БПЛА-МА) від:
 а) відстані між вузлами при різних значеннях розміру блоку резервування (при $G = 20$);
 б) відстані між вузлами при різних значеннях інтенсивності трафіку (при $n = 10$);
 в) інтенсивності трафіку при різних значеннях розміру блоку резервування (при $x = 5000\text{м}$)
 г) довжини пакету при різних значеннях відстані між вузлами (при $n = 10$, $G = 20$).

Згідно рис. 4а можемо бачити, що застосування блочного ($n = 10$, $n = 20$) резервування дає змогу значно розширити максимальну відстань між БПЛА та МА при заданій пропускну здатності на відміну від звичайного гнучкого протоколу МДСЗ ($n = 1$). Також згідно рис. 4б-г

можна бачити, що протокол АПР дозволяє значно розширити діапазон можливої інтенсивності трафіку та підвищити стійкість роботи мережі БПЛА при зміні вхідного навантаження.

Використовуючи аналітичні моделі для обраних протоколів МД та вихідні дані, що вказані вище, отримано графіки залежності ПЗ каналів МА-МА та МА-БПЛА-МА від вхідного навантаження G (середньої кількості пакетів, що надійшли протягом часу передачі одного пакету $T = m$) (рис. 5).

Аналізуючи рис. 5 отримуємо, що канали МА-БПЛА-МА мають більшу пропускну здатність ніж канали МА-МА при однаковій інтенсивності трафіку (навантаженні) у діапазоні $0 \dots 24$, що визначається мінімально можливим рівнем ПЗ ($s^0 = 0,5$). У такому випадку для підвищення ПЗ мережі доцільніше буде передавати дані через мережу телекомунікаційних аероплатформ (БПЛА) при умові, що затримка передачі в маршруті не перевищує задану.

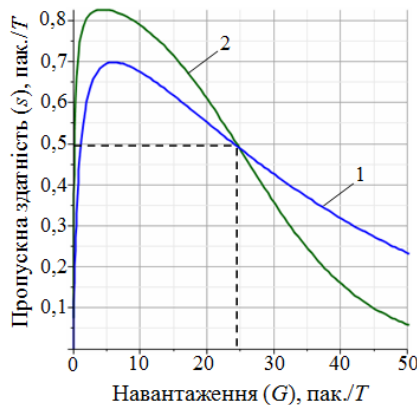


Рис. 5. Залежність пропускної здатності каналів ЕРМ від вхідного навантаження: 1 – канал МА-МА (МДСЗ), 2 – канал МА-БПЛА-МА (АПР, $n = 5$)

Представимо ЕРМ через сукупність блоків М/G/1 (рис. 6), тоді середній час перебування пакета в черзі буферу $T_{буф}$ можна розрахувати за наступною формулою [9]:

$$T_{буф} = T + W^{(z)}(1 + n^2) = \frac{1}{m} + \frac{G_{\Sigma}^{(z)}}{2m(1 - G_{\Sigma}^{(z)})}(1 + n^2),$$

де $W^{(z)}$ – середній час затримки пакету в черзі при $m = const$, v – коефіцієнт варіації m ;

$$G_{\Sigma}^{(z)} = \frac{L_{\Sigma}^{(z)}}{m} = L_{\Sigma}^{(z)} T - \text{сумарна інтенсивність трафіку, що надходить на частоті } z.$$

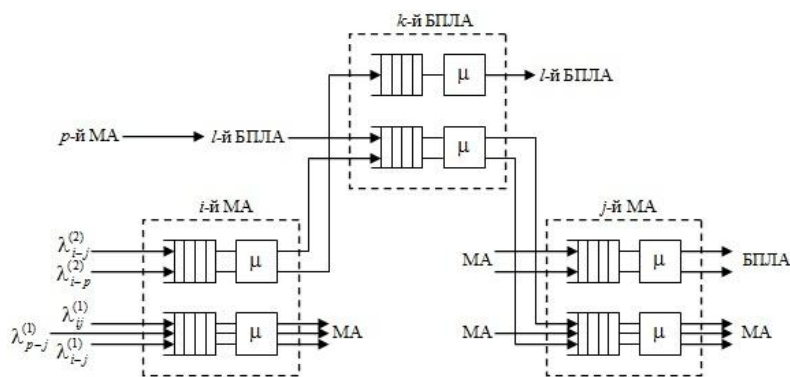


Рис. 6. ЕРМ, як мережа блоків типу М/G/1

Середній час затримки передачі пакету на ланці МА-МА матиме наступний спрощений вигляд [6]:

$$D_{ij} = \left(\frac{G_{\Sigma}^{(1)}}{S_{ij}^{(1)}} - 1 \right) (4a + \tau + 0,5 + Y + X) + 4a + \phi + 1 + W_i^{(1)}, \quad (7)$$

де X – нормований середній час затримки повторної передачі;

Y – нормований середній час початку передачі останнього конфлікуючого пакету.

Середній час затримки передачі пакету на ланці БПЛА-БПЛА (МА-БПЛА) матиме наступний вигляд [6]:

$$D_{ik} = \frac{1}{n} \left(\left(\frac{1}{P} - 1 \right) (X + (b + a + r)P_l) + N + a + W_i^{(2)} + W_k^{(3)} \right), \quad (8)$$

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

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

Оскільки канали БПЛА-БПЛА працюють з частотним розділенням, не заважаючи один одному, то будемо вважати, що максимальна затримка передачі в таких каналах однакова і визначається лише затримкою розповсюдження та затримкою в буфері проміжних вузлів, тобто $D_{kl} = a + W_k^{(4)}$.

Підставляючи наступні вихідні дані: $V = 11$ Мбіт/с, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, $L = 1024$ біт, $b = 0,1$, $X = 2$ у вирази (7), (8), матимемо наступні графіки залежності середньої затримки передачі однієї ланки МА-МА (при $x = 600$ м) та однієї ланки БПЛА-МА (при $x = 3000$ м, $n = 10, 20, 30$) і протоколу МДСЗ (МД з сигналом “зайнято”) від інтенсивності трафіку:

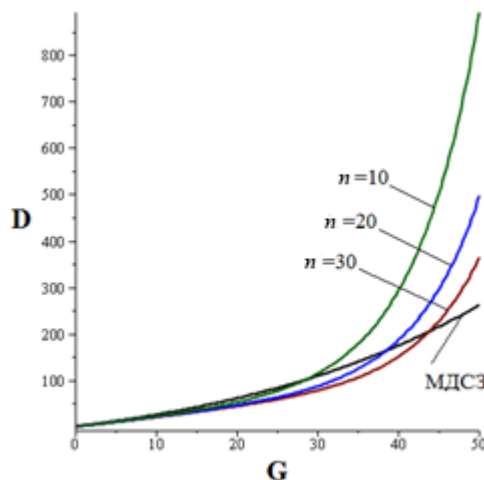


Рис. 5. Графіки залежності середньої затримки передачі однієї ланки МА-МА (при $x = 600$ м) та однієї ланки МА-БПЛА-МА (при $x = 3000$ м, $n = 10, 20, 30$) від інтенсивності трафіку

Можемо бачити, що при інтенсивності трафіку менше ніж 30 менший час затримки має ланка мережі із застосуванням БПЛА, аніж ланка МА-МА. При однаковій затримці передачі ланка із БПЛА має шестикратний вигравш у відстані.

Для мінімізації затримки при передачі інформації на великі відстані доцільніше передавати інформацію через мережу БПЛА, а на короткі – через мережу МА.

Визначимо граничну кількість ретрансляцій через МА, при якій необхідно переключатися на мережу БПЛА. Якщо вважати, що маршрут передачі інформації складається з l ланок та кожна ланка має однакову середню інтенсивність трафіку, тоді загальна затримка пакету «із кінця в кінець» через мережі МА та мережі БПЛА становитиме відповідно:

$$t(m_{ab}) = D_{ij} \cdot l; \quad t(m_{ab}) = D_{ik} + (a + W_k)l \quad (9)$$

Згідно отриманим аналітичним моделям обраних протоколів множинного доступу (9) було розраховано залежність середньої затримки передачі в маршруті від кількості ретрансляцій в маршруті при однаковому навантаженні в каналах (рис. 6).

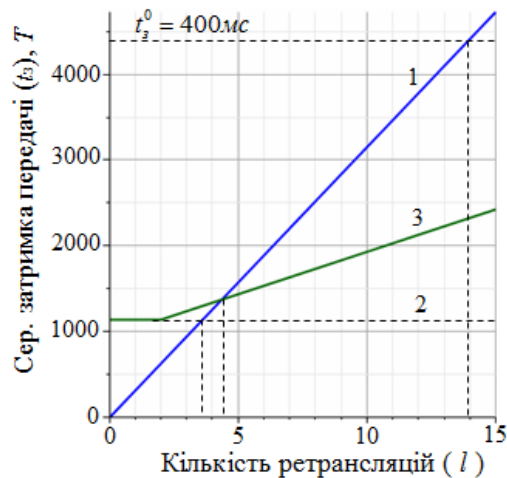


Рис. 6. Залежність середньої затримки в маршруті від кількості ретрансляцій для різних варіантів передачі: 1 – через мережу МА, 2 – через один БПЛА, 3 – через мережу БПЛА

Максимальна кількість ретрансляцій при передачі через мережу МА, що визначається заданою величиною затримки ($t_3^0 = 400\text{мс}$), має становити не більше 14. Для скорочення кількості ретрансляцій в маршрутах доцільніше передавати пакети через мережу БПЛА. При чому всередині зони покриття вигідніше ретранслювати пакети при кількості ланок більше ніж 3, а через міжплатформні лінії зв'язку – більше ніж 4. Це може бути використане при пошуку оптимального (найкоротшого) маршруту між заданою парою відправник-адресат.

Методика оцінки показників функціонування ЕРМ із ТА. Таким чином, методика оцінки показників функціонування ЕРМ із ТА буде мати наступні кроки:

Крок 1. Розрахунок інтенсивності трафіку в каналах кожного маршруту m_{ab} .

1.1. Розрахунок інтенсивності трафіку в каналах між МА-МА (згідно виразу (1)).

1.2. Розрахунок інтенсивності трафіку в каналах між МА-БПЛА (згідно виразу (2)).

1.3. Розрахунок інтенсивності трафіку в каналах БПЛА-БПЛА (згідно виразу (3)).

Крок 2. Розрахунок пропускної здатності (ПЗ) в кожному маршруті m_{ab} (згідно матриць Г та П).

2.1. Розрахунок пропускної здатності при визначеному протоколі МД між МА-МА (згідно виразу (4) для протоколу МДСЗ).

2.2. Розрахунок пропускної здатності при визначеному протоколі МД між МА-БПЛА та БПЛА-БПЛА (згідно виразу (5) для протоколу АПР).

2.3. Визначення пропускної здатності маршруту (згідно виразу (6)).

Крок 3. Визначення часу затримки в кожному маршруті m_{ab} (згідно матриць навантаження Г та маршрутів П).

3.1. Визначення часу затримки передачі пакету на ланці МА-МА.

3.2. Визначення часу затримки передачі пакету на ланці БПЛА-БПЛА (МА-БПЛА)(згідно виразів (7,8)).

3.3. Визначення часу затримки в маршруті (згідно виразу (9)).

Висновки. В роботі запропоновано методику оцінки показників функціонування епізодичних радіомереж з телекомунікаційними аероплатформами, яка дозволяє оцінити залежності пропускної здатності, часу затримки передачі за визначеними маршрутами від

рівня навантаження, відстані між абонентами та прийнятими методами множинного доступу. Пропускна здатність маршруту передачі даних визначається мінімальною пропускну здатністю каналу, який входить до його складу.

Наведено, що канали МА-БПЛА-МА мають більшу пропускну здатність ніж канали МА-МА при однаковій інтенсивності трафіку. Тобто для підвищення пропускну здатності мережі доцільніше буде передавати дані через мережу ТА (БПЛА) при умові, що затримка передачі в маршруті не перевищує задану.

При необхідності передачі даних на велику відстань, яка є більшою за дальність прямого з'єднання, необхідно використовувати механізм ретрансляції пакетів через проміжні вузли. Для скорочення кількості ретрансляцій в маршрутах доцільніше передавати пакети через мережу БПЛА.

В подальшому пропонується використання запропонованої методики для управління топологією (положенням та переміщенням ТА) епізодичною радіомережею для оптимізації параметрів її функціонування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mladenović D., Jovanović D. Open source UAV in manet combat environment // 5th International conference on defense technologies, 2012.
2. Ильченко М. Е. Телекоммуникационные системы на основе высотных аэроплатформ. / М. Е. Ильченко, С. А.Кравчук – К.: Наукова думка, 2008. – 580 с.
3. Бунин С.Г. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами / С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк. – К.:Наукова думка. – 444 с.: ил.
4. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных: пер. с англ. – М.: Мир, 1989, – 544 с., ил.
5. Вишневский В. М., Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович – М.: Техносфера, 2005.
6. Валуйський С.В. Метод підвищення пропускну здатності епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ. / Дисс. на отримання наукового ступеню кандидату техн. наук: 05.12.02. «Телекомунікаційні системи та мережі» / С.В. Валуйський, 2012. С. – 61 – 80.
7. Бунин С. Г. Вычислительные сети с пакетной радиосвязью. / С. Г. Бунин, А. П. Войтер. – К.: Техника, 1989. – 223 с
8. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных: пер. с англ. – М.: Мир, 1989, – 544 с., ил.
9. Клейнрок Л. Вычислительные сети с очередями. Пер. с англ. / Под ред. Б. С. Цыбакова. – М.: Мир, 1979. – 600 с
10. Ильченко М. Е. Сотовые радиосети с коммутацией пакетов / М. Е.Ильченко, С.Г. Бунин, А. П. Войтер. – К.: Наукова думка, 2003. – 266 с.
11. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Перевод с англ. – М.: Машиностроение, 1979. – С. 432 с.
12. Kleinrock L. Packet switching in radio channels: Part 1 – Carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics / L. Kleinrock, F. A. Tobagi // IEEE Transactions on communications. – 1975. – Vol. 23. – №12. – P. 1400 – 1416.