

Мустафасєв О.В.Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки
та судових експертиз Служби безпеки України

ОЦІНКА ЯКОСТІ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛУ У ВІДПОВІДНОСТІ ДО ЗВ'ЯЗНОСТІ ВУЗЛІВ БЕЗДРОТОВИХ ДИНАМІЧНИХ МЕРЕЖ

У статті розглянуто сучасні підходи, що використовуються при розробці методів оптимізації процесу передачі радіосигналу у середовищі бездротової динамічної мережі через вирішення задачі зв'язності інформаційних її вузлів. Показано, що актуальність задачі забезпечення зв'язності вузлів мережі пов'язана з необхідністю організації стабільної передачі даних за умов відсутності наземної комунікаційної інфраструктури, що є актуальним при вирішенні широкого спектру практичних задач. У рамках дослідження формалізація особливостей організації бездротової динамічної мережі включала у себе визначення таких функціональних компонент як цільові показники, що оцінюються у відповідності до поставленого завдання по експлуатації мережі, загальна структура мережі, алгоритми збору даних з вузлів мережі, статистична модель передачі даних, алгоритми первинного розміщення вузлів мережі, методика імітаційного моделювання мережі з оптимізацією позиціонування вузлів. Зазначено, що основною перевагою систем передачі даних на основі бездротової динамічної мережі є відсутність складної інфраструктури, що надає можливість забезпечити оперативність виконання задачі комунікації між інформаційними вузлами мобільних електронних пристроїв та широкий інструментарій для організації надійного зв'язку на апаратному та програмному рівні. Були виконані завдання з розробки методик оптимізації протоколів маршрутизації, контролю доступу та управління ресурсами, а також формування захищених каналів передачі даних у відповідності до набору актуальних загроз. Проведений у рамках дослідження аналіз надав можливість виділити такі типові проблеми як виникнення помилок при передачі даних, локальні порушення з'єднання, погіршення якості зв'язку, пов'язане з мобільністю вузлів, затримка при автоматичній обробці і передачі потокових даних, пов'язана з обмеженістю обчислювального ресурсу і перепускної здатності мережі. Запропоновано комплексну методику вирішення зазначених проблем через забезпечення зв'язності інформаційних вузлів мережі на рівні побудови математичної моделі. На етапі математичного моделювання має бути з достатнім рівнем точності проведено формалізацію архітектури мережі і алгоритмів збору даних з урахуванням стаціонарних, мобільних та сенсорних вузлів мережі, їх технічних та комунікаційних характеристик, а також функцій часової залежності об'єму даних моніторингу. Таким чином, розроблена методика базується на визначенні оптимального алгоритму збору даних моніторингу з сенсорних вузлів через інформаційні вузли мережі та розрахунку швидкості і траєкторії переміщення мобільних платформ з метою підтримки належного рівня зв'язності.

Ключові слова: WANET, задача зв'язності, стаціонарні вузли, мобільні вузли, сенсорні вузли, протоколи маршрутизації, мобільні платформи.

Постановка проблеми. Протягом двох останніх десятиріч у зв'язку з широким впровадженням засобів безпілотної авіації (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) та, зокрема, систем висотних UAV дальнього радіусу дії (High-Altitude Long-Endurance; HALE) зростає актуальність вирішення задачі впровадження архітектури бездротової динамічної мережі (Wireless Ad Hoc Network; WANET), у рамках якої системи HALE-UAV розглядаються як аероплатформи, на основі яких реалізуються інформаційні вузли інфраструктури загального комплексу. Впровадження WANET визначає новий рівень у розвитку систем бездротового зв'язку, у рамках відповідної пара-

дигми здійснюється передача даних без забезпечення вимог на стабільне позиціонування як вузлів кінцевих користувачів, так і вузлів ретрансляторів радіосигналу. Технологія WANET найбільш актуальна при виконанні задач, які потребують забезпечення стабільної і конфіденційної передачі даних і відсутності комунікаційної інфраструктури на рівні традиційної наземної системи радіозв'язку. Серед типових задач, при виконанні яких є найбільш актуальним розгортання високофункціональних засобів WANET, можна відзначити наступні:

- збір даних розвідки та координування бойових дій поза міської інфраструктури;

- організація оперативного зв'язку для рятувальників у зоні природної чи техногенної катастрофи, або у зоні ліквідації наслідків теракту;
- оптимізація систем навігації у водному, наземно-повітряному й повітряному середовищі (зокрема, для безпілотних систем);
- впровадження та оптимізація інфраструктури інтернету речей (Internet of Things; IoT) та інтернету транспортних засобів (Internet of Vehicles; IoV).

Основною перевагою систем передачі даних на основі WANET є відсутність наземної комунікаційної інфраструктури, що надає можливість забезпечити оперативний комунікаційний процес між мобільними електронними пристроями та ретрансляторами, а також широкий інструментарій для організації надійного зв'язку на апаратному та програмному рівні. Водночас, слід вказати, що впровадження розподіленої мережі змінної топології не тільки розширює інструментарій та галузі застосування відповідної архітектури, але й призводить до ряду типових проблем у роботі відповідної інформаційної системи, таких як:

- нестабільність передачі та прийому радіосигналу;
- зростання ймовірності перехоплення радіосигналу зловмисниками або ворогом;
- затримка при обробці даних у зв'язку з обмеженим обчислювальним ресурсом інформаційних вузлів аероплатформ;
- низька пропускна здатність інформаційних каналів.

Таким чином, попри високу актуальність впровадження, технологія WANET вимагає уважного вивчення аспектів безпеки та ефективного керування ресурсами для забезпечення стійкої та ефективної роботи цієї радіомережі в умовах середовища, параметри якого обмежені та розглядаються як змінні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових публікацій за тематикою оптимізації процесу передачі сигналу у середовищі бездротових мереж радіозв'язку зі змінною топологією вказав на актуальність вирішення задачі зв'язності інформаційних вузлів багаторівневої бездротової мережі [1–4] та, зокрема, WANET [5]. Зазначено широкий спектр галузей застосування WANET на базі UAV [6–10]. При цьому слід зауважити, що у ряді досліджень розглядаються мережі з мінімальною кількістю інформаційних вузлів на основі UAV [11–13], що спрощує вирішення задачі інтерференції сигналу та контролю і позиціонування аероплатформ, але водночас надзвичайно

обмежує функціональні можливості розподіленої системи. Тому, основна увага була приділена дослідженням з організації сучасних WANET, що характеризуються багаторівневою структурою та масштабованістю [14–19]. Це надало можливість виділити такі проблеми як:

- втрата зв'язку через помилки у передачі даних;
- втрата зв'язку з інформаційними вузлами внаслідок неоднорідності мережі і недосконалої маршрутизації UAV;
- нерівномірне покриття зони через недостатню потужність сигналу аероплатформи;
- загроза безпеки на рівні перехоплення конфіденційних даних або атаки на протоколи зв'язку.

Було показано, що вирішення цих проблем може включати в себе використання оптимізованих протоколів маршрутизації, механізмів керування аероплатформами, адаптивних алгоритмів, технік антенної обробки сигналів та застосування протоколів безпеки [14–19]. У вищезазначеному дослідженні невирішеною задачею залишається побудова цілісної аероплатформи WANET через вирішення задачі зв'язності інформаційних вузлів.

Метою статті є дослідження оцінки зв'язності інформаційних вузлів багаторівневої бездротової мережі зі змінною топологією за умов відсутності наземної комунікаційної інфраструктури.

Виклад основного матеріалу дослідження

1. Організація інфраструктури мережі радіозв'язку WANET з застосуванням аероплатформ. У рамках дослідження розглядається архітектура багаторівневої WANET, інформаційні вузли ретрансляторів якої представляють собою аероплатформи. Зазначена модель бездротової мережі зі змінною топологією складається з наступних рівнів: (i) рівень «А», що включає у себе вузли сенсорної мережі та наземні вузли кінцевих користувачів системи радіозв'язку $n \in [1; N]$; (ii) рівень «В», що включає у себе наземні вузли ретрансляторів низової ланки радіомережі; (iii) рівень «С», що включає у себе вузли ретрансляторів радіомережі на основі мобільних аероплатформ гелікоптерного типу; (iv) рівень «D», що включає у себе вузли базових станцій радіомережі на основі мобільних аероплатформ типу HALE-UAV; (v) рівень «Е» на базі систем супутникового зв'язку.

Задача зв'язності вузлів, як можна побачити зі схеми, має бути вирішена для рівнів «С» і «D» інфраструктури WANET, у зв'язку з тим, що рівні «А» і «Е» є некерованими, а рівень «В» є нерухомим, а отже не вносить змін у топологію мережі.

2. Постановка задачі оцінки зв'язності інформаційних вузлів рівнів мережі радіозв'язку класу WANET. Організація інформаційних вузлів WANET для рівнів, інформаційні вузли яких базуються на аероплатформах, має включати у себе визначення наступних функціональних компонент:

- формування набору цільових показників, що визначаються у відповідності до поставленого завдання по експлуатації мережі, спрямоване на систематизацію процесів оцінки продуктивності та ефективності мережі;
- представлення загальної архітектури мережі і побудова комплексної методики збору даних з вузлів мережі, спрямованої на створення єдиної інформаційної основи для аналізу та вдосконалення функціонування мережевих елементів;
- математичне моделювання процесу передачі даних, що базується на статистичних методах, спрямованих на розробку точних та ефективних інструментів для передбачення і оптимізації потоків даних у мережі радіозв'язку;
- розробка алгоритмів первинного розміщення вузлів мережі у відповідності до поставленого завдання, спрямованих на раціональне розташування вузлів для максимізації покриття та оптимізації енергоспоживання;
- побудова системи імітаційного моделювання мережі, що включає у себе оптимізацію позиціонування вузлів, що спрямована на використання віртуальних сценаріїв для тестування та вдосконалення стратегій функціонування в реальному часі;

- проведення комплексної оцінки ефективності роботи мережі у відповідності до набору цільових показників, спрямованої на надання інформації для прийняття обґрунтованих рішень з покращення якості та продуктивності мережі.

Завданнями, що при цьому мають бути виконані, є розробка та оптимізація протоколів маршрутизації, контролю доступу та управління ресурсами, а також формування захищених каналів передачі даних, оскільки мобільні платформи характеризуються широким спектром загроз, як природними перешкодами та інтерференцією корисного сигналу, так і зовнішніми загрозами з боку зловмисників та ворожої розвідки, перехопленням конфіденційних даних, тощо.

Зв'язок між етапами формування системи оцінки зв'язності інформаційних вузлів рівнів мережі радіозв'язку класу WANET представлено на рис. 2.

Для визначення цільових показників, що розраховуються у відповідності до поставленого

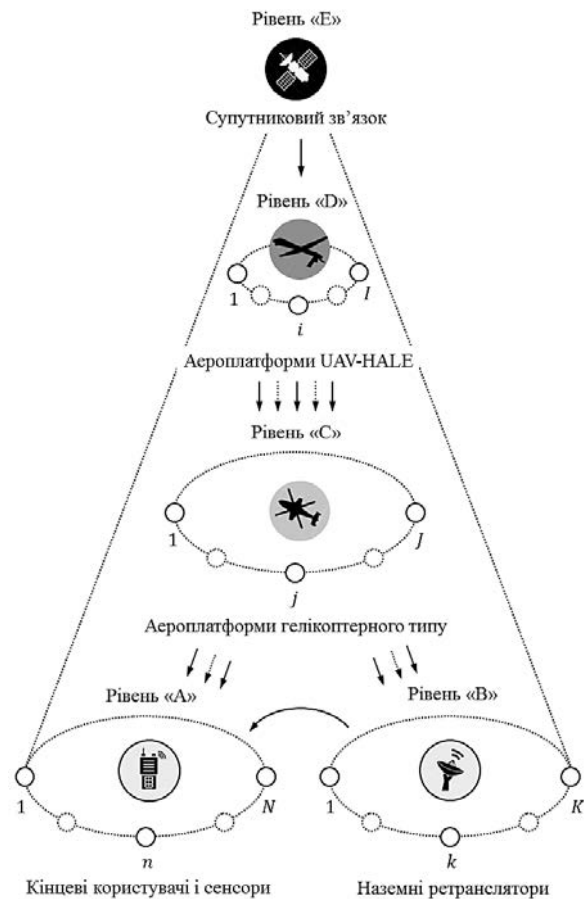


Рис. 1. Базова схема багаторівневої WANET з застосуванням аероплатформ для вузлів базових станцій та ретрансляторів

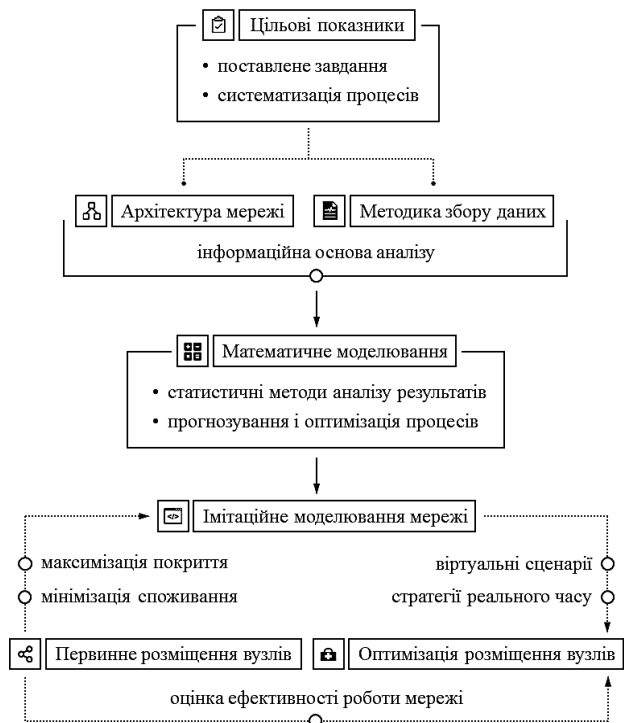


Рис. 2. Діаграма проведення етапів формування системи оцінки зв'язності інформаційних вузлів WANET

завдання по експлуатації мережі, необхідно визначити задачі, що можуть бути вирішені при забезпеченні зв'язності вузлів. Проведений аналіз надає можливість виділити наступні типові проблеми, що розглядаються як найбільш характерні для мереж радіозв'язку класу WANET:

1. Виникнення помилок при передачі поточкових даних у зв'язку з фізичним явищем інтерференції сигналу за умов швидкого руху окремих аероплатформ або високою щільністю їх розташування для окремої області покриття.

2. Локальні порушення з'єднання кінцевих користувачів сервісу та погіршення якості зв'язку, пов'язані з мобільністю інформаційних вузлів ретрансляторів та базових станцій, що призводить до зміни топології мережі і, відповідно, ускладнює маршрутизацію у межах інформаційної системи радіомережі.

3. Велика затримка при автоматичній обробці і передачі поточкових даних, пов'язана з обмеженістю обчислювального ресурсу і перепускної здатності складових апаратно-програмної платформи мережі, які базуються на аероплатформах, що порушує функціонування сервісу у режимі реального часу.

Вирішення задачі зв'язності вузлів може включати в себе ряд технологічних та алгоритмічних підходів для покращення надійності та продуктивності функціонування мережі через динамічне керування маршрутами (використання алгоритмів маршрутизації, які адаптуються до змін у топології мережі та базуються на векторах відстаней), впровадження механізмів управління мобільністю для підтримки безперервного з'єднання та оптимізації якості зв'язку при переміщенні вузлів, а також розробку та використання енергоефективних протоколів та алгоритмів для зменшення споживання енергії вузлами мережі на аероплатформах.

3. Система оцінки зв'язності інформаційних вузлів рівнів мережі радіозв'язку класу WANET. Проведений аналіз показав, що вирішення задачі забезпечення зв'язності вузлів мережі на рівні побудови математичної моделі надає можливість з достатнім рівнем точності описати архітектуру мережі радіозв'язку і визначити принципи побудови протоколів та алгоритмів збору даних з можливістю внесення змін у відповідності до вирішення задачі оптимізації WANET за представленим набором цільових показників. Формалізація процедури організації забезпечення зв'язності вузлів мережі базується на введенні наступних ключових показників:

- кількість стаціонарних та інформаційних вузлів мережі радіозв'язку на основі аероплатформ як наборів $n \in [1; N_{st}]$ і $n \in [1; N_{mob}]$, а також набори констант і змінних, що визначають координати їх просторового позиціонування як $\{x_n, y_n, z_n\}$;

- кількість сенсорних вузлів мережі як набір $k \in [1; K]$, а також набори їх технічних та телекомунікаційних характеристик, функція часової залежності об'єму даних моніторингу, що передаються вузлом у одиницю часу як $A_k(t)$, причому кожен вузол характеризується власною системою управління.

Протокол, на якому базуються алгоритми збору даних, визначає процес взаємодії інформаційних вузлів з головними вузлами кластерів. При цьому необхідно вирішити завдання визначення кількості відповідних вузлів та позиціонування точок збору даних, оптимізацію порядку збору даних у відповідності до підтримки зв'язності на рівні оптимізації цільових функцій, що формалізується як:

- мінімізація часу збору даних (Data Collection Time; DCT) з інформаційних вузлів кінцевих користувачів та сенсорів мережі як $T_{DC} \rightarrow T_{DC}^{min} = f(n, x_n, y_n, z_n) / v$;

- максимізація часу стабільної роботи (Network Uptime, NU) мережі радіозв'язку $T_{NU} \rightarrow T_{NU}^{min}$ з урахуванням обмеження на обчислювальний ресурс, енергію батарей, зони покриття, а також висотний і швидкісний діапазон аероплатформ.

Визначення екстремумів цільових функцій проводиться у відповідності до етапів функціонування мережі (застосування процедури кластеризації рівня мережі, розрахунок маршруту аероплатформ і процес передачі даних) та способів реалізації інфраструктури мережі (оптимізація кількості та розмірів кластерів, зменшення рівня енергоспоживання, забезпечення однорідності розташування аероплатформ, ротація аероплатформ, що виконують роль головних вузлів, зменшення навантаження на обчислювальний ресурс).

Запропонована методика базується на визначенні оптимального алгоритму збору даних моніторингу з сенсорних вузлів через інформаційні вузли мережі, розрахунку швидкості і траєкторії переміщення мобільних платформ з метою підтримки зв'язності і, таким чином, оптимізації інфраструктури у відповідності до набору цільових показників ефективності передачі даних. Таким чином, організація WANET базується на визначенні особливостей функціонування апаратно-програмної платформи кожного з вузлів, що надалі використовуються у експертно-моделюючій системі прийняття рішень при керуванні відповідною інформаційною системою.

У відповідності до поставленої задачі дослідження, формування рівнів визначається через аналіз та врахування особливостей функціонування апаратно-програмної платформи кожного з вузлів. Врахування усіх аспектів функціонування вузлів у мережі дозволяє оптимально налаштувати процеси збору, обробки та передачі даних, забезпечуючи оптимальну пропускну здатність та забезпечуючи надійну зв'язність між всіма елементами мережі. Цей підхід сприяє ефективному використанню ресурсів мережі, забезпечуючи високу продуктивність та адаптуючись до змінних умов експлуатації.

Висновки. У результаті проведеного дослідження було запропоновано методичні основи оцінки

зв'язності вузлів багаторівневої бездротової мережі зі змінною топологією за умов відсутності наземної комунікаційної інфраструктури. Проведене дослідження включало розробку наступних етапів:

- базової схеми багаторівневої WANET із застосуванням аероплатформ для інформаційних вузлів базових станцій та ретрансляторів;
- діаграми формування системи оцінки зв'язності інформаційних вузлів WANET;
- методичку оцінки зв'язності інформаційних вузлів рівнів мережі радіозв'язку класу WANET.

Запропонований підхід сприяє ефективному використанню ресурсів мережі радіозв'язку через забезпечення високої продуктивності та стабільності виконання базових процедур.

Список літератури:

1. Kumar P.V. Detection and prevention of drop attack in WANET using robust scheme method. *Research Square*, 8(1) 2021. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-417857/v1>.
2. Samuel, G.J., Paul, V.P. Maintaining connectivity of mobile nodes using MANET Gateway Nodes. *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, 19(3), 288 (2017).. <https://doi.org/10.1504/ijcnds.2017.086490>.
3. Improving network connectivity using trusted nodes and edges. 2017 American Control Conference. Abbas, W., Laszka, A., Vorobeychik, Y., Koutsoukos, X. <https://doi.org/10.23919/acc.2017.7962974>.
4. Connectivity of finite wireless networks with Random Communication Range Nodes. 2009 IEEE International Conference on Communications. Bermudez, S. A., Wicker, S. B. <https://doi.org/10.1109/icc.2009.5198844>.
5. Maintaining a permanent connectivity between nodes of an air-to-ground communication network. 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Rautu, D., Dhaou, R., Chaput, E. <https://doi.org/10.1109/iwcmc.2017.7986367>.
6. Grodi, R., Rawat, D. B., Bajracharya, C. Performance evaluation of unmanned aerial vehicle ad hoc networks. *Southeast Con 2015*. <https://doi.org/10.1109/secon.2015.7133020>.
7. Polo, J., Hornero, G., Duijneveld, C., García, A., Casas, O. (2015). Design of a low-cost wireless sensor network with UAV Mobile Node for agricultural applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 119, 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.compag>.
8. Quaritsch, M., Kruggl, K., Wischounig-Strucl, D., Bhattacharya, S., Shah, M., Rinner, B. Networked UAVs as Aerial Sensor Network for Disaster Management Applications. *E & i Elektrotechnik Und Informationstechnik*, 127 (3), 56–63. <https://doi.org/10.1007/s00502-010-0717-2>.
9. Airborne WIFI networks through directional antennae: An experimental study. 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Yixin Gu, Mi Zhou, Shengli Fu, Yan Wan. (2015). <https://doi.org/10.1109/wcnc.2015.7127659>.
10. Achieving air-ground communications in 802.11 networks with three-dimensional aerial mobility. 2013 Proceedings IEEE INFOCOM. Yanmaz, E., Kuschnig, R., & Bettstetter, C. <https://doi.org/10.1109/infcom.2013.6566747>.
11. AirGSM: An unmanned, flying GSM cellular base station for Flexible Field Communications. 2012 IEEE Aerospace Conference. Wypych, T., Angelo, R., Kuester, F <https://doi.org/10.1109/aero.2012.6187134>.
12. Bekmezci, İ., Sahingoz, O. K., Temel, Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): (2013). A survey. *Ad Hoc Networks*, 11(3), 1254–1270. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.12.004>.
13. Asadpour, M., Van den Bergh, B., Giustiniano, D., Hummel, K., Pollin, S., Plattner, B. Micro-Aerial Vehicle Networks: An experimental analysis of challenges and opportunities. *IEEE Communications Magazine*, 52 (7), 141–149. (2014). <https://doi.org/10.1109/mcom.2014.6852096>.
14. Tsao, K.Y., Girdler, T., Vassilakis, V. G. A survey of cyber security threats and solutions for UAV Communications and flying ad-hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 133, 102894. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.102894>.
15. Masroor, R., Naeem, M., Ejaz, W. Resource management in UAV-Assisted Wireless Networks: An optimization perspective. *Ad Hoc Networks*, 121, 102596. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2021.102596>.

16. Condomines, J.P., Zhang, R., Larrieu, N. Network intrusion detection system for UAV ad-hoc communication: From methodology design to real test validation. *Ad Hoc Networks*, 90, 101759. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.09.004>.

17. Tag: Trajectory aware geographical routing in cognitive radio ad hoc networks with UAV nodes. *Ad Hoc Networks*, 111–122. Harounabadi, M., Puschmann, A., Artemenko, O., Mitschele-Thiel, A. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25067-0_9.

18. Kolomvatsos, K. Time-optimized management of IOT nodes. *Ad Hoc Networks*, 69, 1–14. (2018). <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2017.10.011>.

19. Tetsurō U. Location Tracking and location estimation of nodes in ad hoc networks: A test-bed implementation. *Enhancing the Performance of Ad Hoc Wireless Networks with Smart Antennas*, 91–112. (2016). <https://doi.org/10.1201/9781420013238-7>.

Mustafaiev O.V. ASSESSMENT OF SIGNAL TRANSMISSION QUALITY IN ACCORDANCE WITH CONNECTIVITY OF NODES IN WIRELESS DYNAMIC NETWORKS

Modern approaches used in developing methods to optimize the radio-signal transmission process in wireless dynamic networks through addressing the connectivity task of information nodes are considered. The relevance of ensuring network connectivity is highlighted due to the necessity of organizing stable data transmission in the absence of communication infrastructure, which is crucial for addressing a wide range of practical tasks. Within the research framework, the formalization of the organization features of a wireless dynamic network included the definition of functional components such as target indicators evaluated in accordance with the task of network operation, the overall network structure, data collection algorithms from network nodes, statistical models of data transmission, algorithms for the initial placement of network nodes, methodology for simulation modeling of the network with node positioning optimization. It is emphasized that a key advantage of data transmission systems based on wireless dynamic networks is the absence of a centralized infrastructure, providing operational communication between information nodes of mobile electronic devices and a wide toolkit for organizing reliable communication at the hardware and software levels. Tasks were performed to develop a methodology for optimizing routing protocols, access control, and resource management, as well as forming secure data transmission channels in accordance with a set of relevant threats. The analysis conducted within the research allowed identifying typical problems such as data transmission errors, local connection disruptions, degradation of communication quality associated with node mobility, and delays in automatic processing and transmission of streaming data due to the limitation of computational resources and network bandwidth. A comprehensive methodology for addressing these issues is proposed, focusing on ensuring the connectivity of information nodes in the network at the level of building a mathematical model. It is noted that during the mathematical modeling stage, the architecture of the network and data collection algorithms should be formalized with sufficient accuracy, taking into account stationary, mobile, and sensor nodes of the network, their technical and communication characteristics, as well as the time-dependent function of monitoring data volume. Thus, the developed methodology is based on determining the optimal algorithm for monitoring data collection from sensor nodes through information nodes of the network and calculating the speed and trajectory of movement of mobile platforms to support the required level of connectivity.

Key words: WANET, connectivity task, stationary nodes, mobile nodes, sensor nodes, routing protocols, mobile platforms.