

## НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТАКТИЧНИХ МОБІЛЬНИХ РАДІОМЕРЕЖ

*Розглянуті основні напрями підвищення ефективності функціонування мобільних тактичних радіомереж за рівнями еталонної моделі відкритих систем, варіантами архітектур побудови вузлів та введенням додаткових функцій управління.*

*Романюк В.А. Направления повышения эффективности тактических самоорганизующихся радиосетей. Рассмотрены направления повышения эффективности функционирования самоорганизующихся радиосетей по: уровням эталонной модели взаимодействия открытых систем, различным вариантам архитектуры построения узлов сети и введением дополнительных функций управления.*

*V. Romanyuk The directions of increasing the efficiency of tactical mobile ad-hoc networks. The directions of increasing the efficiency of tactical mobile ad-hoc networks by: reference levels of the OSI model, and variations on construction architecture of network nodes and the introduction of additional control functions.*

**Ключові слова:** мобільні радіомережі, ефективність функціонування.

В останнє десятиріччя розвинуті країни світу особливу увагу приділяють створенню перспективних тактичних радіомереж. До них пред'являються наступні основні вимоги: автоматичний режим функціонування, значна пропускна здатність при різних типах трафіку, висока мобільність всіх її елементів, висока живучість, здатність швидкого розгортання (в масштабі реального часу) та відновлення роботи в умовах вогневого враження тощо. Тому в епоху мережецентричних війн при створенні перспективних тактичних мереж ключову роль будуть грати мобільні радіомережі (рис. 1) або MANET (Mobile Ad-Hoc Networks) [1 – 4]. Переваги мобільних радіомереж відомі: відсутність етапу планування (можливість самоорганізації та легкість нарощування), швидке розгортання, висока живучість, робота в русі всіх елементів мережі тощо (табл. 1).

Однак не дивлячись на багаточисельні наукові дослідження по створенню тактичних MANET та приклади реального функціонування [3 – 8] вимоги інформаційного обміну [8] в умовах сучасного бою (за пропускною здатністю, затримки передачі тощо) визначають більш жорсткі вимоги до параметрів їх функціонування.

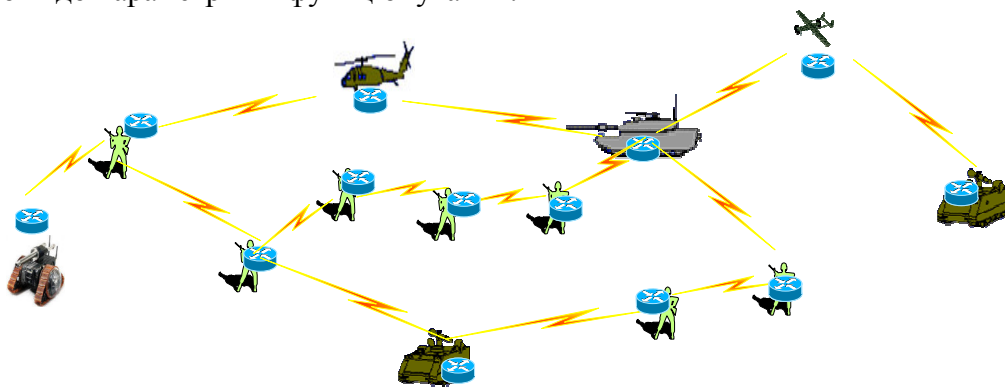


Рис. 1. Представлення MANET у вигляді радіомережі мобільних маршрутизаторів

В багатьох країнах застосування технологій MANET у тактичних радіомережах пропонується вирішувати двома шляхами: модернізації існуючих вузькосмугових радіозасобів та/або створенням сучасних широкосмугових.

При першому [7], в існуючих мережах вузькосмугового тактичного радіозв'язку (таких засобів в арміях розвинутих країн десятки тисяч) пропонується реалізувати розроблені основні алгоритми (протоколи) функціонування MANET. Так, наприклад, в США за останні десять років втричі зросла кількість тактичних радіозасобів, їх загальна пропускна здатність

збільшена на порядок (2001 рік в США – 365000 радіозасобів, 11 типів, загальна пропускна здатність 46 Мбіт/с; в 2011 році – 919000 радіозасобів, 20 типів, 9.6 Гбайт/с) [3, 4].

Таблиця 1

Переваги (недоліки)	За рахунок чого може бути досягнуто (напрямки вдосконалення, усунення недоліків), наслідки
(+)	<p>Можливість самоорганізації, швидке розгортання, нарощування, відновлення.</p> <p>Застосування алгоритмів децентралізованого управління мережею (однак це приводить до необхідності збору значного обсягу службової інформації про стан мережі кожним вузлом мережі). Функції системи управління реалізуються кожним вузлом мережі, що потребує створення відповідного математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення.</p>
(+)	<p>Висока живучість.</p> <p>Відсутність фіксованої архітектури, можливість зв'язку в русі всіх елементів мережі, децентралізований спосіб управління мережею, здатність до самоорганізації. Кожний вузол – маршрутизатор, алгоритми управління у вузлах (на всіх рівнях еталонної моделі взаємодії відкритих систем) повинні буди адаптовані до умов функціонування мережі.</p>
(+)	<p>Висока продуктивність мережі.</p> <p>За рівнями еталонної моделі взаємодії відкритих систем.</p> <p>1. <i>На фізичному рівні:</i> підвищення швидкості передачі радіоканалом (Мб/с) за рахунок зсуву діапазону частот (сотні МГц, од. ГГц); можливо використання оптичного діапазону; динамічний розподіл спектра (когнітивне радіо); завдання розподіленого призначення частот; використання спрямованих антен; еволюція OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing); застосування технології MIMO (Multiple Input Multiple Output); застосування надширокосмугових імпульсних сигналів (IR-UWB) [2] тощо.</p> <p>2. <i>На каналному рівні</i> – застосування ефективних протоколів каналного рівня (наприклад, для забезпечення якості обслуговування QoS в радіоканалі).</p> <p>3. <i>На мережевому рівні</i> – застосування ефективних протоколів мережевого рівня (наприклад, для забезпечення якості обслуговування QoS в маршрутах передачі, багато шляхової маршрутизації тощо) [2]. Необхідно введення додаткового підрівня управління топологією мережі.</p> <p>4. <i>На транспортному рівні</i> – застосування ефективних протоколів транспортного рівня.</p> <p>5. <i>На прикладному рівні</i> – координація та інтеграція рівнів еталонної моделі, застосування інтелектуальних методів управління мережею [2].</p> <p>6. Введення додаткових мережевих рівнів в архітектуру мобільної компоненти (мобільних базових станцій, безпілотних літальних апаратів, супутників) для підвищення продуктивності мережі, площі покриття).</p>
(+)	<p>Передача різних видів трафіку.</p> <p>Застосування нових протоколів каналного, мережевого та транспортного рівнів (протоколів підтримки заданої якості обслуговування).</p>
(+)	<p>Маршрутизація.</p> <p>Застосування ефективних методів маршрутизації [2].</p>
(+)	<p>Висока безпека.</p> <p>Застосування систем захисту, створення розподілених трасових центрів, систем виявлення вторгнень, використання HIP (Host Identify Protocol) тощо.</p>
(-)	<p>Значний службовий трафік.</p> <p>Зменшення службового трафіку може бути досягнуто за рахунок застосування відповідних алгоритмів (протоколів) на всіх рівнях еталонної моделі (координація роботи рівнів, інтелектуалізація системи управління мережею [2] тощо).</p>
(-)	<p>Незначна відстань безпосереднього зв'язку.</p> <p>Зв'язок в умовах прямої видимості – дальність зв'язку залежить від місцевості, частоти, потужності, типу антени тощо. Недолік усувається за рахунок маршрутизації (побудовою маршрутів з певною кількістю переприйомів) та введення в архітектуру мобільних базових станцій, безпілотних літальних апаратів маршрутизаторів.</p>
(+)	<p>Висока завадо захищеність.</p> <p>Використання широкосмугових сигналів (метод частотних стрибків – FHSS, метод прямої послідовності – DSSS), в перспективі застосування гібридних схем розподілу ресурсів (FDMA/TDMA/CDMA).</p>

При цьому беруться за увагу наступні мережеві обмеження: кількість абонентів окремих тактичних мереж обмежена (наприклад, в низовій тактичній ланці значенням 16), мобільність абонентів відносно невисока, кількість переприйомів у маршрутах передачі – не більше трьох, превалює речовий трафік, інтенсивність трафіка даних незначна (кількість даних обмежується передачею наступної інформації: координати місця знаходження, напрямом переміщення, команди управління і підтвердження виконання тощо). Робиться висновок, що застосування технологій MANET значно покращить показники функціонування цих мереж.

При іншому шляху [5] створюються широкопasmові, багатодіапазонні, високошвидкісні, програмуємі, багатоканальні (декілька прийомопередавачів), когнітивні радіозасоби. Так в [7] визначено основні вимоги до них:

- висока пропускна здатність радіоканалу ( $> 200$  Кб/с);
- багатодіапазонність (від 900 МГц до 6 ГГц) і багатofункціональність (можливість різних способів поділу радіоресурсу FDMA/TDMA/CDMA);
- здатність програмування всіх видів і режимів роботи;
- автоматизація процесів ведення зв'язку (режим „включив та працюй” – Plug-and-Play) та можливість самоорганізації мережі;
- інтелектуальність, децентралізованість й оптимізація функцій управління мережевими ресурсами (маршрутизація, навантаження, топологія, радіоресурс, безпека і т.д.);
- робота з різними видами трафіка (мова, дані, відео);
- наявність системи позиціонування, спрямованих антен, робота в русі;
- модульність виконання, відкрита архітектура, низьке енергоспоживання.

В той же час існують значні *труднощі створення мобільних радіомереж* – необхідність рішення великої кількості наукових проблем децентралізованого управління мережею (маршрутизація, розподіл радіоресурсів, управління потужністю, управління топологією, безпека передачі інформації, забезпечення заданої якості передачі інформації тощо) при обмеженнях ресурсів радіотерміналів (за ємністю пам'яті, продуктивністю процесора, енергоемністю батареї). Пропозиції щодо частини їх рішення можуть бути знайдені як в багатьох роботах зарубіжних авторів так і в монографії [2].

Аналіз останніх наукових публікацій дозволив визначити орієнтовний вигравш (в умовних одиницях) у продуктивності бездротових мереж (табл. 2) при застосуванні різних технологій або способів рішення.

Таблиця 2

Проблема	Технології (способи рішення)	Вигравш
На каналному рівні		
Збільшення пропускної здатності радіоканалів	Зсув діапазону частот (сотні МГц, одиниці ГГц),	10
	використання оптичного діапазону.	2...20
	Оптимізація використання радіоспектра. Спрямовані антени.	2...30
На мережевому рівні.		
Маршрутизація	Нові гібридні протоколи маршрутизації.	2...5
Додаткові елементи архітектури	Мобільні базові станції, безпілотні літальні апарати.	2...4
Управління ресурсами мережі	Інтелектуалізація процесу управління мережами.	3...5

Подальше використання мобільних радіомереж у військовій та цивільній сферах передбачає функціонування MANET великої розмірності мережі (мережі з 10000 або більше мобільних вузлів, діаметр і, отже, довжина маршруту може становитиме 50–100 ретрансляцій), з продуктивністю порівнянної з провідними мережами: пропускна

спроможність 1 Гбіт в секунду, затримка при передачі від відправника до одержувача менше 10 мс, і надійність доставки на рівні провідних мереж.

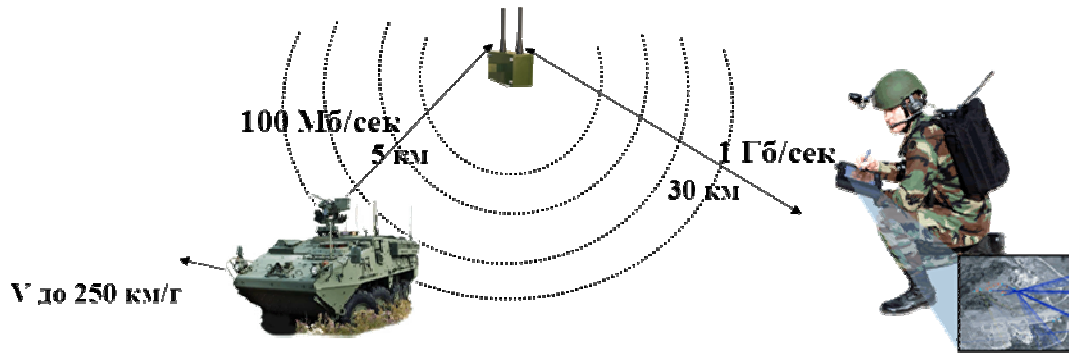


Рис. 2. Вимоги за продуктивністю перспективних тактичних мереж

Такі вимоги притаманні до майбутніх військових мереж MANET: мереж сенсорів, бойових роботів, безпілотних літальних апаратів, військовослужбовців тощо [5]. Мета – створення нових мереж MANET великої розмірності з дуже малими затримками і дуже високою пропускну здатністю. Реалізація даної ідеї вимагає вирішення ряду складних наукових задач.

Для отримання визначених показників функціонування майбутніх MANET в роботах [5 – 15] пропонуються принципово нові підходи відносно функціонування перспективних мереж. Розглянемо основні з них.

1. Ретрансляція пакетів „на льоту” [9].

Існуючий механізм передачі пакета прийняв–обробив–передав повторюються на кожному вузлі при кожній ретрансляції. Кожен пакет на всіх вузлах у маршруті проходить наступні процедури обробки (рис. 3): постановка в чергу, обробка на трьох рівнях OSI, додавання заголовків тощо, повторно постановка в чергу на мережевому і каналних рівнях, вставка нових даних у заголовки, організація доступу до каналу, з обов’язковим звітуванням (можлива і повторна передача). Це призводить до великих затримок при передачі даних по маршрут від адресата до одержувача.

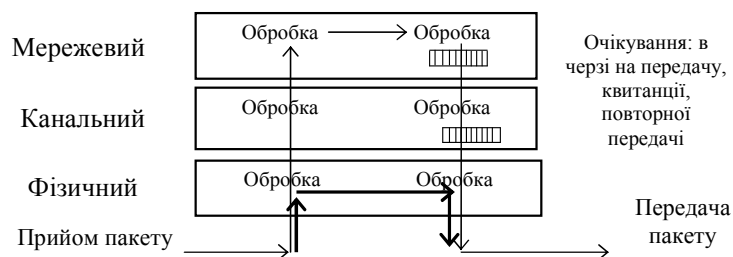


Рис. 3. Запропонована схема обробки

Ідея – зменшити час, що витрачається на обробку пакетів за рахунок ретрансляції пакетів „на льоту”. Для цього на фізичному рівні обробляється тільки заголовок пакета без втручання каналного або мережевого рівнів (за умови наявності вже побудованого маршруту). Побудова маршруту схожа з маршрутизацією за мітками технології MPLS. Наприклад, будується та позначається міткою маршрут одним з методів зондової маршрутизації. І потім кожен пакет ретранслюється тільки за позначеним маршрутом. На фізичному рівні аналізується адреса, мітка маршруту (стоять перші в заголовку). Якщо не мені, то пакет ретранслюється за маршрутом. Рішення полягає в поєднанні функцій прийому і передачі так, що перші частини пакета передаються в той час як інші частини приймаються.

Переваги очевидні, але цей підхід вимагає заздалегідь резервування ресурсу каналів у маршрутах передачі та не враховує можливість накопичення помилок в повідомленнях, що в свою чергу призведе до необхідності повторної передачі.

2. *Управління топології мережі або її зоною* [10] за рахунок введення додаткового підрівня мережевого рівня OSI (рис. 4).

Топологія мережі визначає потенційну можливість мережі з передачі потоків даних. За рахунок управління потужністю передачі та / або діаграми спрямованості антени (за її наявності) можна отримати різні топології з різною потенціальною пропускною здатністю і довжинами маршрутів передачі. Даний підрівень повинен відпрацьовувати перед підрівнем маршрутизації.

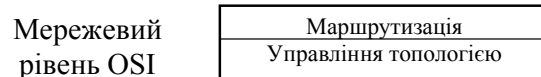


Рис. 4. Розбиття мережевого рівня OSI на підрівні

Пропонується ввести додатковий підрівень мережевого рівня моделі OSI для управління топологією мережі за рахунок зміни потужності передачі та (або) діаграми спрямованості антени. Збільшення (зменшення) потужності передачі збільшує (зменшує) кількість „сусідніх” вузлів та зменшує (додає) кількість ретрансляцій за маршрутами передачі, однак розширює (зменшує) зону взаємних завад (проблема „прихованого термінала”), тим самим зменшує (підвищує) пропускну здатність радіоканалів зони та потребує більших (менших) витрат енергії батареї вузлів. Існує певний оптимум параметрів мережі при управлінні її топологією. Методика управління топологією наведена в [10].

Пропонується введення в систему управління кожного вузла бази правил продукційного типу по управлінню топологією мережі. Умови спрацювання правил: певне взаємне розташування вузлів, рівень навантаження, кількість сусідів тощо. Рішення – збільшення (зменшення) потужності передачі або спрямованості антени.

3. *Розбиття маршруту передачі на сегменті при реалізації транспортного рівня OSI* [9].

Даний підхід дозволяє зменшити кількість перерваних сесій транспортного рівня за рахунок зменшення кількості перебудов маршрутів передачі внаслідок змін топології мережі.

Для цього необхідно прогнозувати час існування каналів в маршруті передачі та своєчасного проводити перебудову пошкодженої ділянки маршруту.

4. *Паралельна багаторазова ретрансляція пакетів з метою підвищення надійності передачі* [9].

На мережевому рівні паралельна передача пакетів може бути здійснена за рахунок багатошляхової маршрутизації, яка передбачає побудову декількох незалежних маршрутів передачі та балансування навантаження між ними [12]. Однак це приводить до значного службового трафіка. Тому ефективним є паралельна передача на фізичному рівні (*cooperative diversity*) – це майже одночасна передача однієї інформації декілька вузлами, яка когерентно складається в приймальну. Ще один спосіб реалізації – використання антенної решітки, де вузли виступають в якості елементів. Використання паралельної передачі на фізичному рівні значно покращує SNR в приймальну.

5. *Координація рівнів OSI* (рис. 3) [15].

Існуючі підходи до проектування телекомунікаційних мереж зв'язку припускають незалежність функцій управління за рівнями OSI (рис. 5). Так стікання протоколів кожного рівня працює незалежно (рис. 5a).

Однак даний підхід не враховує особливості MANET і не дозволяє забезпечити оптимізацію показників ефективності на кожному рівні OSI (або в цілому) при різних умовах функціонування мережі та вимогах конкретного типу трафіка (наприклад, відео або мови) [9].

При цьому необхідно відмитими, що досягання глобальної оптимізації при оперативному управлінні для всієї мережі неможливо внаслідок неможливості побудови відповідної моделі її функціонування, а також (що саме важливе) неможливістю зібрати в реальному часі інформацію про її стан. Тому доцільно говорити про користувальницьку оптимізацію (задоволення користувальницьких вимог) між парами відправник-адресат при мінімізації витрат мережевих ресурсів (наприклад, мінімізація службового трафіка) [9]. Тому пропонується введення надбудови над рівнями OSI, яка буде координувати управління рівнями та здійснювати цю оптимізацію.

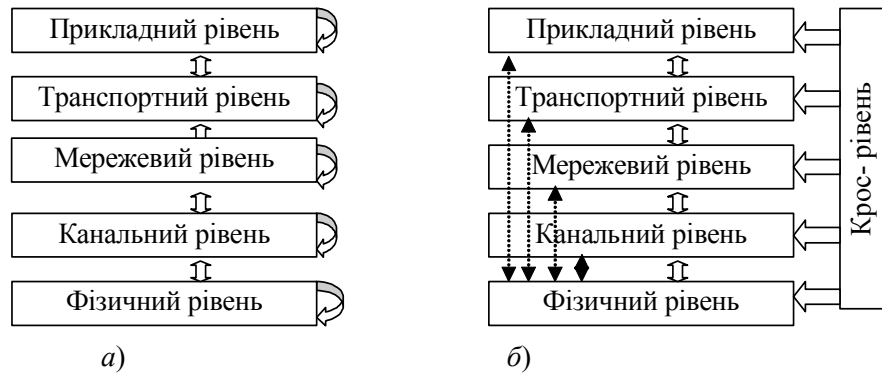


Рис. 5. Архітектура OSI (а) та координаційна (cross-level) архітектура (б)

#### 6. Інтелектуалізація управління мережею (інтелектуалізація та інтеграція рівнів OSI).

Збільшення розмірності мережі призводить до значного зростання службового трафіку (обсяг службового трафіку зростає як мінімум квадратично від розмірності мережі). Тому можливим рішенням зменшення службового трафіку є створення розумної (інтелектуальної) мережі. У MANET кожен вузол децентралізовано реалізує функції управління.

Для прийняття рішень з передачі вхідної інформації кожен вузол повинен зібрати інформацію про мережу (або її зону) і прийняти рішення по передачі всіма рівнями OSI і функцій управління: побудувати (обрати) маршрут або маршрути з безлічі наявних, визначити або вибрати алгоритм доступу до каналу, вибрати оптимальними параметри передачі на фізичному рівні: швидкість передачі, вид модуляції, довжину пакета). При цьому йому необхідно враховувати тип трафіку, завантаження, мобільність свою, зони і всієї мережі.

В умовах децентралізованого управління кожен вузол буде реалізовувати дві групи цілей: користувальницьку оптимізацію і мережеву (зонову). Користувальницька оптимізація полягає в побудові (підтримці) маршруту передачі заданої якості між відправником і адресатом відповідно до типу трафіку при прагненні мінімізувати службовий трафік (витрату ресурсів) мережі, тобто досягти мережевої оптимізації. Для цієї мети пропонується кожному вузлу координувати і погоджувати свої цілі управління з вузлами, які він задіє при прийнятті даного рішення. Для цього пропонується використовувати технологію інтелектуальних агентів.

*Прикладний рівень (міжрівнева інтеграція).* Пропонується нова парадигма побудови системи управління – ввести базу методів управління та інтелектуальну надбудову над нею (систему прийняття рішень з управління), що координує функціонування множини методів управління за рівнями OSI з метою оптимізації показників функціонування мережі (рис. 6). База методів управління  $\{MY\} = \{MY_{\phi}, MY_{\kappa}, MY_{\mu}, MY_{\tau}, MY_{\Pi}\}$  містить множину методів управління для кожного рівня OSI.

Система прийняття рішень складається з бази знань (містить знання про об'єкт управління, знання про цілі функціонування та управління, знання про способи досягнення цілей), бази дані управління, блока логічного висновку (БЛВ) і моделей ресурсів мережі [11, 15].

*Мережевий рівень* – інтелектуальна маршрутизація [13 – 14]. Пропонується, що кожен вузол має бази знань та даних по маршрутизації, які надають можливість в залежності від умов функціонування мережі приймати відповідні рішення щодо:

кількості параметрів, часу (періодичність), глибини та способів збору інформації про стан мережі або її зони;

вибору методу маршрутизації (зондового, табличного або гібридного; групового, однокористувальницького або хвильового тощо);

способу підтримки та оновлення маршруту;

способів вибору та передачі по маршруту.

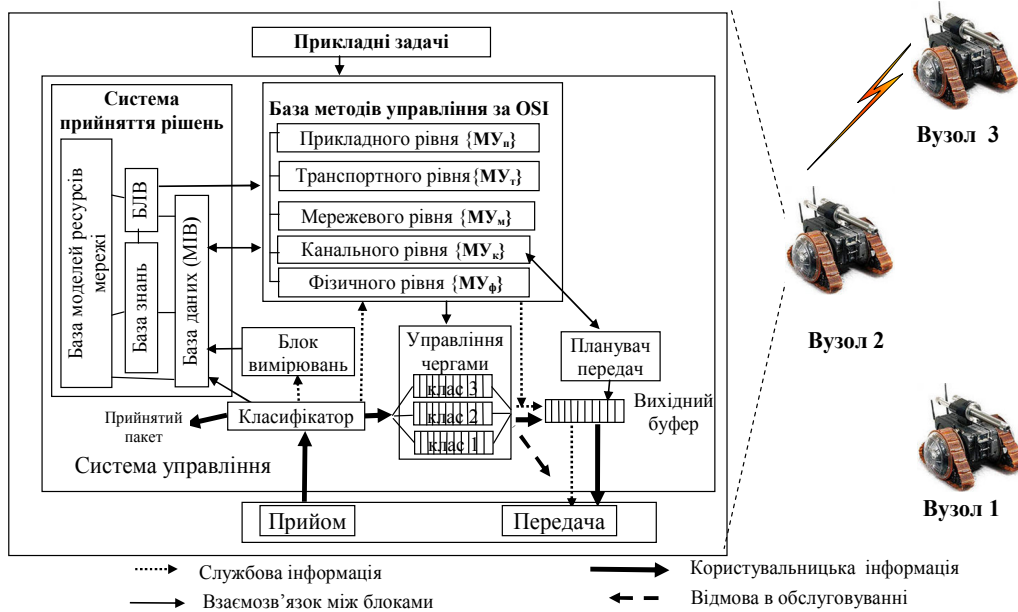


Рис. 6. Архітектура інтелектуальної системи управління (комунікаційна складова) вузла-робота мережі

Наприклад, можливо доцільно будувати маршрути, які не перетинаються (при задоволенні якості передачі даних). На рис. 7 маршрут *a-b* функціонує і споживає весь його каналний ресурс. Тому при необхідності передачі даних між вузлами *c-d* вузол *c* буде маршрут в обхід перевантаженого напрямку.

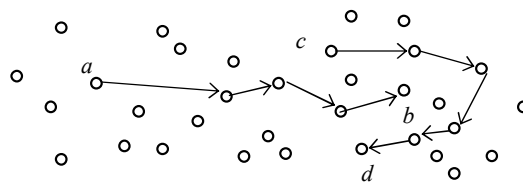


Рис. 7. Приклад побудови маршрутів, які не перетинаються

7. Узгодження цілей управління з розподілу ресурсу мережі або її зони [15].

Відмінність запропонованого підходу від існуючих – координація та інтеграція між рівнями OSI не тільки за різними параметрами, а за цілями управління, які визначають певний метод управління на кожному рівні моделі OSI.

Завдання ухвалення рішення по управлінню мережею (вибір конкретних методів управління за кожним рівнем OSI) зведена до завдання ієрархічного цільового динамічного оцінювання альтернатив при нечітких вихідних даних.

*Висновки.*

Система зв'язку тактичної ланки розвивається в напрямку застосування відкритої архітектури, створення багатоканальних, багатосмугових, програмуємих, високошвидкісних,

інтелектуальних радіозасобів, впровадження новітніх телекомунікаційних технологій MANET. Не зважаючи на критику існуючих підходів до побудови MANET військового призначення [16], застосування MANET дозволить створити транспортну основу мережецентричних способів ведення бойових дій та призведе до появи принципово нових форм (способів) ведення бойових дій.

Зростання розмірності мережі (тисячі та десятки тисяч вузлів), багатоманіття типів вузлів (сенсори, військовослужбовці, бойові роботи, бойові машини, літальні апарати тощо) та їх параметрів функціонування, наявність нових інформаційних сервісів вимагають нових апаратних, архітектурних і наукових рішень для підвищення ефективності даного класу мереж. В статті запропоновані основні підходи щодо підвищення ефективності функціонування мереж класу MANET.

В подальшому планується більш детально розглянути запропоновані підходи щодо підвищення ефективності функціонування даного класу мереж.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Романюк В.А. Еволюція тактичних радіомереж: Тези доповідей та виступів учасників VI науково-практичного семінару [„Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”] / Романюк В.А. – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”, 2011. – С. 45 – 52.
2. Самоорганізуючіся радіосети со сверхширокополосными сигналами / [С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк]. – К.: НПП „Издательство „Наукова думка” НАН Украины”. – 444 с.: ил.
3. Tactical Radios// Compendium by Armada. – August, 2012.
4. Radios // Compendium by Armada. – October 2013.
5. Redi J., Ramanathan R. The DARPA WNaN Network Architecture // In IEEE Proceeding MILCOM, 2011.
6. Li L., Lamont L. Support real-time interactive session applications over a tactical mobile ad-hoc networks // In IEEE Proceeding MILCOM, 2005.
7. Wang H., Crilly B., Zhao W., Autry C., Swank S. Implementation Mobile Ad-hoc Networks over legacy tactical radio links// In IEEE Proceeding MILCOM, 2007.
8. Suman B., Sharma S., Kumar M. Investigation communication architecture for tactical radio networks design // IJREAS Volume 2, Issue 2, 2012.
9. Ramanathan R. A Radically New Architecture for Next Generation Mobile Ad Hoc Networks // In IEEE Proceeding MOBICOM, 2005.
10. Романюк В.А. Управление топологией мобильной радиосети / Миночкин А.И., Романюк В.А. // Зв’язок. – 2003. – № 2. – С. 28 – 33.
11. Романюк В.А. Архітектура системи оперативного управління тактичними радіомережами / Романюк В.А. // Збірник наукових праць № 3. – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2009. – С. 70 – 76.
12. Романюк В.А. Многопутевая маршрутизация в мобильных радиосетях / Миночкин А.И., Романюк В.А. // Зв’язок. – 2004. – № 6.
13. Романюк В.А. Маршрутизация в мобильных радиосетях – проблема и пути решения / Миночкин А.И., Романюк В.А. // Зв’язок. – 2006. – № 7. – С. 49 – 55.
14. Романюк В.А. Интеллектуальная маршрутизация в мобильных радиосетях (MANET) / Романюк В.А., Шацко П.В., Сова О.Я. // Зв’язок. – 2011. – № 2(94). – С. 24 – 31.
15. Романюк В.А. Цільові функції оперативного управління тактичними радіомережами / Романюк В.А. // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2012. – № 1. – С. 109 – 117.
16. Krishnan R., Zhang Z. Mobile Ad-hoc Networking (MANET) Formulation Considered Harmful (Invited Paper) // In IEEE Proceeding MILCOM, 2013.