

Новіков В.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лисенко О.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Валуйський С.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гуйда О.Г.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПОКАЗНИКІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ІЗ МОБІЛЬНИМИ СЕНСОРАМИ Й ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ

Стаття присвячена викладенню математичних моделей методів та алгоритмів підвищення пропускну здатності безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами з одночасним забезпеченням структурно-функціональної зв'язності мобільних сенсорів в умовах їх швидкого та непередбачуваного переміщення. Проаналізовано принципи функціонування та методи підвищення пропускну здатності безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами. Удосконалено математичну модель оцінки зв'язності вузлів безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами, що дозволить визначати не тільки наявність зв'язності, а й прогнозувати її тривалість в умовах швидкої та непередбачуваної зміни положення мобільних сенсорів. Досліджено математичні моделі оцінки показників функціонування безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами, а саме пропускну здатність та середню затримку передачі між заданою парою відправник-адресат. Удосконалено алгоритм пошуку квазі-оптимального положення телекомунікаційних аероплатформ, що дозволить в процесі поточного функціонування безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами знаходити раціональні рішення задачі реконфігурації топології телекомунікаційних аероплатформ під час зміни умов їх функціонування (відмови телекомунікаційних аероплатформ та мобільних сенсорів, зовнішні збурення, непередбачувані переміщення мобільних сенсорів). Розроблено метод підвищення пропускну здатності безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ, що дозволить підвищити якість інформаційного забезпечення моніторингової системи зони стихійного лиха.

Ключові слова: безпроводові сенсорні мережі, мобільні сенсори, телекомунікаційні аероплатформи, безпілотні літальні апарати, математичні методи та моделі.

Постановка проблеми. Топологія таких мобільних радіомереж носить динамічний характер та постійно розвивається, а отже, потребує ефективної системи управління (СУ), що могла б швидко реагувати на структурні та функціональні зміни, забезпечуючи ті чи інші цілі управління [1–7]. Такими цілями управління можуть бути

забезпечення зв'язності (структурної надійності), якості маршрутів передачі даних між абонентами (QoS), підвищення пропускну здатності мережі та ін. Управляючими параметрами у даному випадку можуть виступати потужність передавачів, спрямованість ДН наземних і бортових антен, навантаження, взаємне положення вузлів та ін. Недостатньо

розв'язаною на сьогодні є задача оптимального оперативного розміщення множини телекомунікаційних аероплатформ (БПЛА) для підвищення пропускної здатності мережі із одночасним забезпеченням структурно-функціональної зв'язності мобільних сенсорів. Запропоновані на сьогодні методи, що закладаються в СУ топологією (місцезаповненням) ТАП, вирішують лише часткові задачі забезпечення геометричної зв'язності роз'єднаних компонентів мережі, не враховуючи обмеження ємності каналних ресурсів, розподілу навантаження та обслуговування пакетів в вузлах мережі. Також більшість методів вирішують лише статичні задачі, не враховуючи характер мобільності сенсорів та маневреність ТАП, а отже підлягають вдосконаленню. Найвні методи планування наземних радіомереж також не ефективні, оскільки мають велику складність та час обчислення, що не дозволяє ТАП відпрацьовувати отримані рішення в режимі реального часу.

Отже, виникає **актуальна наукова задача** – розробка математичних моделей, методів і алгоритмів оптимізації показників функціонування безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами.

Постановка завдання. Метою статті є розвиток математичних моделей, методів і алгоритмів оптимізації показників функціонування ad-hoc мереж у задачах підвищення пропускної здатності безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами із одночасним забезпеченням структурно-функціональної зв'язності мобільних сенсорів в умовах їх швидкого та непередбачуваного переміщення.

Виклад основного матеріалу. Для постановки загальної математичної задачі дослідження розглянемо функціональну модель БСМ із МС та ТАП.

1-й рівень БСМ із МС та ТАП складає мережа МС, що можуть довільним чином переміщуватися в деякому районі r . За наявності прямої видимості МС зв'язуються між собою через спільний широкомовний канал на частоті f_1 , а за відсутності – застосовують принцип комутації (маршрутизації) пакетів через проміжні вузли. Таким чином, абонентські термінали представляють собою багатофункціональні пристрої, що поєднують у собі прийомопередавач, модем, кодек, маршрутизатор та запам'ятовуючий пристрій, працюючи в одночастотному напівдуплексному режимі за принципом «store-and-forward» («прийняв – запам'ятав – передав»). Для ретрансляції повідомлень через ТАП кожен МС має також другий комплект радіо-

обладнання та пам'яті, працюючи у дуплексному двох частотному режимі на частотах f_2, f_3 .

2-й рівень БСМ із МС та ТАП складає мережа телекомунікаційних аероплатформ, що баражують на висоті h по колу мінімального радіусу навколо проекції точки свого оптимального розміщення $(x_{0k}, y_{0k}), k = \overline{1, K}$, де K – кількість ТАП в мережі, утворюючи стільники радіусом R . МС, що знаходяться в зоні радіо покриття ТАП можуть ретранслювати пакети як усередині стільника, так і в інших стільниках, скорочуючи таким чином кількість ретрансляцій в довгих маршрутах. Тобто бортова апаратура ТАП також представляє собою складний багатофункціональний пристрій з окремими інтерфейсами (для зв'язку з МС та між собою), що дозволяє виконувати маршрутизацію пакетів по їх адресній інформації, ретранслюючи їх в середині стільника або за його межі. Між стільникові зв'язання (ТАП-ТАП) працюють у дуплексному режимі із частотним ущільненням, використовуючи набір несучих частот, розподілених за стільниковим принципом, з окремим демо-дулятором на кожній. За допомогою єдиного передавача пакети направляються сусіднім ТАП згідно з наявними запитами в режимі розділення в часі. Вважається, що на борту кожної ТАП є інформація про його місцезаповнення та розподіл частот по стільникам, що дозволяє при зміні його положення визначити, яку з них слід використовувати в даний момент.

Таким чином, можливі такі варіанти маршрутів передачі даних між МС (наприклад, між МС1 та МС10), що позначені суцільними потовщеними стрілками на рис.6:

- 1) через мережу МС (МС1–МС2–...–МС10);
- 2) через мережу ТАП (МС1–ТАП1–ТАП3–МС10);
- 3) змішаним шляхом (МС1–ТАП1–МС6–...–МС10).

До маршрутів, між заданою парою відправник a – адресат b , висуваються наступні *вимоги* стосовно:

1) $s_{m\ ab}$ – пропускної здатності (ПЗ) маршруту $m_{ab} : s_{m\ ab} \geq s^0, a, b = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}$, де N – кількість МС в мережі, M – кількість маршрутів в мережі, s^0 – мінімальний допустимий рівень ПЗ маршруту;

2) $t_{z\ ab}$ – затримки передачі (або кількості ретрансляцій) в маршруті: $t_{z\ ab} \leq t_z^0 (l(m_{ab}) \leq l^0)$;

3) $d_{ij}(D_{ik})$ – структурної зв'язності на всіх ділянках маршруту: $d_{ij} \leq d^0(D_{ik} \leq D^0) \forall ij \parallel ik \in m_{ab}, i, j, a, b = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}$, де d_{ij}, d^0 – дальність(відстань) між МС та відповідне

обмеження зверху, а D_{ik}, D^0 – дальність між МС та ТАП та відповідне обмеження зверху;

4) $T_{36 ij}$ – тривалості зв’язності кожної ділянки ij маршруту: $T_{36 ij} \geq T_{36}^0$, де T_{36}^0 – мінімальний час, протягом якого ТАП може відпрацювати задане розміщення, встановити маршрут та здійснити передачу мінімальної кількості інформації.

Вибір маршруту здійснюється на основі функціонування одного з відомих методів маршрутизації. Для зручності управління топологією (місцеположенням) ТАП краще використовувати таблично-орієнтовані методи (наприклад, OLSR), тоді кожен МС має власну маршрутну таблицю найкоротших шляхів Π_i до усіх інших вузлів мережі.

Для здійснення управління топологією (місцеположенням) ТАП в мережі використовується центр управління (ЦУ), винесений за межі району дислокації МС r . Використовуючи окремий службовий канал, ЦУ через мережу ТАП може зібрати вихідні дані про початкову топологію мережі в деякий момент часу t , а саме координати та швидкість переміщення кожного МС $(x_i, y_i)_i, \bar{v}_i, i = \overline{1, N}$ та попередньо виведених ТАП $X_{0k} = [x_{0k}, y_{0k}, z_{0k}], \bar{V}_{0k}, k = \overline{1, K}$, а також дані про

функціонування мережі Π_i (існуючі маршрути та їх якість), та здійснити відповідне управлінське рішення (вивід нової ТАП або переміщення однієї з раніше виведених ТАП в деяке нове положення простору X_{0k}), що максимізує пропускну здатність мережі S . При цьому вважається, що на момент планування мережі ЦУ відома інформація про розподілення трафіку (навантаження) γ_{ab} між кожною парою відправник-адресат $a-b$, що задається матрицею тяжіння $\Gamma = \|\gamma_{ab}(t)\|$.

Ціллю управління положенням телекомунікаційних аероплатформ (БПЛА) є підвищення пропускну здатності БСМ із МС та ТАП із одночасним забезпеченням структурної зв’язності МС та якості маршрутів передачі даних між ними.

При цьому під *пропускну здатністю мережі* будемо розуміти максимальне значення трафіку γ , яке мережа може обробити в одиницю часу при незмінній матриці розподілу трафіку Γ .

Підсумовуючи вищесказане, зведемо всі відомості про функціонування та ресурси в єдину таблицю вихідних даних (див. табл. 1).

Використовуючи вище вказані вихідні дані, загальну постановку задачі можна сформулювати таким чином: визначити розміщення

Таблиця 1

ТАП	Час баражування: $T_{6j} \leq 4 \text{ год}, j = \overline{1, K}$. Висота баражування: $h_j \leq 3000 \text{ м}, j = \overline{1, K}$. Швидкість переміщення: $V_{0j} = 60 \dots 400 \text{ км/год}, j = \overline{1, K}$ Потужність передавача: $P_j = \text{const}, j = \overline{1, K}$
МС	Кількість абонентів в мережі: $N < 500$ Координати абонентів: $(x_i, y_i), i = \overline{1, N}$ Швидкість переміщення: $v_i = \text{const}, i = \overline{1, N}$ Потужність передавача: $p_i = \text{const}, i = \overline{1, N}$ Розмір району дислокації: $r = 10000 \times 10000 \text{ м}^2$
Частотне розподілення	Канал МС-МС: напівдуплексний одно частотний (f_1). Канал МС-ТАП-МС: дуплексний двох частотний (f_2, f_3). Канал ТАП-ТАП: Дуплексний багато частотний. Ширина смуги каналу: $\Delta f_1 = \dots = \Delta f_5 = 20 \text{ МГц}$. Діапазон частот: 2,4 ГГц.
МД	Тип МД: випадковий Протоколи МД: МДСЗ (МС-МС), АПР (МС-ТАП-МС), FDMA (ТАП-ТАП).
Маршрутизація	Тип протоколу: таблично-орієнтовний (наприклад, OLSR); Алгоритм побудови маршрутів: Дейкстри.
Трафік	Тип: однорідний (апр., VoIP+дані). Довжина пакету: $L=1024$ біт. Швидкість передачі в каналах: $V=11 \text{ Мбіт/с}$. Матриця розподілу трафіку $\Gamma = \ \gamma_{ab}(t)\ $
Управління	Тип: змішаний (централізовано-децентралізований)
Допущення	Буфери мають нескінченну довжину черги. Потік надходження пакетів підкоряється розподілу Пуассона.

X групи телекомунікаційних аероплатформ (БПЛА) для максимізації пропускної здатності мережі S , тобто

$$S = \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N s_{m ab}(X) \rightarrow \max_{X \in \Omega}, \quad (1)$$

де Ω – ОДЗ, що визначається вимогами до зв'язності та показників функціонування БСМ із МС та ТАП;

$$X = \begin{bmatrix} X_{01} \\ \dots \\ X_{0k} \end{bmatrix}, \text{ де } X_{01} = \begin{bmatrix} x_{01} \\ y_{01} \\ z_{01} \end{bmatrix}, \dots, X_{0k} = \begin{bmatrix} x_{0k} \\ y_{0k} \\ z_{0k} \end{bmatrix}, k = \overline{1, K}.$$

Для розв'язання поставленої задачі необхідно розробити:

- 1) методику оцінки наявності та тривалості структурної зв'язності вузлів БСМ із МС та ТАП;
- 2) метод (систему) управління положенням телекомунікаційних аероплатформ (БПЛА).

Методика оцінки зв'язності вузлів БСМ із МС та ТАП

Крок 1. Прогнозування середньої тривалості зв'язності $T_{зв ij}$ вузлів БСМ із МС та ТАП на основі моделей переміщення МС, що розглядаються нижче.

Крок 2. Перевірка можливості відпрацювання ТАП заданої цілі управління при заданій динаміці топології мережі (тривалості зв'язності), що визначається умовою $T_{зв ij} > T_{зв ij}^0$. Якщо умова виконується, тоді підвищення пропускної здатності за допомогою зміни положення ТАП можливе, крім того, є можливість збільшити множину можливих рішень ($T_{нош.реш.}$) для досягнення більшої точності, інакше застосування методу не можливе.

Крок 3. Розрахунок дальності зв'язку від кожного МС до найближчого сусіда та центру зони покриття ТАП.

Крок 4. Перевірка умов Ω_1 для кожного МС та перевірка цілісності мережі. Під цілістістю мережі розуміється наявність лише однієї компоненти зв'язності графу мережі. Перевірка цілісності мережі можливо шляхом побудови мінімального кістякового дерева (МКД) графу (наприклад, згідно з алгоритмом Пріма [8]) та перевірка кожного ребра дерева на виконання умови Ω_1 . Якщо умови Ω_1 виконуються, то мережа є структурно зв'язаною на момент часу t , інакше – необхідно певне управлінське рішення (наприклад, вивід (переміщення) ТАП).

Для реалізації методики розроблено наступні математичні моделі.

Математична модель оцінки максимальної дальності радіозв'язку

Максимальна дальність безпосереднього радіозв'язку пари вузлів мережі обмежується, по-перше, енергетикою радіолінії (потужністю передавача, чутливістю приймача, підсиленням антен, втрат у антенно-фідерному тракці, вільному просторі та ін.), за якої відношення сигнал-шум у точці прийому не менше визначеної величини для забезпечення заданої ймовірності пакетної помилки (PER) при заданому вигляді сигнально-кової конструкції.

По-друге, максимальна дальність безпосереднього радіозв'язку визначається ефективністю функціонування протоколу множинного доступу (МД) до спільного каналного ресурсу. У випадку збільшення протяжності радіолінії зростає кількість колізій в організації МД, а отже, зменшується пропускна здатність та зростає затримка передачі. Тому максимальна дальність зв'язку може визначатися граничним значення пропускної здатності каналу s^0 при заданій швидкості передачі V , розмірі пакету даних L та інтенсивності трафіку G .

Ураховуючи вищезазначене, отримаємо аналітичну модель оцінки ймовірності пакетної помилки (PER) для каналів БСМ із МС та ТАП:

$$P_{L nm} = 1 - (1 - \sum_{a=d}^{\infty} a_d Q(\sqrt{2 \cdot \frac{P_n C_{nm} F_{nm}}{\sigma_m^2 (\sqrt{|x_0^n - x_0^m|^2 + |y_0^n - y_0^m|^2})^\alpha} \cdot \frac{C}{W} \cdot R_e \cdot d}))^L, \quad n \neq m, n, m = \overline{1, K}, \quad (2)$$

де F_{nm} – множник послаблення радіолінії між ТАП-вузлами n та m .

Використовуючи модуляцію BPSK у поєднанні зі загортковим кодом типу 133₈, 171₈ зі швидкістю 1/2, можна отримати залежності PER від максимальної дальності зв'язку для каналів МС-МС та каналів МС-ТАП (ТАП-ТАП) при різних значеннях потужності передавача.

Максимальна дальність безпосереднього радіозв'язку також визначається ефективністю функціонування протоколу МД до спільного каналного ресурсу. Так, при $s^0=0,5$ максимальна протяжність радіолінії МА-МА d^0 має становити не більше 600м для протоколу МД із сигналом «зайнято» (МДСЗ), МА-ТА d^0 – не більше 3000м для адаптивного протоколу МД із резервуванням (АПР) n пакетів, а на протяжність радіолінії ТАП-ТАП не має обмежень (окрім енергетики), оскільки протокол МД, що застосовується на ній, не залежить від нормованого часу розповсюдження пакету.

Таким чином, щоб забезпечити задані вимоги до характеристик протоколів МД, потужність передавача слід обирати таким чином, щоб забезпечити необхідний рівень пакетної помилки на відстані, що визначається максимальним часом розповсюдження пакету в мережі. Так, для забезпечення рівня PER 10^{-3} на відстані 600м потужність передачі МС має становити близько 0,8Вт. У свою чергу, для забезпечення того ж рівня PER на відстані 3000м потужність передавачів ТАП має становити близько 8Вт.

Знаючи максимальну протяжність радіолінії МС-ТАП, можна визначити максимальний радіус стільника, створюваного телекомунікаційною аероплатформою. У фіксованому положенні ТАП у просторі його величину визначатиме кут місця абонентського терміналу ψ та висота баражування ТАП h . Згідно з рекомендацією F.1569 для мереж на основі NARs мінімальний кут місця становить 20° , а на практиці в межах щільно забудованого міста становить 60° - 90° для забезпечення прямої видимості між МС та ТАП. Тоді із тригонометричних розрахунків випливає, що радіус стільника становитиме $R \approx 1500$ м при висоті ТАП $2600 \leq h < 3000$ м. Але враховуючи маневрування ТАП по колу мінімального радіусу та неточність його виводу, радіус зони стабільного покриття становитиме $R \approx 1450$ м.

Математична модель розрахунку тривалості зв'язності мобільних сенсорів у БСМ із ТАП

Мобільність сенсорів призводить до того, що вони не можуть постійно знаходитись у зоні радіо видимості один одного та зоні покриття ТАП. Тобто виникає необхідність змодельовати час життя з'єднання *LLT* (*Link life time*), протягом якого МС та ТАП можуть здійснювати інформаційний обмін (побудувати маршрут та передати деяку кількість інформації). Вивчення цього питання започатковано в роботах [9; 10], де запропоновано низку моделей мобільності вузлів для аналізу та моделювання. Однак запропоновані моделі лише частково підходять для моделювання мобільності БСМ із МС та ТАП.

Для моделювання переміщення вузлів було використано такі сценарії мобільності:

1) «однакових напрямків», або «марш» ($\phi = const, v = const$). Згідно з даним сценарієм усі вузли в межах зони радіо видимості R рухаються прямолінійно та паралельно один одному в однаковому напрямку з однаковою швидкістю;

2) «випадкових напрямків», або «різнобій» ($\phi = const, v = const$). Згідно з даним сценарієм усі вузли в межах зони радіо видимості R рухаються

прямолінійно за різними випадковими напрямки з однаковою швидкістю;

3) «випадкового блукання в полі» ($\phi = var, L = const, v = const$). Усі вузли в межах зони радіо видимості R рухаються з однаковою швидкістю по ломаній траєкторії, випадково змінюючи свій напрямок через кожний постійний крок $l \ll R$;

4) «випадкового блукання у місті» ($\phi = var(0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ), L = const, v = const$). Усі вузли в межах зони радіо видимості R рухаються з однаковою швидкістю по перпендикулярних прямих (вулицях) та випадковим чином змінюють свій напрямок на кожному перехресті через кожний постійний крок $l \ll R$.

Математичні моделі розрахунку тривалості зв'язності у випадках: прямої радіо видимості між вузлами; ретрансляції через проміжний вузол; ретрансляції через проміжні вузли та ТАП дозволили обґрунтувати необхідність виконання спеціальних дій (заходів):

1. 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 повинна існувати (або передбачатися) можливість «розширення» зони покриття за рахунок збільшення потужності передавача або зміни діаграми направленості антени [11], тобто вузол A «не відпускає» B протягом передачі хоча б одного пакету.

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

3. Застосування алгоритмів локального відновлення маршруту на основі розрахунку координат вузлів в локальних координатах, як, наприклад, у [12].

4. Застосування мережі ТАП у якості додаткових повітряних вузлів-ретрансляторів (адаптація архітектури до структури багаторангової мережі).

Для визначення ефективності запропонованих заходів розроблена методика оцінки показників функціонування БСМ із МС та ТАП.

Ця методика дозволяє оцінити відповідність сукупності маршрутів передачі даних $M = \{m_{ab}\}, a, b = \overline{1, N}$ вимогам до параметрів функціонування Ω_2 .

Методика оцінки показників функціонування БСМ із МС та ТАП складеться із наступних кроків:

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

Крок 2. Розрахунок пропускної здатності (ПЗ) та середньої затримки передачі в кожному маршруті m_{ab} (згідно матриць Γ та Π), використовуючи аналітичні співвідношення.

Крок 3. Перевірка умов Ω_2 : якщо $s(m_{ab}) < s^0$ або $t_3(m_{ab}) > t_3^0$, тоді якість маршрутів в ЕРМ незадовільна, що потребує певного управлінського впливу (наприклад, виведення (переміщення) ТАП).

Для виконання кроків методики розроблено математичні моделі, які дозволяють розрахувати інтенсивність трафіку в кожному каналі БСМ із МС та ТАП.

Для ширококомовного одночастотного каналу МС-МС інтенсивність трафіку можна визначити таким чином:

$$\lambda_i^{(1)} = \sum_{j \in N_i} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}, \quad a, b: i \in m_{ab}, \quad a \uparrow b \quad (3)$$

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

Для спільного каналу МС-ТАП та ширококомовного каналу ТАП-МС відповідно:

$$\lambda_{ik}^{(2)} = \sum_{i \in N_k} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}, \quad a, b: ik \in m_{ab}; \quad \lambda_{kj}^{(3)} = \sum_{i \in N_k} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}, \quad a, b: kj \in m_{ab}, \quad a \uparrow b, \quad (4)$$

де N_k – множина МС, що покриті k -м ТАП.

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

$$\lambda_{kl}^{(4)} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \left(\sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab} \right), \quad a, b: kl \in m_{ab}, \quad k \uparrow l, \quad a \uparrow b, \quad (5)$$

де K – кількість виведених ТАП.

Основними характеристиками, що визначають ефективність функціонування протоколу множинного доступу до загального каналного ресурсу, є [13, 14]: 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.

Середню швидкість передачі каналу МС-МС, що працює на частоті f_1 , згідно з протоколом МДСЗ можна визначити за такою формулою [15]:

$$s_{ij}^{(1)} = \frac{G_{\Sigma}^{(1)}}{(\exp(2aG_{\Sigma}^{(1)}) - 1)((5a + \tau + 0,5)G_{\Sigma}^{(1)} + \exp(-2aG_{\Sigma}^{(1)})) + G_{\Sigma}^{(1)}(4a + \tau + 1) + 1}, \quad (6)$$

де a, τ – нормований максимальний час розповсюдження радіосигналу та сигналу «зайнято»;

$G_{\Sigma}^{(1)} = \frac{\lambda_i^{(1)}}{\mu} = \lambda_i^{(1)}T$ – сумарна інтенсивність трафіку, що надходить в канал МА-МА, нормована до тривалість передачі пакету T .

Застосовуючи, наприклад, адаптивний протокол випадкового МД із резервуванням (АПР), значення середньої швидкості передачі в каналах МС-ТАП можна визначити таким чином:

$$s_{ik}^{(2)} = \frac{GN \exp(-aG)}{1 + GB}, \quad (7)$$

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

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

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, пропускна здатність каналів МС-ТАП, ТАП-ТАП обчислюється за виразом:

$$s_{ik}^{(2)} = \frac{GN \exp(-aG)}{1 + G((N + b + a + \frac{1 - \exp(-aG)}{G}) \exp(-aG) + b + 2a - \frac{1 - \exp(-aG)}{G})}. \quad (10)$$

Наступна математична модель дозволяє обчислити затримки передачі в каналах БСМ із МС та ТАП.

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 такий вигляд: $D = T_{\text{нак}} + T_{\text{досм}} + T_{\text{росн}} + T_{\text{обр}} + T_{\text{буф}}$, де $T_{\text{нак}}$ – час пакетизації (формування пакету у вузлі-відправнику), що залежить від типу трафіку (алгоритму формування пакету, наприклад, для голосу – від типу кодеку); $T_{\text{досм}}$ – середній час

затримки доступу до каналу (для випадкового МД), що залежить від інтенсивності трафіку та пропускної спроможності каналу; T_{pocn} – час розповсюдження сигналу в середовищі передачі (не залежить від типу трафіка); $T_{обр}$ – час обробки пакету в проміжних вузлах мережі (залежить від типу трафіку); $T_{буф}$ – 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. Також будемо вважати, що пакети, які знаходяться на приймач, відразу потрапляють у буфер, а отже, $T_{обр}$ також дорівнює нулю.

Використовуючи апарат теорії масового обслуговування, БСМ із МС та ТАП, можна представити через сукупність блоків М/Г/1.

Тоді середній час перебування пакета в черзі буферу можна розрахувати за такою формулою [15]:

$$T_{буф} = T + W^{(z)}(1 + v^2) = \frac{1}{\mu} + \frac{G_{\Sigma}^{(z)}}{2\mu(1 - G_{\Sigma}^{(z)})}(1 + v^2), \quad (11)$$

де $W^{(z)}$ – середній час затримки пакету в черзі при $\mu = const$;

v – коефіцієнт варіації ∞ ;

$G_{\Sigma}^{(z)} = \frac{\lambda_{\Sigma}^{(z)}}{\mu} = \lambda_{\Sigma}^{(z)}T$ – сумарна інтенсивність трафіку, що надходить на частоті z .

Було проведено імітаційне моделювання середнього часу перебування пакету в блоці типу М/Г/1, яке підтвердило адекватність обраної аналітичної моделі.

Середній час затримки передачі пакету на ланці МС-МС має такий спрощений вигляд:

$$D_{ij} = \left(\frac{G_{\Sigma}^{(i)}}{S_{ij}^{(i)}} - 1 \right) (4a + \tau + 0,5 + Y + X) + 4a + \tau + 1 + W_i^{(i)}, \quad (12)$$

де X – нормований середній час затримки повторної передачі; Y – нормований середній час початку передачі останнього конфліктуючого пакету.

У свою чергу, середній час затримки передачі пакету на ланці ТАП-ТАП (МС-ТАП) матиме вигляд:

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

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

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

Оскільки канали ТАП-ТАП працюють із 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 $D_{kl} = a + W_k^{(4)}$.

Аналіз результатів розрахунків показав, що за інтенсивності трафіку менше ніж 30 менший час затримки має ланка мережі із застосуванням ТАП, аніж ланка МС-МС. При цьому граничне значення інтенсивності трафіку тим більше, чим більше розмір блоку пакетів в протоколі АПР. Також слід зазначити, що при однаковій затримці передачі ланка із ТАП має шестикратний вигреш у відстані. Отже, для мінімізації затримки під час передачі інформації на великі відстані доцільніше передавати інформацію через мережу ТАП, а на короткі – через мережу МС.

Якщо вважати, що маршрут передачі інформації складається з l ланок, де кожна ланка має однакову середню інтенсивність трафіку, тоді загальна затримка пакету «із кінця в кінець» через мережі МС та мережі ТАП становитиме відповідно:

$$t(m_{ab}) = D_{ij} \cdot l; \quad t(m_{ab}) = D_{ik} + (a + W_k)l \quad (13)$$

Можемо бачити, що в даному випадку максимальна кількість ретрансляцій під час передачі через мережу МС, що визначається заданою величиною затримки ($t_s^0 = 400мс$), має становити не більше 14. Для скорочення кількості ретрансляцій в маршрутах доцільніше передавати пакети через мережу ТАП. Причому всередині стільника 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.

Математична модель визначення кількості абонентів в стільниках БСМ із МС та ТАП

Популяція мережі (число абонентів n) може бути визначена таким 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 МДСЗ вказана залежність відображається виразом (4), а для АПР – виразом (19). Абсциса екстремума функції $S(G)$ або деякого її граничного значення (наприклад, 0,5) визначає гранично допустимий трафік

G_{\max} для заданного 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:

$$n_{\max} \approx G_{\max} / \bar{G}_i \quad (14)$$

За цієї кількості абонентів не виключено, однак, 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 (12) для МДСЗ та виразом 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 наступним чином:

$$n_{\text{опт}} = G_{\text{опт}} / \bar{G}_i \quad (15)$$

Використовуючи вираз (4) та обмеження ПЗ $S=0,5$ отримаємо наступні граничні допустимі трафіки: для стільника МС трафік пакетів становитиме $G_{\max} \approx 35$ при $x=600\text{м}$, для стільника ТАП 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 МС становитиме $n_{\max} \approx 7$, а в зоні дії ТАП – становитиме $n_{\max} \approx 60$. Максимальна кількість ТАП в зоні дії одного ТАП залежить від плану розподілу потоків між абонентами мережі, (тобто величини трафіку, що передається за межі стільника), але вочевидь, що не переважає декількох одиниць із міркувань щодо забезпечення заданої ЕМС та безаварійного переміщення ТАП у просторі.

Зрозуміло, що наведений розрахунок носить суто наближений характер через те, що окрім припущення щодо пуасонівського 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 кож-

ним 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 МС на мережу ТАП та навпаки. Знаючи кількість наземних абонентів, їх координати та трафік створюваний ними, ТАП 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. Зазначений принцип покладено в основу при розробці методу управління топологією мережі ТАП.

Метод підвищення пропускної здатності безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами

Суть розробленого методу полягає в побудові спеціальної обчислювальної структури на основі розглянутих вище математичних моделей оцінки структурної зв'язності та показників якості обслуговування мобільних сенсорів, а також удосконаленого алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТАП, та поєднанні їх в єдину обчислювальну процедуру для досягнення близьких до екстремальних значень пропускної здатності мережі в режимі реального часу.

Математична постановка задачі

Представимо БСМ із МС та ТАП у вигляді стохастичного ненаправленого зваженого графу $G(V,E)$, що складається з множини вершин (МС та ТАП) $V = \{v_i\} \cup \{b_k\}$ та множини ребер $E = \{(i, j) \mid d_{ij} \leq d^0\} \cup \{(i, k) \mid R_{ik} \leq R^0\}$, $i, j = 1, N, k = 1, K$, що визначають матрицю зв'язності $C = \|c_{ij}\|$, де $c_{ij} = \{0, 1\}$ – булева змінна. У якості ваги ребра може виступати протяжність відповідної радіолінії ($d_{ij}(R_{ik})$).

Пропускна здатність мережі у даному випадку можна визначити, як сумарну пропускну здатність усіх маршрутів мережі, тобто

$$S(C) = \sum_{m=1}^M \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N s(m_{ab}), \quad a \neq b, \quad \text{де} \quad (16)$$

$$s(m_{ab}) = \min_{(i,j) \in m} \{s(c_{ij})\}.$$

Нехай задані такі *вихідні дані*: N – кількість МС; K – кількість ТАП; r – розмір району дислокації МС, м^2 ; $(x_i, y_i)_i, i = 1, N, (x_{0k}, y_{0k}), k = 1, K$ – координати МС та виведених ТАП в момент часу $t, \text{м}$; $d^0(R^0)$ – максимальна дальність зв'язку, м ;

s^o – мінімально допустиме значення ПЗ маршруту m_{ab} ; t_3^o – максимально допустиме значення затримки передачі маршруту m_{ab} ; $P_i = \|l(m_{ab})\|$, $a, b = \overline{1, N}$ – маршрутна таблиця найкоротших шляхів, де $l(m_{ab})$ – кількість ретрансляцій в маршруті; $\Gamma = \|\gamma_{ab}(t)\|$ – матриця тяжіння.

Тоді можемо сформулювати наступну задачу управління положенням телекомунікаційних аероплатформ, що входять до складу БСМ із МС: знайти в режимі реального часу ($T_{\text{нов.реш.}} \ll T_{3e}$) координати положення ТАП у просторі X_{0k} , $k = \overline{1, K}$ (матрицю зв'язності C^*), що забезпечує максимум пропускної здатності мережі $S(C)$:

$$C^* = \arg \max_{X_0 \in \Omega_{1,2,3}} S(C) = \arg \max_{X_0 \in \Omega_{1,2,3}} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N s_{m_{ab}}, a \neq b \quad (17)$$

Під час виконання обмежень на множину управлінських дій та ресурси мережі

$$\Omega_1 : \{d_{ij} \leq d^0, D_{ik} \leq D^0, T_{3e\ ij} \geq T_{3e}^0 \ \forall i, j \in m_{ab}\},$$

$$\Omega_2 : \{s(m_{ab}) \geq s^0, \overline{t_3} \leq t_3^0 \ (l(m_{ab}) \leq l^0)\},$$

$$\Omega_3 : \{1030 \leq h < 3000, R^0 \leq 1500\}.$$

Метод підвищення пропускної здатності БСМ із МС та управлінням положенням ТАП

Для вирішення поставленої математичної задачі запропоновано метод управління положенням телекомунікаційних аероплатформ що входять до складу БСМ із МС.

Метод складається з таких основних етапів:

1. Ідентифікація математичної моделі оцінки зв'язності вузлів БСМ із МС та ТАП.

2. Ідентифікація математичних моделей оцінки показників ефективності функціонування БСМ із МС та ТАП.

3. Побудови алгоритму пошуку квазіоптимального положення телекомунікаційних аероплатформ.

Алгоритм пошуку квазіоптимального положення телекомунікаційних аероплатформ

Задача пошуку оптимального розміщення ТАП (матриці зв'язності C_k) відноситься до класу NP -повних. Застосування для її вирішення класичних методів приводить до експонентної складності. Отримання точного рішення для мережі, яка налічує сотні (тисячі) вузлів, потребує значних затрат часу. Тому для скорочення повного перебору варіантів розміщення ТАП пропонується використовувати сукупність правил, поєднаних в базу знань, що змінюють зв'язність мережі для підвищення

пропускної здатності мережі та скорочують час обчислень. Це дозволяє отримати в реальному часі близькі до оптимальних рішення та використовувати запропонований алгоритм для оперативного управління положенням ТАП. Критерієм визначення моменту перестройки топології мережі може бути невиконання однієї з умов Ω_1 або Ω_2 .

Застосування сукупності правил включає в себе ітераційну процедуру, що складається з модулів АНАЛІЗ, БАЗА ЗНАНЬ, УПРАВЛІННЯ та працює у такій послідовності:

1. Аналіз поточного стану мережі (розрахунок параметрів БСМ із МС та ТАП за допомогою ідентифікованих математичних моделей.

2. Перевірка параметрів мережі на множині правил. Якщо немає умов для виконання правил, то процедуру закінчити, інакше – застосувати правила з бази знань для зміни зв'язності мережі.

3. Обчислення параметрів модифікованої мережі.

Модуль АНАЛІЗ призначений для знаходження пропускної здатності мережі S , середньої затримки передачі пакетів t_3 , по маршрутах при заданому вхідному навантаженні Γ , маршрутних рішеннях P , зв'язності C та протоколі доступу до каналу за допомогою математичних моделей розділу 3.

Модуль СУКУПНІСТЬ ПРАВИЛ включає в себе правила, що забезпечують напрямлений пошук зміни зв'язності, використовуючи параметри отримані з модуля АНАЛІЗ.

Модуль УПРАВЛІННЯ визначає момент закінчення застосування правил та виконує роль інтерпретатора [16], працюючи циклічно. У кожному циклі він продивляється всі правила, щоб виявити ті, посилки яких співпадають із відомими на даний момент фактами з пам'яті. Після вибору правило спрацьовує, його висновок вноситься в пам'ять, а потім цикл повторюється спочатку. В одному циклі може спрацювати тільки одне правило. Якщо декілька правил успішно зіставлені з фактами, то інтерпретатор на основі метаправил вибирає одне правило. Метаправила визначають перевагу правил в залежності від k -ї цілі управління мережею (МП r_i : $Pr_i \rightarrow w^k_i$). Те правило, що в більшій степені покращує потрібні параметри, буде мати більшу вагу w^k_i .

Ключовою особливістю в запропонованій процедурі є сукупність правил. Усі правила класифіковано на три групи: 1) для забезпечення вимог до зв'язності мережі (Ω_1); 2) для забезпечення вимог до функціональних показників (Ω_2); 3) для підвищення пропускної здатності мережі. Керованим

параметром є взаємне розташування вузлів, а саме положення ТАП відносно мобільних сенсорів. Запропоновані правила аналізують структуру графа мережі та намагаються створити таку структуру мережі, що буде мати найбільшу продуктивність, виявляючи перевантажені ділянки мережі та намагаючись пере направити потоки по маршрутам з меншою загрузкою. Всі правила, незалежно від цілей управління, визначають наступну дію – вивід або зміну позиції ТАП у просторі, що призводить до зміни кількості вузлів у зоні покриття ТАП.

Запропоновано нові модифіковані правила та відповідні управлінські дії (щодо квазіоптимального розміщення ТАП у просторі). Розглянемо їх детальніше.

Правило № 1. Якщо кількість компонент зв'язності (незв'язних підграфів) графу мережі $k > 1$, тоді телекомунікаційну аероплатформу (ТАП) необхідно розмістити так, щоб з'єднати якомога більшу кількість компонент зв'язності.

Мета-правило № 1. Якщо є декілька варіантів розміщення ТАП, що поєднує однакову кількість компонент зв'язності, то обрати той, що покриває більшу кількість вузлів цих компонент.

Правило № 2. Якщо середня затримка передачі (кількість ретрансляцій) в деяких маршрутах більше необхідної, тоді ТАП необхідно розмістити так, щоб зменшити середню затримку передачі (кількість ретрансляцій) в маршруті.

Мета-правило № 3. Якщо є декілька варіантів розміщення ТАП, що однаково зменшує затримку в маршрутах, то слід обрати той, що дозволяє максимізувати ПЗ маршрутів.

Для того щоб зменшити середню затримку передачі (кількість ретрансляцій у маршруті), необхідно розмістити ТАП так, щоб покрити пару заданих вузлів відправник-адресат у кращому випадку або ж пару найбільш віддалених (по кількості ретрансляцій) вузлів маршруту.

Висновки. У статті викладено результат розв'язання науково-технічної задачі щодо роз-

робки методу підвищення пропускної здатності безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення мобільних сенсорів.

Головні наукові і практичні результати статті полягають у такому:

1. Удосконалено математичну модель оцінки зв'язності вузлів безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами. Суть удосконалення моделі полягає в тому, що запропоновано поєднати сукупність аналітичних моделей оцінки достовірності передачі даних в радіоканалах із сукупністю аналітичних моделей прогнозування переміщення мобільних абонентів.

2. Досліджено математичні моделі оцінки функціональних показників безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами, що базується на детальному розрахунку трафіку в мережі та втрочених аналітичних співвідношеннях для оцінки пропускної здатності та середньої затримки передачі.

3. Удосконалено алгоритм пошуку квазіоптимального положення телекомунікаційних аероплатформ. Суть удосконалення алгоритму полягає в тому, що вдалося уникнути повного перебору варіантів розміщення телекомунікаційних аероплатформ завдяки використанню попередньо розробленої сукупності правил відбору варіантів такої зміни зв'язності мережі, що підвищують її пропускну здатність, а також зменшують час обчислень.

4. Розроблено метод підвищення пропускної здатності епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ. Відмінність розробленого методу від відомих полягає в тому, що вперше запропоновано об'єднати в єдину обчислювальну процедуру математичні моделі оцінки зв'язності та якості обслуговування мобільних абонентів, а також удосконалений алгоритм пошуку квазіоптимального положення телекомунікаційних аероплатформ.

Список літератури:

1. O. Lysenko, M. Sparavalo, V. Romaniuk, S. Valuiskyi. Intelligent control system for wsn and manet. Information and Telecommunication Sciences, 2019, Volume 10, Number 2, p. 12-21. "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". ISSN 2312-4121. URL : <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/188348>.
2. Лисенко О.І. Визначення показників векторного критерію для оцінки зв'язності безпроводових епізодичних мереж із використанням безпілотних літальних апаратів. *Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.С. Пухова НАНУ*. 2010. Вип. 57. С. 134–141. URL : <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/28234>.
3. Лысенко А.И. Перспективы и проблемы создания систем связи на основе беспилотных летательных аппаратов. *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо '2009) : 19-я междунар. крымская конф., 14-18 сен. 2009г. : материалы конф.* Севастополь, 2009. Т.1. С. 259–260. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/5293146>.

4. Лысенко А.И. Оценка связности беспроводных эпизодических сетей. *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо '2010) : 20-я междунар. крымская конф., 13-17 сен. 2010 г. : материалы конф.* Севастополь, 2010. Т. 1. С. 439–440. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5632352>.
5. Лысенко А.И. Метод оптимального управления топологией сети беспилотных летательных аппаратов. *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо '2010) : 20-я междунар. крымская конф., 13-17 сен. 2010 г. : материалы конф.* Севастополь, 2010. Т.1. С. 333–334. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5632643>.
6. Lysenko O. The optimal control of UAV network topology. *Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies : fourth world congress, 21-23 September 2010 : proceedings.* Kyiv, 2010. P. 1637–1640. (розглянуто принципи управління топологією мережі безпілотних літальних апаратів). URL : http://congress.nau.edu.ua/doc/congress-2010/Congress_2010_V1.pdf.
7. Лысенко А.И. Расчет длительности связности абонентов мобильных радиосетей. *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо '2011) : 21-я междунар. крымская конф., 12-16 сен. 2011г. : материалы конф.* Севастополь, 2011. Т. 1. С. 361–362. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6068966>.
8. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / За загальною ред. В.В. Поповського. Харків : ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. 564 с.
9. Chen J.-K. Expected link life time analysis in manet under manhattan grid mobility model / J.-K. Chen, C. Chen, R.-H. Jan, H.-H. Li // *Analysis and simulation of wireless and mobile systems : the 11th ACM international conference on modeling, October 27-31 2008 : proceedings.* Vancouver, 2008. P. 162–168. URL : <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1454503.1454534>.
10. Zhao M. A Unified Mobility Model for Analysis and Simulation of Mobile Wireless Networks. *Wireless Networks.* 2009. vol. 15. P. 365–389. URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11276-007-0055-4>.
11. Минович А. И. Управление топологией мобильной радиосети. *Зв'язок.* 2003. № 2. С. 28–33. URL : http://www.viti.edu.ua/files/rom/2003/5_2003.pdf.
12. 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». Москва, 2009. 27 с.
13. Бунин С.Г. Вычислительные сети с пакетной радиосвязью. Киев : Техника, 1989. 223 с.
14. Kleinrock L. Packet switching in radio channels: Part 1 – Carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics. *IEEE Transactions on communications.* 1975. Vol. 23. № 12. P. 1400–1416.
15. Клейнрок Л. Вычислительные сети с очередями. Пер. с англ. / Под ред. Б.С. Цыбакова. Москва : Мир, 1979. 600 с.
16. Гаврилова Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем. Санкт-Петербург : Питер, 2000. 384 с.

Novikov V.I., Lysenko O.I., Valuysky S.V., Guida O.H. MATHEMATICAL MODELS, METHODS AND ALGORITHMS FOR OPTIMIZING PERFORMANCE OF THE WIRELESS SENSOR NETWORKS WITH MOBILE SENSORS AND TELECOMMUNICATION AIR PLATFORMS

The article is dedicated to mathematical models, methods and algorithms for increasing the throughput and connectivity of wireless sensors networks with mobile sensors and telecommunication air platforms in terms of their rapid and unpredictable movement. The principles of functioning and methods of increasing the throughput of wireless sensor networks with mobile sensors and telecommunication air platforms are analyzed. The mathematical model for estimating the connectivity of wireless sensor network nodes with mobile sensors and telecommunication air platforms has been improved, which will allow not only to determine the presence of connectivity, but also to predict its duration in conditions of rapid and unpredictable change of mobile sensors position. It was described the mathematical models for estimating the performance of wireless sensor networks with mobile sensors and telecommunications air platforms, namely the bandwidth and the average transmission delay between a given pair sender-destination. It was improved the algorithm for finding the quasi-optimal position of telecommunication air platforms, which will allow in the process of current operation of wireless sensors networks with mobile sensors and telecommunication air platforms to find rational solutions of telecommunication air platforms topology configuration problem when changing their operating conditions (telecommunication air platforms and mobile sensors failures, external perturbations, unpredictable displacements of mobile sensors). A method for increasing the throughput of wireless sensors networks with mobile sensors and telecommunication air platforms together with control of the position of telecommunication air platforms has been developed, which will improve the quality of information support of the monitoring system in the disaster zone.

Key words: telecommunication air platforms, mobile sensors, wireless sensors networks, unmanned aerial vehicles (drones), mathematical methods and models.