

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПІДТРИМКИ ЗВ'ЯЗНОСТІ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ СЕНСОРІВ СПРЯМОВАНОЇ ДІЇ З ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ ДВОРІВНЕВОГО РОЗТАШУВАННЯ

Сушин І.О., Лисенко О. І., Тимофєєв Є.М.

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

E-mail: rubin268@ukr.net

MATHEMATICAL MODEL FOR MAINTAINING THE CONNECTIVITY OF A MOBILE DIRECTED-ACTION SENSOR NETWORK WITH TELECOMMUNICATION AERIAL PLATFORMS OF TWO-LEVEL ARRANGEMENT

The paper describes a mathematical model that, unlike existing mathematical models of MSNs with TA, includes mathematical models of the functioning of directed-action sensors and TA of two-level arrangement with different power supply. An algorithmically defined mathematical model is also presented, which allows calculating the criteria for assessing connectivity.

Існуюча на сьогодні система-прототип [1, 3] складається з наземних сенсорів всеспрямованої дії і ТА на базі БПЛА літакового та гелікоптерного типів, які виконують функцію збору та обміну інформації з іншими ТА і мережевими елементами (базовими станціями, супутниками тощо) використовуючи різні алгоритми та протоколи обміну даних. Місцезрештування даних систем являє собою зону надзвичайної ситуації, стихійного лиха природного або техногенного характеру в якій знищено інформаційно-телекомунікаційну інфраструктуру, а базові станції знаходяться на межі або поза даною зоною (рис.1).

В умовах сучасних та прогнозованих на майбутнє природних та техногенних надзвичайних ситуацій мобільним сенсорним мережам з телекомунікаційними аероплатформами (МСМ з ТА) для ефективного функціонування необхідно мати енергетичний запас майже на порядок більший ніж енергетичний запас, яким забезпечуються сучасні МСМ з ТА.

Сучасні МСМ з ТА мають недопустимо великий час затримки для передачі інформації, малу швидкість її передачі від вузла до кінцевого пункту, вимагають використання надзвичайно великої кількості телекомунікаційних аероплатформ для неперервної підтримки зв'язності.

Тому є об'єктивна необхідність апаратно (конструктивно-алгоритмічного) вдосконалення існуючих мобільних сенсорних мереж з телекомунікаційними аероплатформами для зменшення часу затримки передачі інформації та збільшення швидкості її передачі з кінця в кінець, а також зменшення кількості безпосередньо задіяних телекомунікаційних

аероплатформ (ТА) із врахуванням потреби економнішого використання наявного в вузлах мережі та на борту ТА енергетичного ресурсу.

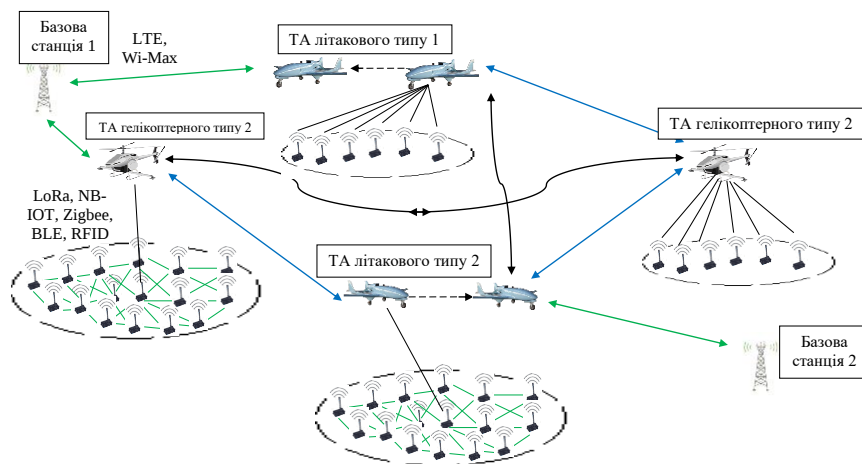


Рисунок 1. Структура мобільної сенсорної мережі з використанням телекомунікаційних аероплатформ на базі БПЛА літакового та гелікоптерного типів, яка поєднує різні алгоритми та протоколи обміну інформацією.

Було запропоновано вдосконалення існуючих МСМ з ТА, яке досягається завдяки застосуванню мобільної мережі сенсорів спрямованої дії з телекомунікаційними аероплатформами різнорівневого розташування [2, 4].

На нульовому рівні розташовані сенсори спрямованої дії, які розташовуються чи пересуваються по поверхні. ТА гелікоптерного типу (або в деяких випадках літакового) створюють 1-й рівень мережі (тактичний рівень), який забезпечує локальну зв'язність для збору та обміну інформації між технічними засобами рятування і пошуку та рятувальниками. Висота розташування від пів кілометра до одиниць кілометрів. Але щоб передати інформацію на далекі відстані до місць де приймаються загальні (оперативно-стратегічні) рішення необхідний ще один рівень ТА – 2-й (висота якого над землею поверхнею від декількох кілометрів до декількох десятків кілометрів). Він повинен взаємодіяти як з мережею ТА гелікоптерного типу (тактичний рівень) так із супутником на низькій навколоземній орбіті або із висотною телекомунікаційною платформою (псевдосупутником) для того, щоб з їх допомогою швидко передавати інформацію до головного центру прийняття рішень. Або передавати інформацію безпосередньо до цього центру (рис.2).

Для проведення імітаційного моделювання [5] була розроблена багатокритеріальна математична модель. Вона дозволяє моделювати як умови існування, так і відсутності зв'язності ММССД з ТА різнорівневого розташування та енергетичного забезпечення, а також обчислювати чисельні значення складових векторного критерію, за якими можна виконати кількісне оцінювання ефективності цієї зв'язності.

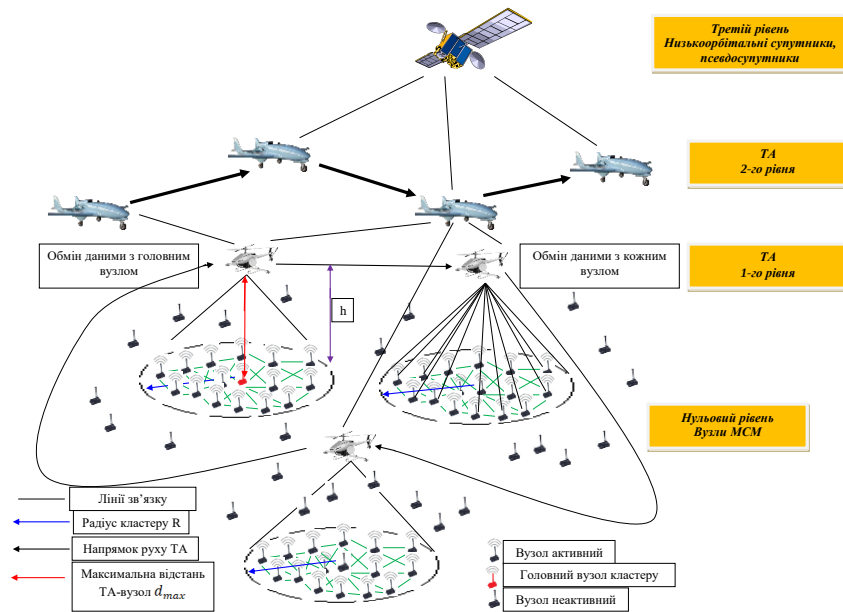


Рисунок 2. Структура мобільної мережі сенсорів спрямованої дії з використанням телекомунікаційних аероплатформ дворівневого розташування.

Кількісні значення скалярних критеріїв $W_i(X)$ ($i = \overline{1,11}$), що є складовими векторного критерію:

$$W(X) = \begin{bmatrix} W_1(X) \\ \vdots \\ W_{11}(X) \end{bmatrix},$$

де X – вектор керуючих параметрів, а його приналежність області допустимих значень G обчислюється за допомогою алгоритмічно заданої моделі функціонування ММССД з ТА різнорівневого розташування із різним енергетичним забезпеченням (рис. 3). Етапи її функціонування детально описано у статті [2].

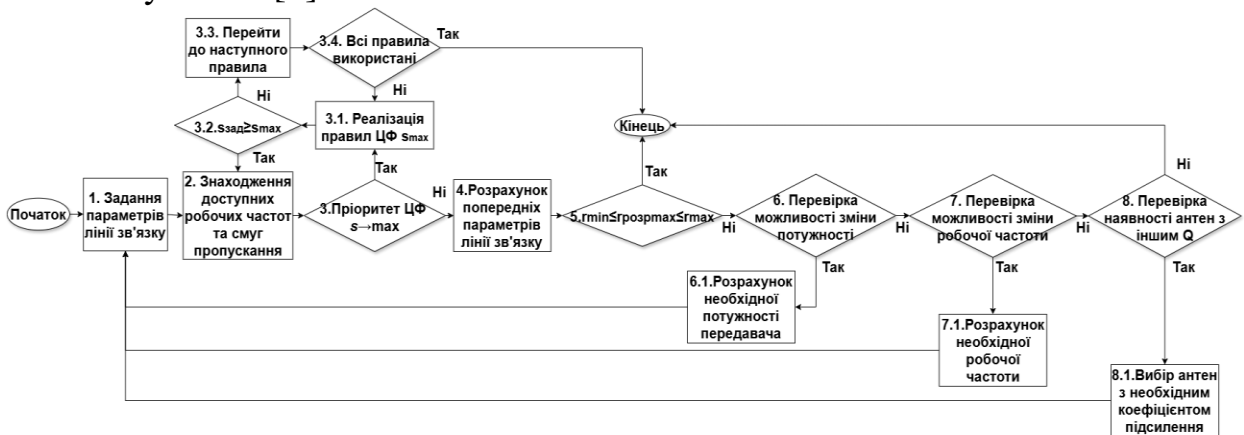


Рисунок 3. Алгоритмічно задана математична модель обчислення скалярних складових векторного критерію.

Складові вектору керуючих параметрів X : потужності передавачів вузлів, ТА першого та другого рівня; коефіцієнт підсилення антен вузлів та просторова орієнтація променя (азимут, кут місяця); робоча частота, смуга пропускання; кількість та розміри кластерів; час сну вузлів.

Для багатокритеріальної математичної моделі було сформовано набір критеріїв $W_i(X)$ ($i = \overline{1,11}$) із переліку методичних рекомендацій МСЕ-Р та програмного комплексу Matlab:

$W_1(X)$ – час передачі інформації усереднений за кількістю сенсорів, с; $W_2(X)$ – швидкість передачі інформації усереднена за кількістю сенсорів, біт/с; $W_3(X)$ – кількість безпосередньо задіяних ТА усереднена за кількістю сенсорів, шт.; $W_4(X)$ – максимальна кількість ТА, шт.; $W_5(X)$ – медіана кількості ТА, шт.; $W_6(X)$ – мода кількості ТА, шт.; $W_7(X)$ – довжина маршруту усереднена за кількістю сенсорів, м; $W_8(X)$ – максимальна довжина маршруту, м; $W_9(X)$ – мінімальна довжина маршруту, м; $W_{10}(X)$ – медіана довжини маршруту, м; $W_{11}(X)$ – мода довжини маршруту, м.

Параметри математичної моделі, які вважаються незмінними:

1. Характеристики вузлів (кількість $N_{\text{вуз}}$, тип батареї, її ємність, формфактор);
2. Характеристики ТА (кількість ТА 1-го рівня $N_{\text{ТА1}}$ та 2-го рівнів $N_{\text{ТА2}}$, тип джерела живлення, швидкість, висота польоту або діапазон висот);
3. Площа на якій вони розташовуються та маршрути переміщення;
4. Координати вузлів і ТА в момент передачі інформації (при розгляді сценарію квазімобільності);
5. Об'єм даних (зокрема і службового) V_i i -го вузла, що необхідно передати, $i=1 \dots N_{\text{вуз}}$;
6. Топологія та маршрути передачі даних з вузлів МСМ до супутника через ТА;
7. Можливості взаємодії між собою мережевих елементів кожного рівня.

Література

1. Romaniuk, V., Lysenko, O., Novikov, V., Sushyn, I. Development of methods of positioning, localization and data collection from nodes of a free mobile sensor network using intelligent adaptive telecommunication aeroplatforms. Information and Telecommunication Sciences, (2), 40–49, 2021. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22021.40-49>
2. Сушин, І., та Лисенко, О. Універсальна методика передачі даних із застосуванням сенсорів спрямованої дії. Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки, 35 (74)(2), 6–14, 2024. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/02>
3. Sushyn, I., Lysenko, O., Romaniuk, V., Yavisiya, V., Kyselov, V., Novikov, V. UAV Connectivity Maintenance in Wireless Sensor Networks. In: Luntovskyy, A., Klymash, M., Melnyk, I., Beshley, M., Schill, A. (eds) Digital Ecosystems: Interconnecting Advanced Networks with AI Applications. TCSET 2024. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1198. Springer, Cham. pp. 843-857. 2024. ISSN: 1876-1100. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61221-3_41
4. Сушин, І., та Буткевич, Г. Методика оцінки зв'язності вузлів бездротової сенсорної мережі при умові використання багаторівневої мережі телекомунікаційних аероплатформ. Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки, 34 (73)(6), 39–46, 2023. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/07>
5. Sushyn, I., Ivashchev, D., Lysenko, O. Evaluating the functioning effectiveness of sensor ground-to-air network using multiple UAVs layers and directional antennas. Information and Telecommunication Sciences, (2), 32–38, 2024. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22024.32-38>