

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-40>

УДК 621.396:004.89

Беляков Роберт Олегович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0001-9882-3088>

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, Україна

ПРОБЛЕМА ІНТЕГРАЦІЇ ПОВІТРЯНОЇ МЕРЕЖІ КЛАСУ FANET В МОБІЛЬНУ КОМУНІКАЦІЙНУ МЕРЕЖУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Беляков Р. О. Проблема інтеграції повітряної мережі класу FANET в мобільну комунікаційну мережу спеціального призначення. Проведено аналіз процесу узгодженого управління наземно-повітряних мереж двох класів – MANET і FANET, що з точки зору управління є складним багатопараметричним оптимізаційним завданням із великою кількістю обмежень.

У статті здійснено формалізований опис моделі наземно-повітряної комунікаційної мережі, визначено параметри вузлів: фізичні та комунікаційні, параметри мережі, сформовано математичну модель системної цільової функції управління з урахуванням ресурсних обмежень.

Визначено, що система управління наземно-повітряною комунікаційною мережею складається із таких основних підсистем управління: топологією, маршрутизацією, навантаженням, переміщенням/польотом (позиціонування), радіоресурсом, безпекою, забезпечення якості інформаційного обміну QoS; та підсистем, що забезпечують процес координації і реалізації цільових функцій в заданих умовах: підсистема контролю, збору, обробки, зберігання даних, підсистема реалізації рішень, підсистема навчання. Визначено, що синтез методів, методик та моделей управління НІМ, які, при використанні їх у складі функціональних підсистем управління, повинні відповідати вимогам: оптимізація параметрів функціонування мобільних вузлів, маршруту, напряму, ψ –ої мережі, НІМ в цілому на різних рівнях моделі OSI; прийняття рішень в реальному часі; мінімальне завантаження мережі службовою інформацією; мінімізація використання вузлових (обчислювальних, енергетичних та ін.) та мережевих ресурсів в тому числі шляхом забезпечення адаптивного і розподіленого функціонування НІМ з можливістю самоорганізації вузлів; здійснення користувальницької мережевої оптимізації з урахуванням QoS.

У статті розглянуті основні підходи, методи (протоколи) фізичного, каналного, мережевого, транспортного, прикладного рівня моделі OSI побудови повітряних мереж класу FANET для їх інтеграції в наземну мобільну комунікаційну мережу з урахуванням особливостей – динамічної топології та ресурсних обмежень, та визначено, що завдання синтезу наземно-повітряних комунікаційних мереж вимагає розробки нових та удосконалення існуючих підходів (методів, методик, алгоритмів) для формування управлінських рішень.

Ключові слова: наземно-повітряна комунікаційна мережа, MANET, FANET, система управління, мобільний користувач, комунікаційна аероплатформа, цільові функції, фізичні параметри, комунікаційні параметри, управлінські рішення, протоколи, рівні OSI, оптимізація, прогнозування.

Bieliakov R. The problem of integrating the FANET class air network into a special purpose mobile communication network. The analysis of the process of coordinated management of land-air networks of two classes - MANET and FANET - is carried out, which from the point of view of management is a complex multi-parameter optimization task with a large number of limitations.

In the article, a formalized description of the land-air communication network model was made, node parameters were defined: physical and communication, network parameters, and a mathematical model of the system target control function was formed, taking into account resource limitations.

It was determined that the land-air communication network management system consists of the following main control subsystems: topology, routing, load, movement/flight (positioning), radio resource, security, QoS quality assurance of information exchange; and subsystems that ensure the process of coordination and implementation of target functions in the given conditions: subsystem of control, collection, processing, storage of data, subsystem of decision implementation, subsystem of training. It was determined that the synthesis of methods, techniques and models of LaAN management, which, when used as part of functional control subsystems, must meet the requirements: optimization of parameters of the functioning of mobile nodes, route, direction, ψ –th network, LaAN as a whole at different levels of the model OSI; decision-making in real time; minimal loading of the network with service information; minimization of the use of nodal (computing, energy, etc.) and network resources, including by ensuring adaptive and distributed functioning of LaAN with the possibility of self-organization of nodes; implementation of user network optimization taking into account QoS.

The article considers the main approaches, methods (protocols) of the physical, channel, network, transport, and application level of the OSI model of building FANET-class aerial networks for their integration into the terrestrial mobile communication network, taking into account the peculiarities of dynamic topology and resource limitations, and it is determined that the task synthesis of land-air communication networks requires the development of new and improvement of existing approaches (methods, techniques, algorithms) for the formation of management decisions.

Key words: land-air communication network, MANET, FANET, control system, mobile user, communication aerial platform, objective functions, physical parameters, communication parameters, management solutions, protocols, OSI levels, optimization, prediction.

Постановка наукового завдання. Під час побудови сучасних комунікаційних мереж спеціального призначення розробники стикаються із множиною задач із узгодження

функціонування різнотипних засобів та координації управляючих рішень для досягнення якості інформаційного обміну необхідного рівня. Однією із головних вимог щодо проектування комунікаційних мереж спеціального призначення є забезпечення функціонування в умовах динамічного руху мобільних користувачів, коли побудована завчасно топологія мережі постійно змінюється.

Застосування технологій Software Defined Radio в мережах класу Mobile Ad-Hoc Network (MANET) (рис. 1) з одного боку забезпечує високий рівень «гнучкості» з точки зору адаптованості мереж до функціонування в різних умовах, але накладає обмеження щодо складності формування управляючих рішень, з метою виконання часто суперечливих цільових функцій [1, 2], з іншого.

Для вирішення завдань із управління мобільними комунікаційними мережами на часі знайшли своє використання комунікаційні аероплатформи (КА) виконані на безпілотних літальних апаратах (БПЛА) різних типів, що у випадку організації у групи можуть утворювати повітряні комунікаційні мережі Flying Ad-Hoc Networks (FANET), побудова яких концептуально дуже схожа на мережі класу MANET. Однак, на практиці такі мережі успішно застосовуються для завдань моніторингу визначених зон, площ, ділянок проведення спеціальних пошуково-рятувальних робіт [3], обстеження стану злітно-посадкових смуг, 3D картографування [4], збору інформації з вузлів безпроводової сенсорної мережі [5] тощо. Застосування КА для ретрансляції повідомлень мобільних користувачів наземної мережі класу MANET має фрагментарний характер із обмеженою кількістю таких КА. Узгоджене застосування мереж двох класів – MANET і FANET з точки зору управління є складним багатопараметричним оптимізаційним завданням із великою кількістю обмежень.



Рис.1. Варіант застосування Software Defined Radio в мережах класу MANET [1]

Таким чином, **актуальним** є завдання визначення функціональних залежностей процесів інформаційного обміну заданої якості наземно-повітряної комунікаційної мережі спеціального (військового призначення).

Метою статті є дослідження особливостей функціонування повітряних комунікаційних мереж спеціального призначення з використанням протоколів та методів за рівнями моделі OSI для синтезу наземно-повітряних мереж спеціального призначення.

Об'єктом дослідження є процеси переміщення та інформаційного обміну в наземно-повітряних комунікаційних мережах спеціального. Відповідно, **предметом дослідження** є модель управління наземно-повітряною мережею та OSI-модель взаємодії комунікаційних аероплатформ повітряної мережі військового призначення.

Основними завданнями статті є наступні:

1. Формалізація процесу управління НПМ.
2. Аналіз задач підсистем управління НПМ з урахуванням особливостей функціонування комунікаційних аероплатформ мережі FANET.
3. Аналіз особливостей функціонування повітряних мереж за рівнями моделі OSI.
4. Визначення напрямків та способів оптимізації процесу управління НПМ з урахуванням особливостей умов функціонування.

Аналіз останніх публікацій. Більшість проаналізованих наукових праць із предметної області були спрямовані на вирішення задач управління в мережах класу MANET для вирішення часткових задач (реалізації однієї або декількох цільових функцій, тобто мають фрагментарний характер [6]. Так, у [7] розглядається варіант управління топологією мережі в динамічному режимі в залежності від залишкової енергії вузлів ретрансляції. У [8] представлено аналіз продуктивності табличних, реактивних та гібридних протоколів маршрутизації. У статті [9] представлено новий протокол маршрутизації – ACOLBR (маршрутизація з балансуванням навантаження на основі АСО), призначений для управління перевантаженням та балансуванням навантаження між кількома шляхами між джерелом і пунктом призначення. Автори застосували техніку колонії мурах АСО (Ant Colony Optimization) під час маршрутизації до MANET для контролю навантаження та балансування навантаження у мережі. У статті [10] представлені властивості мобільної однорангової мережі MANET з динамічним управлінням спектром та присвячена концепції та реалізації нового механізму управління трафіком, який використовується у високоточному симуляторі MANET з інтелектуальними вузлами для спеціальних додатків для вирішення задач управління радіоресурсом, безпекою та потоками. У статті [11] досліджується планування траєкторії БПЛА в безпроводовій сенсорній мережі для оптимізації пропускної здатності наземної мережі та розподілу енергії (ресурсів) вузлів бездротової сенсорної мережі.

Отже, для побудови наземно-повітряної Ad-hoc мережі необхідно вирішити комплекс взаємопов'язаних завдань, засередити увагу на особливості функціонування мереж як на наземному так і повітряному рівні з метою забезпечення інфокомунікаційного обміну заданого рівня якості.

Виклад основного матеріалу.

Модель мережі. Задано: НІМ представляється у вигляді сукупності трьох МР різних рівнів ψ , кожна з яких задається у вигляді графа $G^\psi = (V^\psi, E^\psi)$ із множиною вершин $V^\psi = \{v_i\}$ і множиною ребер $E^\psi = \{(v_i, v_j)\}$, $i, j = \overline{1, N_\psi}$, $\psi = \overline{1, 3}$ (1- мережа мобільних вузлів НМ, 2 – мережа мобільних базових станцій, 3 – мережа вузлів повітряного рівня на КА).

Параметри вузлів v_i^ψ : $e_i^\psi(t)$ – ємність батареї; $r_i^\psi(t) \leq r_{\max}$ – швидкість передачі пакетів; $p_i^\psi(t) \leq p_{\max}$ – потужність передачі i -го вузла.

Параметри радіоканалу $(i, j) \in E$: пропускна спроможність $s_{ij}(t) \leq s_{ijmax}$; $s_{KA}, i = \overline{1, N_3}$ визначається сумою пропускних здатностей вузлів $s_i, i \in N_i$, які знаходяться в зоні покриття цього КА; $R^\xi(t) = \{r_{ij}^\xi(t)\}$ – швидкості передачі даних в радіоканалі; $G^\xi(t) = \{g_{ij}^\xi(t)\}$ – вхідні потоки з ξ -го типу трафіка, де $\xi = \overline{1, 3}$ (дані, мова, відео), $g_{ij}^\xi(t) \leq g_{ijmax}^\xi$ – вхідне навантаження на вузлі i у момент часу t .

Параметри мережі: $\omega^\psi(t) \leq \omega_{\max}^\psi, \psi = \overline{1, 3}$ – інтенсивність зміни топології мережі ψ -го рівня, $\psi = \overline{1, 3}$; $E(t) = \|e_i(t)\|$ – ємності батарей; $i = \overline{1, N_\psi}$;

Фізичні параметри вузла НІМ (мережі ψ -ого рівня): координати розміщення (x_i, y_i, z_i) i -ого вузла мережі ψ -ого рівня; енергія необхідна для передачі, прийому одиниці інформації $e_{i\text{прд}}^\psi, e_{i\text{прм}}^\psi$, енергія необхідна для переміщення i -ого вузла мережі ψ -ого рівня $e_{i\text{пер}}^\psi, \rho_i^\psi$ – швидкість переміщення i -ого вузла мережі ψ -ого рівня, $H_i^{\text{гран}}$ – гранична висота, та $T_{\text{гран}}^{\text{КА}}$ – граничний час польоту КА.

Параметри інформаційного обміну: a – вузол відправник, b – вузол адресат, $t_3^\xi(m_{ab})$ – затримка передачі ξ -го типу трафіка за маршрутом m_{ab} , $l_{ab}^\xi(m_{ab})$ – кількість ретрансляцій по маршруту m_{ab} ; $\xi = \overline{1, 3}$ – тип трафіка (відео, мова, дані); i_{ab}^ξ – інтенсивність потоку пакетів на маршруті ab ; джиттер $J_{ij}(t)$; $BER_{\xi ij}(t)$ – допустиме значення ймовірності помилки для ξ -го типу трафіка.

З урахуванням наведених вихідних даних, необхідно здійснити синтез методів, методик та моделей управління НІМ, які, при використанні їх у складі функціональних підсистем вузлових СУ (рис. 5), які повинні відповідати наступним вимогам $\{B_q^\psi\}, \psi = \overline{1, 3}, q = 1 \dots Q$:

1. Оптимізація параметрів функціонування мобільних вузлів, маршруту, напряму, ψ -ої мережі, НІМ в цілому на різних рівнях моделі OSI.
2. Прийняття рішень в реальному часі.

3. Мінімальне завантаження мережі службовою інформацією.

4. Мінімізація використання вузлових (обчислювальних, енергетичних та ін.) та мережесих ресурсів в тому числі шляхом забезпечення адаптивного і розподіленого функціонування НПМ (мережі ψ –ого рівня) з можливістю самоорганізації вузлів.

5. Здійснення користувальницької мережевої оптимізації з урахуванням QoS.

Кінцевою метою управління НПМ може бути екстремум або виконання обмежень деякого функціонала (наприклад, максимум покриття площі спостереження, мінімум потужності передачі, максимум тривалості функціонування мережі тощо) для всієї НПМ, або в зонах покриття КА між вузлом відправником та адресатом з урахуванням наявних вузлових та мережесих ресурсів.

На етапі функціонування СУ НПМ реалізує множину цілей управління, які залежать від її функцій, при умові обмежень на якість обслуговування під час інформаційного обміну (підтримка діючих маршрутів із заданим рівнем QoS), невизначеність розміщення (відсутність можливості управління місцем розташування МБС та КА) і наявних ресурсів:

$$U^*(t) = \arg \underset{U^{\psi(t) \in \Omega^{\psi}}}{opt} \Pi^{\psi}(K^{\psi}(t), U(t)),$$

$$\Pi^{\psi} = \underset{opt}{\{S^{\psi}(K), t_3^{\psi}(K), p_i^{\psi}(K), e_i^{\psi}(K), N_i^{CAP}, N_i^{МБС}\}},$$

$$K^{\psi}(t) = \left\{ N_i^{\psi}, e_i^{\psi}(t), \mathbf{G}_{\xi}^{\psi}(t), \omega^{\psi}(t), O^{\psi}(t), B^{\psi}(t), Pr_{Zab}(t), Z_{ab}(t) \right\},$$

при виконанні обмежень на множину управляючих впливів та ресурси мережі

$$\Omega = \Omega_{пер} \times \Omega_{ком} \times \Omega_{рес},$$

де $\Omega_{пер}$ – обмеження при управлінні переміщенням МБС та КА, $\Omega_{ком}$ – обмеження при управлінні комунікаційною складовою, $\Omega_{рес}$ – обмеження на ресурси мережі

$$\Omega_{пер} = \left\{ \begin{array}{l} 0 < e_i(t) \leq e_{max}, i = \overline{1, N_{НМ}^{\theta k}} \\ p_i(t) \leq p_{max} \\ Z_{ab} = 1 \\ N_i^{МБС} \leq N_i^{МБСmax}, N_i^{КА} \leq N_i^{КАmax} \\ T_{пер}^{\psi} \leq T_{доп}^{\Pi^{\psi}} \end{array} \right\},$$

$$\Omega_{ком} = \left\{ \begin{array}{l} t_3^{\xi}(m_{ij}) \leq t_{доп}^{\xi} \\ l_{ij}^{\xi}(m_{ab}) \leq l_{доп}^{\xi} \\ J_{ab} \leq J_{доп}^{\xi} \\ s_{ab}^{\xi} \leq s_{доп}^{\xi}(Z_{ab}) \\ Z_{ab} = 1 \end{array} \right\},$$

$$\Omega_{рес} = \left\{ \begin{array}{l} p_i \leq p_{пор}, \\ e_i \leq e_{imax}, \\ T_{\Phi}^{N_{НПМ}} \geq T_{min}^{N_{НПМ}} \\ T_{ріш}^{\psi} \leq T_{доп}^{\Pi^{\psi}} \end{array} \right\},$$

де Π^{ψ} – ціль управління ψ -ого рівня НПМ, що визначається параметрами стану мережі $K^{\psi}(t)$; $U^*(t)$ – оптимальний управляючий вплив ψ -ого рівня НПМ з множини $U(t)$, S – пропускна здатність, t_3 – час затримки передачі, p_i – потужність передачі i -го вузла, e_i – енергія батареї i -го вузла $T_{\Phi}^{N_{НПМ}}$ – час функціонування НПМ; $T_{пер}^{\psi}$ – час переміщення мобільного вузла мережі ψ -ого рівня НПМ, $T_{доп}^{\Pi^{\psi}}$ – допустимий час переміщення мобільного вузла мережі ψ -ого рівня НПМ для виконання цілі управління; $T_{ріш}^{\psi}$ – час прийняття рішення, $T_{рішдоп}^{\Pi^{\psi}}$ – допустиме значення часу прийняття рішення мобільного вузла мережі ψ -ого рівня НПМ для виконання цілі управління; $N_i^{CAP}, N_i^{МБС}$ – оптимальна кількість вузлів НМ та ПМ; $\omega^{\psi}(t)$ – інтенсивність зміни топології ψ -ого рівня НПМ; $\mathbf{G}_{\xi}^{\psi}(t)$ –

матриця навантаження ξ -го типу трафіку; Z_{ab} – наявність маршруту між a та b ; J_{ab} – джиттер; l_{ab}^{ξ} – кількість ретрансляцій для пари вузлів ab за маршрутом m_{ab} , a – відправник, b – адресат; N_{CAP} –

множина вузлів (КА) повітряної мережі; Pr_{Zab} – пріоритетність маршруту передачі ξ -го типу трафіку для вузлів ab ; $t_{здоп}^{\xi}$ – допустиме значення часу затримки передачі пакетів ξ -го типу трафіку, $N_{HM}^{\theta_k}$ – кількість наземних вузлів в зоні радіопокриття k -ої КА θ_k ; $O^{\psi}(t)$ – об'єм інформації; $B^{\psi}(t)$ – вимоги до безпеки інформації; $p_{пор}$ – порогове значення витрати енергії, що відповідає максимально допустимому ступеню розряду батареї вузла e_{imax} .

В загальному випадку, кожна із підсистем управління НІМ (рис. 2) забезпечує виконання взаємопов'язаних цільових функцій для виконання однойменних із підсистемами задач.



Рис.2. Система управління вузлами НІМ

Задачі синтезу топології НІМ. У [12] показано класифікація задач синтезу топології мережі FANET. В залежності від основного критерію ефективності розрізняють наступні варіанти постановки завдань синтезу топології (рис. 3):

- за критерієм мінімуму використання апаратного ресурсу – знаходження зв'язної топології з мінімальною кількістю КА при заданих обмеженнях (в якості обмежень можуть виступати пропускну здатність, час передачі пакетів тощо);
- за критерієм зв'язності (структурної надійності) – знаходження зв'язної (ν -зв'язної) топології мережі (підмережі, зони) при заданих обмеженнях;
- за критерієм часу – знаходження зв'язної топології мережі, що забезпечує мінімізацію максимальної затримки передачі повідомлень у мережі при заданих обмеженнях.

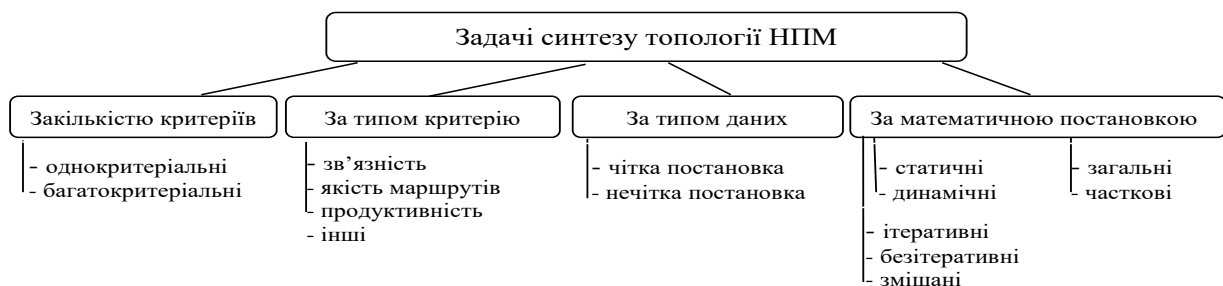


Рис.3. Задачі синтезу топології НІМ

Задачі управління маршрутизацією в НІМ. Маршрутизація в наземно-повітряних мережах є складним процесом, що охоплює ряд взаємопов'язаних завдань в умовах різного ступеню обізнаності про параметри вузлів та умови функціонування. Ключовим питанням у процесі управління маршрутизацією є вибір метрик та алгоритмів (протоколів) маршрутизації для виконання системних цільових мережевих та користувальницьких [13] функцій і побудови/підтримання маршрутів мереж наземного та повітряного рівнів, в умовах функціонування ієрархічних НІМ динамічної топології.

Задачі управління навантаженням в НІМ. Серед задач управління навантаженням в НІМ розрізняють: балансування трафіку; контроль пропускнуої здатності; керування часу затримок; контроль надійності мережі (маршруту, напрямку), Розподіл навантаження між різними вузлами або каналами зв'язку для оптимізації використання ресурсів. Прогнозування та запобігання, збоїв та відмов комунікаційного обладнання (не навмисних).

Контроль пропускнуої здатності і затримок частково відбувається тут через управління параметрами передачі сигналу на фізичному рівні. Балансування трафіку, контроль фрагментації та управління помилками – на каналному. Контроль пропускнуої здатності і затримок через механізми управління потоком – на транспортному, і програмно – на прикладному рівні.

Задачі управління безпекою в НІМ. У наземно-повітряних мережах типу MANET - FANET безпека є одним з найважливіших аспектів, що вимагає особливої уваги. До ключових задач підсистеми управління безпекою відносяться:

1. Аутентифікація та авторизація. Перевірка справжності вузлів мережі та визначення їхніх прав на доступ до ресурсів.
2. Шифрування даних. Захист інформації від несанкціонованого доступу під час її передачі.
3. Цілісність даних. Гарантія того, що дані не були змінені (замінені) або пошкоджені під час передачі.
4. Контроль надійності. Моніторинг та виявлення випадкових або цілеспрямованих збоїв в мережі.
5. Виявлення та запобігання атак. Моніторинг мережевої активності для виявлення аномалій та потенційних зловмисних дій.

Задачі управління витратами енергоресурсу в НІМ. Управління витратами енергоресурсу в наземно-повітряних мобільних мережах (НІМ) є критично важливою задачею, особливо у сценаріях, де автономність системи є ключовим фактором. До основних задач належать:

1. Задачі максимізації часу «життя» вузлів (управління режимами роботи: активний, пасивний, сон) для збереження енергії.
2. Балансування енергії вузлів, тобто перерозподіл навантаження таким чином, щоб уникнути перевантаження окремих вузлів.
3. Енергоєфективна маршрутизація (вибір маршрутів передачі на основі енергетичних характеристик вузлів).
4. Моніторинг стану енергоресурсів мережі (механізми централізованого збору та аналізу даних про залишкову ємність батарей).

Задачі управління польотом/переміщенням (позиціонування) в НІМ. Основні задачі:

1. Планування траєкторії. Визначення оптимального маршруту польоту на основі метрик мобільності (наприклад, відстань, висота, енергетичні витрати).
2. Відстеження позиціонування. Реальночасове відслідковування географічної позиції та орієнтації комунікаційних вузлів.
3. Контроль стабільності. Підтримка стабільного положення, шляхом мінімізації відхилень та помилок визначення кутів орієнтації комунікаційних вузлів під час польоту.
4. Уникнення колізій – детектування та уникнення можливих зіткнень між вузлами або з іншими об'єктами.
5. Адаптація до змінних умов – здатність до динамічної зміни маршруту або плану польоту в залежності від зовнішніх факторів (наприклад, погодні умови, динаміка руху комунікаційних вузлів наземної мережі).

Задачі підсистеми QoS - управління в НІМ. Контроль пропускнуої здатності для гарантування певного рівня обслуговування.

1. Контроль затримок передачі та джиттера в мережах із комутацією пакетів класу MANET-FANET є критично важливим.
2. Диференціація трафіку (в мережі, зоні, маршруті, каналі) за рівнями пріоритету.
3. Контроль надійності – гарантованої доставки пакетів з високим рівнем надійності, коли це необхідно (оцінка Packet Loss, Packet Delivery Ratio).
4. Моніторинг стану мережі – збір статистичних даних про якість обслуговування для подальшого аналізу та оптимізації.

Підсистема управління радіоресурсом в НІПМ. Ця підсистема відіграє ключову роль у використанні радіочастотного спектру, зокрема в умовах високої мобільності та динамічної топології мережі. Ключові задачі підсистеми:

1. Використання радіочастотного спектру – динамічне або статичне виділення радіочастотного спектру для різних вузлів та служб.
2. Мінімізація взаємних перешкод між сусідніми каналами або комунікаційними вузлами.
3. Адаптивне управління потужністю передачі для оптимізації дальності та якості зв'язку.
4. Множинний доступ до радіоресурсу з метою забезпечення узгодженого доступу для всіх вузлів з метою забезпечення якості інформаційного обміну.
5. Контроль якості зв'язку (встановлених з'єднань) за BER (Bit Error Rate), SNR (Signal-to-Noise Ratio) тощо.

В загальному випадку, управління мобільною [14] комунікаційною мережею можна поділити на етапи: етап планування, розгортання та етап оперативного управління.

Етап планування включає, в основному, ряд організаційно-технічних заходів із визначення складу сил та засобів, вихідних даних умов функціонування тощо.

Етап розгортання в класичному розумінні включає збір інформації про середовище функціонування, наявні вузлові (комунікаційні) ресурси, аналіз цілей управління, розрахунок мережевих ресурсів для прогнозування можливості забезпечення задач із інформаційного обміну із заданим рівнем якості QoS, та обґрунтування організаційно-технічних рішень щодо корегування складу основних засобів для виконання завдань, попереднього налаштування і підготовки мережі тощо.

Етап оперативного управління включає процеси із підтримання реалізації вузлових та мережевих цільових функцій [1].

Для декомпозиції задачі синтезу наземно-повітряної мережі необхідно вирішити ряд підзадач забезпечення узгодженого функціонування НКМ та ПМ на кожному із рівнів OSI, тому розглянемо більш детально, особливості функціонування мереж FANET та управління інформаційним обміном на кожному із рівнів OSI.

1. **Фізичний рівень** (Physical layer, PHY) - відповідає за передачу даних через фізичне середовище розповсюдження радіохвиль.

Так, продуктивність мережі буде значною мірою залежати від виду модуляції, зокрема, у стандарті IEEE 802.11 визначено кілька режимів передачі даних, таких як DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), крім того OFDM може використовувати різні формати модуляції, такі як BPSK, QPSK, 16-QAM або 64-QAM, для передачі даних на кожній піднесучій сигналу.

Параметри різних моделей антен можна також відноситися до фізичного рівня стандарту IEEE 802.11. Антени використовуються для передачі та прийому радіохвиль (сигналів), які використовуються для безпроводового зв'язку. У стандарті IEEE 802.11 визначено різні типи антен, які можуть використовуватися, такі як направлені (секторні) антени, їх різновиди та омні-антени (рис. 4).



Рис.4. Комунікаційні аероплатформи на безпілотних літальних апаратах обладнані:

- а) – антенами із круговою діаграмою направленості типу омні,
- б) направленими антенами

Характеристики антен, такі як коефіцієнт підсилення, напрямленість, смуга пропускання тощо, визначаються на фізичному рівні та впливають на ефективність та якість безпроводового зв'язку.

До переваг застосування омні-антен можна віднести простоту реалізації, однак серед недоліків – висока ймовірність виявлення засобами радіоелектронної розвідки (якщо застосовувати ПМ у військових цілях), та спричинення високого рівня шумів на вході приймачів інших КА не задіяних в сеансі передачі, що вимагає застосування складних механізмів фільтрації [15]. Застосування направлених антен дозволяє забезпечити кращу електромагнітну сумісність за рахунок можливості «спрямування» променя на адресата, однак ця проблема може також виникати у випадку взаємно-лінійного розташування інших КА повітряної мережі. Крім того, вирішення задач фільтрації додатково ускладнюється умовами розповсюдження радіохвиль – рівні шумів різного походження: спрямовані (спричинені засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ)), та природні (хмарність, опади, час доби та пора року) тощо.

2. **Канальний рівень** (Channel Layer, CH) - відповідає за передачу даних через сукупність каналів утворених в мережі. В літературі часто вживається термін MAC-рівень і здебільшого його процеси розглядаються сумісно із фізичним та мережевим рівнем. За своєю суттю на MAC-рівні відбувається управління доступом до каналного ресурсу мережі, тобто вважаючи на фізичні параметри прийомо-передаючого вузла, антени, особливості середовища з одного боку (фізичний рівень) та види протоколів маршрутизації, що визначають алгоритми побудови маршрутів (мережевий рівень), визначаються способи доступу до каналного ресурсу шляхом застосування спеціальних повідомлень (зондів або запитів). Отже, на каналному рівні здійснюється процедура розподіленої координації RTS/CTS/DATA/ACK пакетів. На якість каналу зв'язку сильно впливає висока мобільність вузлів і збільшення відстані між вузлами, що призводить до складності пошуку вузла адресата (особливо під час дії направлених завад), високих накладних витрат енергії на передачу повідомлень, низького рівня сигналу на прийомній стороні (зменшення SINR), збільшення коефіцієнта бітових помилок BER, збільшення коефіцієнту втрачених пакетів PL (Packet Loss), складності управління шириною діаграми направленості у випадку застосування направлених антен, і, як наслідок, збільшення часу затримки передачі пакетів в каналі. Перераховані задачі вирішуються різними способами [16-19]. Так, в [16] використання протоколу LODMAC (Location Oriented Directional MAC) дозволяє визначити і здійснювати обмін інформацією про точне місцезнаходження за рахунок використання направлених антен та розподіленого прийому службової інформації та корисної. Наприклад у [17] за зондом запитом RTS надсилається зонд - відповідь CTS і за рівнем квитанції розраховується приблизне місцезнаходження вузла адресата. Адаптивне управління потужністю передачі в каналі також можна забезпечити за рахунок рознесення прийому та передачі із застосуванням технології MIMO (Multiple Input Multiple Output [18], що дозволить натомість збільшення кількості прийомопередаючих пристроїв як у [16], можливо суттєво підвищити рівень сигналу на прийомній стороні та пропускну здатність каналу, використавши спеціальну MIMO – антену, але із відносно ускладненим процесом обробки та фільтрації сигналів. У [19] досліджено застосування розробленого Direction-MAC протоколу, що технічно реалізований з використанням шести секторних антен із «поділеною» на шість частин діаграмою направленості у горизонтальній площині, механізми обміну пакетами показано на рисунку 6.

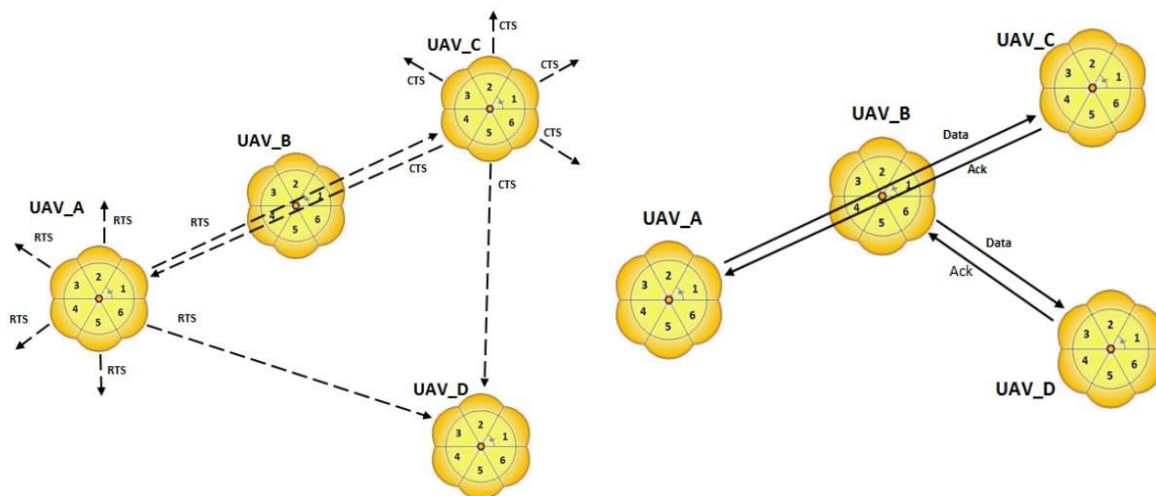


Рис.5. Механізми обміну пакетами RTS/CTS/DATA/ACK із застосуванням протоколу Direct-MAC [18]

Крім того, такий протокол як Spanning Tree Protocol (STP) часто використовуються для балансування трафіку на каналному рівні.

3. **Мережевий рівень** (Network layer). Основним завданням, що виконується за цим рівнем - маршрутизація, тобто знаходження оптимальних маршрутів із множини утворених або підготовлених каналів для передачі даних між вузлами мережі та підтримки цих маршрутів, адаптуючись до змін у топології мережі та інших умов. Маршрутизація в повітряних мережах має подібні принципи та підходи до мереж MANET, однак має свої особливості. По-перше – динамічний рух в 3D просторі, що призводить до високої інтенсивності зміни топології мережі, а відтак точності визначення однієї із ключових метрик маршрутизації (відстані до сусідніх вузлів), що може призвести до високих показників затримки передачі. По-друге – обмежена пропускна здатність каналів, особливо в умовах завад. По-третє – обмежена енергія батарей повітряних вузлів, що витрачається не тільки на інформаційний обмін а і на переміщення за цільовою траєкторією.

Класично, протоколи маршрутизації за способом побудови і підтримки маршрутів поділяються на три основні класи: проактивні, зондові (реактивні) та гібридні.

Одним із найпоширеніших є таблично-орієнтований (активний) Optimized Link State Routing (OLSR) – протокол IP-маршрутизації, оптимізований для комунікаційних мереж класу MANET, побудований на основі алгоритму Дійкстри та обміні hello-повідомленнями для отримання інформації про стан маршрутів і топологію мережі. Кожен вузол розсилає цю інформацію між сусідніми вузлами для виявлення наступного вузла в напрямку до адресата, використовуючи в якості метрики найменшу кількість ретрансляцій [20].

Переваги OLSR: відсутня затримка передачі потоків даних, пов'язана з процедурою виявлення та побудови маршрутів; витрати вузлових та мережесвих ресурсів не зростають при збільшенні кількості маршрутів передачі.

Недоліки OLSR: неможлива побудова маршрутів заданої якості обслуговування; неефективне використання енергетичних і мережесвих ресурсів при відправці службової інформації; у мережах великої розмірності вимагає відносно високої пропускної здатності радіоканалів та продуктивності вузлових процесорів.

Другим серед поширених таблично-орієнтованих протоколів маршрутизації, який базується на класичному алгоритмі Беллмана-Форда є Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV). Особливість функціонування протоколу полягає в тому, що мобільні комунікаційні вузли підтримують маршрутну таблицю до всіх можливих адресатів мережі. Кожен її вхід позначається порядковим номером, який визначається адресатом. Маршрутна інформація передається між вузлами шляхом періодичної відправки всієї маршрутної таблиці і додаткових оновлень, які передаються частіше [21].

Переваги DSDV: відсутність зациклення маршрутів; в МР з малою кількістю вузлів забезпечує миттєву побудову маршрутів передачі.

Недоліки DSDV: вимагає регулярного оновлення своїх маршрутних таблиць, що потребує використання вузлових і мережесвих ресурсів, навіть коли мережа знаходиться в режимі очікування; не підходить для радіомереж з високою динамікою зміни топології.

Серед зондових реактивних протоколів маршрутизації було розглянуто Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV).

AODV – це зондовий протокол маршрутизації, який являє собою комбінацію протоколів DSR та DSDV. Побудова та підтримання маршрутів здійснюється зондовими методами, зберігання маршрутів відповідно до таблично-орієнтованих методів. Для підтримання інформації про „нові” маршрути використовується порядкова нумерація маршрутів. Протокол використовує чотири типи повідомлень: зонд-запит, зонд-відповідь, зонд-корегування та hello-повідомлення [22].

Функціонування протоколу відбувається наступним чином. За необхідності передачі пакета вузол звертається до маршрутної таблиці за маршрутом. У випадку його відсутності передається зонд-запит усім сусіднім вузлам. Проміжні вузли, прийнявши зонд-запит і не маючи маршруту до адресата, ретранслюють його далі. Адресат, отримавши зонд-запит, формує зонд-відповідь і надсилає його відправнику, який коригує свою маршрутну таблицю і розпочинає передачу даних.

Переваги AODV: відсутність зациклення маршрутів; вирішення проблеми „кінцевого рахунку”; гарантія отримання „нових” маршрутів; підтримання багатокористувальницької маршрутизації; низька обчислювальна складність та потреба в ресурсах пам'яті.

Недоліки AODV: тривала та складна процедура встановлення з'єднання; використання hello-повідомлень, слабка адаптивність до мереж із динамічною топологією [23].

Та відповідно до [23] MAODV (Multicast AODV) можна віднести до гібридних протоколів маршрутизації, бо концептуально розроблений на основі AODV та DSDV, для використання в мережах, що складаються із великої кількості мобільних вузлів, тобто в умовах коли топологія мережі постійно змінюється.

В основі алгоритму протоколу - кожній мультікастовій групі створюється двостороннє дерево, що включає мобільні вузли двох відмінних класів. МК може бути або вузлом, який приєднався до мультікастового дерева, або вузлом, який не приєднався до мультікастової групи, але пересилає мультікастові повідомлення до інших вузлів у дереві. Для встановлення та підтримання маршрутів протокол використовує чотири різні типи повідомлень:

А) Route Request (RREQ) – використовується для запиту маршруту до певної мети. Коли вузол хоче відправити пакет до певного призначення, але не має активного маршруту до цього призначення, він ініціює процес RREQ.

Б) Route Reply (RREP) – повідомлення відповіді на RREQ. Коли вузол отримує RREQ і має активний маршрут до запитаного призначення, він відправляє RREP назад до вузла, який ініціював RREQ.

В) Multicast Activation (MACT) – використовується для активації мультікастового маршруту. Коли вузол хоче приєднатися до мультікастової групи, він відправляє MACT до лідера групи або іншого члена групи.

Г) Group Hello (GRPH) – періодичне повідомлення, яке використовується для підтримання мультікастового дерева. Воно допомагає визначити, чи активні сусідні вузли, і чи є вони частинами мультікастового дерева.

Недоліком використання MAODV – є великий об'єм службової інформації та висока обчислювальна складність оновлення маршрутної інформації.

Крім MAODV, до гібридних протоколів маршрутизації варто віднести координатні методи маршрутизації, що побудовані на базі проактивних і реактивних, однак використовують дані про місцезнаходження вузлів (через GPS, трилатерацію, триангуляцію) тощо.

Сучасним трендом у галузі маршрутизації є застосування протоколів маршрутизації на основі нейронних мереж та глибокого машинного навчання, що є по суті теж гібридними протоколами, однак будуються на основі адаптивних інтелектуальних алгоритмів вибору маршруту. У статті [24] детально показано алгоритми реалізації таких протоколів. Серед них: DQN-VR - протокол вертикальної маршрутизації на основі глибокого алгоритму навчання Q-мережі (DQN-VR); TQNGPSR – Чен та ін. запропонували протокол географічної маршрутизації на основі Q-мережі з урахуванням трафіку, яка базується на маршрутизації без збереження даних про сусідні вузли (GPSR); QGeo - Юнг та ін. – запровадили протокол географічної маршрутизації на основі Q-навчання (QGeo).

Разом з тим, до недоліків застосування інтелектуальних протоколів маршрутизації можна віднести високу обчислювальну складність, що накладає високі накладні витрати енергії батареї повітряних вузлів, проте існують математичні способи екстраполяції для прогнозування простору станів мережі для прийняття оптимальних рішень в умовах невизначеності, та апроксимації для спрощення процесу адаптації (підвищення швидкості обробки даних із збереженням точності).

4. **Транспортний рівень** (Transport Layer). Хоча FANET може використовувати стандартні протоколи транспортного рівня, такі як TCP (Transmission Control Protocol) – механізм TCP congestion control та UDP (User Datagram Protocol), існують додаткові виклики, пов'язані з динамічною природою FANET, які можуть вимагати специфічних адаптацій або нових протоколів для управління потоком. Через особливості FANET, такі як висока мобільність вузлів, змінна топологія та часто високі коефіцієнти втрати пакетів в заданих умовах, можуть з'являтися нові або адаптовані протоколи, які враховують ці виклики. Але, залежно від конкретного застосування FANET, можуть з'являтися специфічні протоколи, призначені для певних задач, таких як кооперативне або децентралізоване управління повітряною мережею. Разом з тим, можливо узагальнити деякі адаптивні версії стандартних протоколів транспортного рівня:

а) QUIC (Quick UDP Internet Connections) – сучасний протокол транспортного рівня, який забезпечує низьку затримку та високу продуктивність шляхом створення мультиплексованих

з'єднань між двома кінцевими точками, крім того протокол забезпечує шифрування та аутентифікацію даних [25].

б) SCTP (Stream Control Transmission Protocol) – протокол, який забезпечує надійну передачу даних і може враховувати множинні шляхи передачі. SCTP забезпечує контроль навантаження (управління чергами), також підтримує мультиплексоване з'єднання. Протокол може виявляти втрачені та дубльовані пакети при передачі [26].

в) TCP Vegas – протокол TCP, які адаптуються до умов мережі для оптимізації продуктивності. TCP Vegas виявляє перевантаження на початковому етапі на основі оцінки зростання значень часу затримки Round-Trip Time (RTT) пакетів у з'єднанні, на відміну від інших версій, таких як Reno, New Reno тощо, які виявляють перевантаження лише після того, як воно фактично сталося через втрату пакетів. Алгоритм сильно залежить від точного обчислення базового значення RTT. Якщо значення RTT занадто мале, алгоритм може помилково вважати, що з'єднання перевантажене, і зменшити швидкість передачі даних. Це може призвести до того, що пропускна здатність з'єднання буде меншою за доступну ширину смуги. З іншого боку, якщо значення RTT занадто велике, алгоритм може надати з'єднанню більше пропускної здатності, ніж доступна ширина смуги, що може призвести до перевищення пропускної здатності з'єднання [27].

г) CoAP (Constrained Application Protocol) – протокол, призначений для використання в обмежених мережах, таких як FANET, і може підтримувати кооперативні сценарії. CoAP використовує UDP (User Datagram Protocol) для передачі даних між двома кінцевими точками і підтримує вбудоване виявлення сервісів та ресурсів. CoAP призначений для роботи в обмежених мережах, таких як FANET, які характеризуються низькою потужністю, високою втратою пакетів та низькою пропускною здатністю. спеціалізований веб-протокол, який призначений для використання в обмежених мережах, таких як FANET (Flying Ad-hoc Networks). Основна особливість протоколу полягає в тому, що він розроблений для пристроїв з обмеженими можливостями, таких як безпроводові датчики, які мають обмежені ресурси, наприклад, 8-бітні мікроконтролери з невеликою кількістю ROM та RAM. Він підтримує, а також ключові концепції Вебу, такі як URIs (Uniform Resource Identifiers) та Internet media types. Крім того, протокол може легко інтегруватися з HTTP для забезпечення взаємодії з Вебом [28].

Разом з тим, CoAP має суттєві недоліки, що визначають напрямки подальшого удосконалення. Серед них – *обмежена надійність*: Оскільки CoAP використовує протокол UDP для передачі даних, він не гарантує доставку пакетів. Це може призвести до втрати даних у мережах з динамічною топологією.

У плані *забезпечення безпеки* CoAP підтримує шифрування, однак, він може бути менш безпечним за інші протоколи, такі як HTTPS.

5. На *прикладному рівні* (Application Layer) виконуються комплексні завдання управління якістю обслуговування, для передачі різних типів трафіку (відео, мова, дані), процесами адаптивного управління енергетичним та комунікаційним ресурсом мобільних комунікаційних вузлів, крім того, за рахунок програмного забезпечення та спеціальних алгоритмів здійснюється розподіл навантаження на різні сервери або сервіси.

Таким чином, результати дослідження показали, що процес формування рішень управління мережею НІМ є складною багатопараметричною задачею оптимізації цільових функцій [29], реалізованих комплексно на різних рівнях моделі OSI. В умовах ресурсних обмежень, завдання управління НІМ: управління топологією, маршрутизацією, навантаженням, безпекою, та якістю інформаційного обміну суттєво ускладнюється.

Висновки та перспективи подальшого дослідження.

З урахуванням концепції ієрархічної побудови мобільних радіомереж, а також особливостей функціонування повітряних комунікаційних мереж здійснено формальний опис процесу управління перспективними комунікаційними наземно-повітряними мережами.

Розкрито особливості процесу управління НІМ та особливості функціонування повітряної мережі на різних рівнях моделі OSI, та встановлено взаємозв'язки між ними для реалізації управлінських рішень кожною із підсистем управління мережею.

В результаті досліджень – встановлено, що завдання синтезу наземно-повітряних комунікаційних мереж є складною багатопараметричною оптимізаційною задачею, а процес обробки великої кількості вихідних даних може суттєво збільшити обсяг службової інформації і, відповідно, зменшити обсяг корисної.

Визначено відповідності задач процесу управління перспективними наземно-повітряними комунікаційними мережами кожному із етапів управління.

Напрямом подальших досліджень є аналіз існуючих механізмів (методів, методик і моделей) забезпечення функціонування підсистем збору контролю, обробки, зберігання даних, підсистеми формування управлінських рішень та підсистеми навчання для забезпечення виконання цільових функцій на кожному із рівнів НІПМ.

Список бібліографічного опису

1. Романюк В. А. Цільові функції оперативного управління тактичними радіомережами. *Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ»*. 2012. № 1. С. 109–117.
2. Romaniuk V. A., Bieliakov R. O. Objective control functions of FANET communication nodes of land-air network. *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION*. 2023. No. 50. P. 125–130. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2023-50-19.
3. Multipurpose UAV for search and rescue operations in mountain avalanche events / M. Silvagni et al. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2016. Vol. 8, no. 1. P. 18–33. URL: <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1238852> (date of access: 30.09.2023).
4. 3D Mapping based-on Integration of UAV Platform and Ground Surveying / M. Y. A. Sari et al. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2018. Vol. 9, no. 12. URL: <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2018.091223> (date of access: 30.09.2023).
5. Hrymud A., Romaniuk V. Modifying a method for direct data collection by a telecommunication aerial platform from nodes of wireless sensor networks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 4, no. 9(118). P. 15–29. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263559> (date of access: 30.09.2023).
6. Романюк В. А. Концепція ієрархічної побудови інтелектуальних систем управління тактичними радіомережами класу MANET. *НВЧ-техніка та телекомунікаційні технології* : Збірник тез доповідей Міжнар. кримська конф. КриМіКо. Севастополь, 2012. С. 265.
7. Madhusudan G., Kumar T. Energy Management Dynamic Control Topology In MANET. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 225. P. 012190. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/225/1/012190> (date of access: 30.09.2023).
8. Veepin Kumar, Sanjay Singla. A Performance Analysis of MANET Routing Protocols. *international journal of engineering technology and management sciences*. 2022. Vol. 6, no. 6. P. 173–180. URL: <https://doi.org/10.46647/ijetms.2022.v06i06.027> (date of access: 30.09.2023).
9. Dholey M. K., Sinha D. ACOBR: ACO Based Load Balancing Routing in MANET. *Wireless Personal Communications*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s11277-022-09804-w> (date of access: 30.09.2023).
10. Gajewski P., Łopatka J., Łubkowski P. Performance Analysis of Public Safety Cognitive Radio MANET for Diversified Traffic. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 5. P. 1927. URL: <https://doi.org/10.3390/s22051927> (date of access: 30.09.2023).
11. Gupta N., Agarwal S., Mishra D. Trajectory Design for Throughput Maximization in UAV-Assisted Communication System. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 1319–1332. URL: <https://doi.org/10.1109/tgcn.2021.3085867> (date of access: 30.09.2023).
12. ЛІТАЮЧІ САМООРГАНІЗУЮЧІ РАДІОМЕРЕЖІ / В. А. Романюк та ін. *Збірник наукових праць ВІТІ*. 2017. № 1. С. 104–114.
13. THE HIERARCHICAL MODEL OF INTERACTION BETWEEN INTELLIGENT AGENTS IN THE MANET CONTROL SYSTEMS / O. Y. Sova et al. *Information and Telecommunication Sciences*. 2015. No. 1. P. 21–28. DOI: 10.20535/2411-2976.12015.21-28.
14. Беляков Р. О., Фесенко О. Д. Модель мобільності наземної комунікаційної мережі спеціального призначення. *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION*. 2023. № 51. С. 130–138. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2023-51-17.
15. АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ АДАПТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ СИГНАЛІВ В СИСТЕМАХ РАДІОЗВ'ЯЗКУ / О. Цатурян та ін. *Збірник наукових праць ВІТІ*. 2018. № 4. С. 132–140.
16. Temel S., Bekmezci I. LODMAC: Location Oriented Directional MAC protocol for FANETs. *Computer Networks*. 2015. Vol. 83. P. 76–84. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.03.001> (date of access: 30.09.2023).
17. An adaptive directional MAC protocol for ad hoc networks using directional antennas / X. Lu et al. *Science China Information Sciences*. 2012. Vol. 55, no. 6. P. 1360–1371. URL: <https://doi.org/10.1007/s11432-012-4550-6> (date of access: 30.09.2023).
18. Reddy K. C., Devanagavi G. D., Thippeswamy M. QoS Oriented and Energy Efficient Routing Protocol for Cooperative MIMO Based Mobile WSN: Q-E2RPC. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2019. Vol. 12, no. 1. P. 212–223. URL: <https://doi.org/10.25103/jestr.121.25> (date of access: 30.09.2023).

19. On the Performance of Flying Ad-hoc Networks (FANETs) with Directional Antennas / M. A. Khan et al. 2018 5th International Multi-Topic ICT Conference (IMTIC), Jamshoro, 25–27 April 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/imtic.2018.8467274> (date of access: 30.09.2023).
20. Permatasari U. S., Widiyarsi I. R. Analisis Routing Protokol Optimized Link State Routing (OLSR) Pada Raspberry Pi. *AITI*. 2020. Vol. 16, no. 2. P. 151–164. URL: <https://doi.org/10.24246/aiti.v16i2.151-164> (date of access: 17.09.2023).
21. Kumar A., Hans R. Performance Analysis of DSDV, I-DSDV, OLSR, ZRP Proactive Routing Protocol in Mobile AdHoc Networks in IPv6. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2015. Vol. 77. P. 25–36. URL: <https://doi.org/10.14257/ijast.2015.77.03> (date of access: 17.09.2023).
22. Analysis of AODV Protocol in MANET / P. Pal et al. *International Journal of Computer Applications*. 2019. Vol. 177, no. 24. P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.5120/ijca2019919691> (date of access: 17.09.2023).
23. Singh G., Dhir V. Performance Analysis of AODV and MAODV Protocol in Mobile ADHOC Networks. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*. 2018. Vol. 6, no. 12. P. 706–712. URL: <https://doi.org/10.26438/ijcse/v6i12.706712> (date of access: 17.09.2023).
24. Topology-Based Routing Protocols and Mobility Models for Flying Ad Hoc Networks: A Contemporary Review and Future Research Directions / A. H. Wheeb et al. *Drones*. 2021. Vol. 6, no. 1. P. 9. URL: <https://doi.org/10.3390/drones6010009> (date of access: 30.09.2023).
25. Implementation of Quick UDP Internet Connections / M. Roy et al. *International Journal of Engineering and Computer Science*. 2020. Vol. 9, no. 01. P. 24921–24924. URL: <https://doi.org/10.18535/ijecs/v9i01.4425> (date of access: 30.09.2023).
26. Halepoto I. A. Evaluation of Multipath Transmission using the Stream Control Transmission Protocol. *International Journal of Computing and Network Technology*. 2017. Vol. 5, no. 3. P. 131–136. URL: <https://doi.org/10.12785/ijcnt/050305> (date of access: 30.09.2023).
27. Brakmo L. S., O'Malley S. W., Peterson L. L. TCP Vegas. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 1994. Vol. 24, no. 4. P. 24–35. URL: <https://doi.org/10.1145/190809.190317> (date of access: 30.09.2023).
28. Adoption of Constrained Application Protocol / T. Levä et al. *International Journal of Innovation in the Digital Economy*. 2016. Vol. 7, no. 1. P. 38–53. URL: <https://doi.org/10.4018/ijide.2016010104> (date of access: 30.09.2023).
29. Romaniuk V. A., Bieliakov R. O. Objective control functions of FANET communication nodes of land-air network. *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION*. 2023. No. 50. P. 125–130. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2023-50-19.

References

1. Romaniuk, V. A. (2012). Tsilovi funktsii operatyvnoho upravlinnia taktychnymy radiomerezhamy [Target functions of operational management of tactical radio networks]. *Zbirnyk naukovykh prats VIII NTUU «KPI» - Scientific works collection of MITIT NTUU "KPI"*, 1, 109–117. [in Ukrainian].
2. Romaniuk, V. A., & Bieliakov, R. O. (2023). Objective control functions of FANET communication nodes of land-air network. *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION*, (50), 125–130. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-19>.
3. Silvagni, M., Tonoli, A., Zenerino, E., & Chiaberge, M. (2016). Multipurpose UAV for search and rescue operations in mountain avalanche events. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(1), 18–33. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1238852>
4. Sari, M. Y. A., Wahid, A., Mohd, H., Razak, A., Imzan, M., M. Idris, K., Ahmad, A., & Dollah, R. (2018). 3D Mapping based-on Integration of UAV Platform and Ground Surveying. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 9(12). <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2018.091223>
5. Hrymud, A., & Romaniuk, V. (2022). Modifying a method for direct data collection by a telecommunication aerial platform from nodes of wireless sensor networks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(9(118)), 15–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263559>
6. Romaniuk, V. A. (2012). Kontseptsyia yerarkhycheskoho postroyeniya yntellektualnykh system upravleniya taktycheskymy radyosetiamy klasa MANET [The concept of hierarchical construction of intelligent management systems for tactical radio networks of the MANET class]. Proceedings from KryMyKo: *Mezhdunarodna Krymska konferentsiia «NVCh-tekhnyka ta telekommunikatsiyni tekhnolohii» - International Crimean conference «Microwave technology and telecommunication technologies»*. (P. 265). Sevastopol: KryMyKo [in Ukrainian].
7. Madhusudan, G., & Kumar, T. (2017). Energy Management Dynamic Control Topology In MANET. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 225, 012190. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/225/1/012190>
8. Veepin Kumar & Sanjay Singla. (2022). A Performance Analysis of MANET Routing Protocols. *international journal of engineering technology and management sciences*, 6(6), 173–180. <https://doi.org/10.46647/ijetms.2022.v06i06.027>
9. Dholey, M. K., & Sinha, D. (2022). ACOLBR: ACO Based Load Balancing Routing in MANET. *Wireless Personal Communications*. <https://doi.org/10.1007/s11277-022-09804-w>
10. Gajewski, P., Łopatka, J., & Łubkowski, P. (2022). Performance Analysis of Public Safety Cognitive Radio MANET for Diversified Traffic. *Sensors*, 22(5), 1927. <https://doi.org/10.3390/s22051927>
11. Gupta, N., Agarwal, S., & Mishra, D. (2021). Trajectory Design for Throughput Maximization in UAV-Assisted Communication System. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 5(3), 1319–1332. <https://doi.org/10.1109/tgcn.2021.3085867>
12. Романюк, В. А., Степаненко, С. О., Панченко, І. В., & Восколович, О. І. (2017). ЛІТАЮЧІ САМООРГАНІЗУЮЧІ РАДІОМЕРЕЖІ. *Збірник наукових праць ВІТІ*, (1), 104–114.
13. Sova, O. Y., Romanyuk, V. A., Minochkin, D. A., & Polshchikov, K. O. (2015b). THE HIERARCHICAL MODEL OF INTERACTION BETWEEN INTELLIGENT AGENTS IN THE MANET CONTROL SYSTEMS. *Information and Telecommunication Sciences*, (1), 21–28. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12015.21-28>.

14. Bieliakov, R., & Fesenko, O. (2023). Model mobilnosti nazemnoi komunikatsiinoi mrezi spetsialnoho pryznachennia [Mobility model of a special purpose terrestrial communication network]. *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION*, 51, 130–138.
15. Цатурян, О., Лебідь, Є., Беляков, Р., & Мартинюк, В. (2018). АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ АДАПТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ СИГНАЛІВ В СИСТЕМАХ РАДІОЗВ'ЯЗКУ. *Збірник наукових праць ВІТІ*, (4), 132–140.
16. Temel, S., & Bekmezci, I. (2015). LODMAC: Location Oriented Directional MAC protocol for FANETs. *Computer Networks*, 83, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.03.001>
17. Lu, X., Towsley, D., Lio, P., & Xiong, Z. (2012). An adaptive directional MAC protocol for ad hoc networks using directional antennas. *Science China Information Sciences*, 55(6), 1360–1371. <https://doi.org/10.1007/s11432-012-4550-6>
18. Reddy, K. C., Devanagavi, G. D., & Thippeswamy, M. (2019). QoS Oriented and Energy Efficient Routing Protocol for Cooperative MIMO Based Mobile WSN: Q-E2RPC. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 12(1), 212–223. <https://doi.org/10.25103/jestr.121.25>
19. Khan, M. A., Qureshi, I. M., Khan, I. U., Nasim, A., Javed, U., & Khan, W. (2018). On the Performance of Flying Ad-hoc Networks (FANETs) with Directional Antennas. *У 2018 5th International Multi-Topic ICT Conference (IMTIC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/imtic.2018.8467274>
20. Permatasari, U. S., & Widiasari, I. R. (2020). Analisis Routing Protokol Optimized Link State Routing (OLSR) Pada Raspberry Pi. *AITI*, 16(2), 151–164. <https://doi.org/10.24246/aiti.v16i2.151-164>
21. Kumar, A., & Hans, R. (2015). Performance Analysis of DSDV, I-DSDV, OLSR, ZRP Proactive Routing Protocol in Mobile AdHoc Networks in IPv6. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 77, 25–36. <https://doi.org/10.14257/ijast.2015.77.03>
22. Pal, P., Sarkar, P., Deb, S., & Bhattacharya, G. (2019). Analysis of AODV Protocol in MANET. *International Journal of Computer Applications*, 177(24), 1–6. <https://doi.org/10.5120/ijca2019919691>
23. Singh, G., & Dhir, V. (2018). Performance Analysis of AODV and MAODV Protocol in Mobile ADHOC Networks. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, 6(12), 706–712. <https://doi.org/10.26438/ijcse/v6i12.706712>
24. Wheeb, A. H., Nordin, R., Samah, A. A., Alsharif, M. H., & Khan, M. A. (2021). Topology-Based Routing Protocols and Mobility Models for Flying Ad Hoc Networks: A Contemporary Review and Future Research Directions. *Drones*, 6(1), 9. <https://doi.org/10.3390/drones6010009>
25. Roy, M., Ahsan, S., Kumar, G., & Vimal, A. (2020b). Implementation of Quick UDP Internet Connections. *International Journal of Engineering and Computer Science*, 9(01), 24921–24924. <https://doi.org/10.18535/ijecs/v9i01.4425>
26. Halepoto, I. A. (2017). Evaluation of Multipath Transmission using the Stream Control Transmission Protocol. *International Journal of Computing and Network Technology*, 5(3), 131–136. <https://doi.org/10.12785/ijcnt/050305>
27. Brakmo, L. S., O'Malley, S. W., & Peterson, L. L. (1994). TCP Vegas. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 24(4), 24–35. <https://doi.org/10.1145/190809.190317>
28. Levä, T., Ilaghi, M., Looga, V., Komu, M., Beijar, N., & Mazhelis, O. (2016). Adoption of Constrained Application Protocol. *International Journal of Innovation in the Digital Economy*, 7(1), 38–53. <https://doi.org/10.4018/ijide.2016010104>
29. Romaniuk, V.A., & Bieliakov, R. (2023). Objective control functions of FANET communication nodes of land-air network. *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION*, 50, pp. 125-130. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2023-50-19.