

## НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МОБІЛЬНИХ РАДІОМЕРЕЖ З НАПРАВЛЕНИМИ АНТЕНАМИ В УМОВАХ НАВМИСНИХ ЗАВАД

Радіомережі класу MANET (далі – мобільні радіомережі, МР) знаходять все ширшого застосування для організації тактичного військового радіозв'язку в останні роки.

Перспективним напрямком підвищення ефективності функціонування МР в цілому та їх завадозахищеності зокрема є застосування антенних решіток (АР) з можливістю управління напрямком основного випромінювання, що дозволяє забезпечити максимальні значення рівнів сигналів кореспондентів на входах приймачів окремих радіостанцій на маршруті передачі інформації. Для забезпечення максимальної ефективності таких МР необхідне скоординоване управління параметрами мережі на різних рівнях еталонної моделі взаємодії відкритих систем (OSI).

Зокрема, на фізичному рівні необхідно обрати тип антенної решітки та її раціональні параметри, передбачити ефективні методи управління діаграмою направленості, на каналному рівні необхідно врахувати особливості роботи у направленому режимі та розробити алгоритми доступу до спільного радіоканалу, на мережевому – врахувати особливості діаграмоутворення та вплив навмисних завад при визначенні маршрутів передачі інформації у мережі, на прикладному – забезпечити координацію та інтеграцію нижніх рівнів, інтелектуалізацію методів управління мережею.

У статті проведено аналіз завдань, що виникають у МР з направленими антенами з урахуванням можливого впливу навмисних завад та запропоновано перспективні напрямки їх вирішення.

**Ключові слова:** мобільна радіомережа, антенна решітка, відношення сигнал/завада, множинний доступ, діаграмоутворення, маршрутизація, навмисна завада.

**Гурський Т.Г., Боголій С.М., Коваль О.М., Чорний І.В. Направления повышения эффективности функционирования мобильных радиосетей с направленными антеннами в условиях преднамеренных помех.** Радиосети класса MANET (далее – мобильные радиосети, МР) находят все более широкое применение для организации тактической военной радиосвязи в последние годы.

Перспективным направлением повышения эффективности функционирования МР в целом и их помехозащищенности в частности является применение антенных решеток (АР) с возможностью управления направлением основного излучения, позволяющее обеспечить максимальные значения уровней сигналов корреспондентов на входах приемников отдельных радиостанций на маршруте передачи информации. Для обеспечения максимальной эффективности таких МР необходимо скоординированное управление параметрами сети на различных уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем (OSI).

В частности, на физическом уровне необходимо выбрать тип антенной решетки и ее рациональные параметры, предусмотреть эффективные методы управления диаграммой направленности, на каналном уровне необходимо учесть особенности работы в направленном режиме и разработать алгоритмы доступа к общему радиоканалу, на сетевом – учесть особенности диаграммообразования и влияние преднамеренных помех при определении маршрутов передачи информации в сети, на прикладном – обеспечить координацию и интеграцию нижних уровней, интеллектуализацию методов управления сетью.

В статье проведен анализ задач, возникающих в МР с направленными антеннами с учетом возможного влияния преднамеренных помех и предложены перспективные направления их решения.

**Ключевые слова:** мобильная радиосеть, антенная решетка, отношение сигнал/помеха, множественный доступ, диаграммообразование, маршрутизация, преднамеренная помеха.

**T. Hurskyi, S. Boholii, O. Koval, I. Chornyi. Directions for improving the efficiency of functioning of mobile radio networks with directed antennas in conditions of jamming.** Mobile ad-hoc networks (MANETs) are increasingly used for tactical military radio communications in recent years.

A promising way to increase the efficiency of MANETs in general and their anti-jammingness in particular is the use of antenna arrays (AR) with the ability to control the direction of the main radiation, which allows to ensure maximum values of signal levels at the inputs of individual radios. To ensure the maximum efficiency of such MANETs, coordinated management of network parameters at different levels of the reference model of open systems interaction (OSI) model is required.

In particular, at the physical level it is necessary to choose the type of antenna array and its rational parameters, to provide effective methods of beamforming, at the channel level it is necessary to take into account the features of directional mode and develop algorithms for access to a common radio channel, at the network level – to take into

*account the features of beamforming and the influence of jamming in determining the routes of information transmission in the network, on the application level – to ensure the coordination and integration of lower levels, the intellectualization of network management methods.*

*The article analyzes the problems that arise in MANETs with directional antennas, taking into account the possible impact of jamming and suggests promising areas for their solution.*

**Keywords:** *mobile ad-hoc networks (MANETs), antenna array, signal-to-noise ratio, multiple access, beamforming, routing, jamming.*

### **Постановка завдання в загальному вигляді**

В останні роки радіозв'язок в тактичній ланці управління військами все більше організовується у вигляді мобільних радіомереж класу MANET – Mobile Ad Hoc Networks [1, 2] (далі – МР). Такі мережі мають низку суттєвих переваг, як порівняно з традиційними військовими симплексними (напівдуплексними) радіомережами, так і порівняно з стільниковими та транкінговими мережами загального користування: децентралізоване управління, відсутність фіксованої інфраструктури, мобільність усіх вузлів мережі, можливість багатократної ретрансляції інформаційних повідомлень на шляху від відправника до отримувача тощо [3].

Перспективним напрямком підвищення ефективності функціонування тактичних МР, є застосування направлених антен – адаптивних антенних решіток або антенних систем з управлінням направленістю випромінювання. Використання направлених антен призводить до необхідності комплексного вирішення низки додаткових завдань на різних рівнях моделі OSI, зокрема фізичному, мережевому, каналному, транспортному та прикладному. При цьому необхідно враховувати можливий вплив навмисних завад, створюваних системою радіоелектронного подавлення (РЕП) противника.

### **Аналіз публікацій за темою дослідження**

У роботі [4] узагальнено напрямки підвищення ефективності функціонування традиційних (з ненаправленими антенами) тактичних мобільних радіомереж, серед яких виділено і застосування направлених антен.

Дослідженню функціонування МР з направленими антенами присвячена низка робіт зарубіжних та вітчизняних авторів.

Зокрема, у роботі [5] проведено аналіз ефективності методів формування діаграми спрямованості антенних решіток для мобільних радіомереж. Але методи, розглянуті в [5], забезпечують ефективну роботу МР в умовах низьких шумів в каналі зв'язку та малоефективні в умовах потужних завад.

В роботі [6] розглянуто методи адаптивного діаграмоутворення для підвищення завадозахищеності прийому, але у загальному вигляді, без урахування особливостей функціонування мобільних радіомереж. Крім цього, методи, розглянуті в [5, 6] мають достатньо високу обчислювальну складність.

В роботі [7] показано ефективність адаптивного формування нулів діаграми направленості адаптивної АР в МР в умовах навмисних завад, але не наведено рекомендацій щодо реалізації алгоритму діаграмоутворення.

Застосування направлених антен призводить до необхідності розробки нових методів доступу до радіоканалу. У роботі [8] узагальнено близько 40 варіантів реалізації протоколів МД для МР з направленими антенами, відомих з відкритих джерел, проведено їх класифікацію, визначено переваги та недоліки (табл. 1). Більшість з них ґрунтуються на протоколі випадкового доступу IEEE 802.11 DCF. Крім цього, заслуговують на увагу і детерміновані протоколи з наданням доступу за розкладом, які можуть бути забезпечити більшу ефективність за певних умов. Очевидно, що не існує єдиного методу доступу, що забезпечує ефективне функціонування мережі в різних умовах [9].

На мережевому рівні урахування як характеристик направленості антен на прийомі, так і впливу засобів РЕП, може дозволити досягнути високої завадозахищеності радіомережі в цілому за рахунок формування обхідних маршрутів передачі інформації від відправників до адресатів.

У статті [10] вироблено підхід з урахуванням вимог різних рівнів моделі OSI для розробки протоколу маршрутизації у мережах класу MANET з направленими антенами, який одночасно враховує взаємодію мережевого та MAC-підрівня каналного рівня.

В [11] запропоновано метод координатної маршрутизації для МР з направленими антенами, який враховує особливості їх функціонування та встановлює набір правил формування запитів на побудову маршрутів.

У роботі [12] запропоновано розбивати маршрут передачі на сегменти, що дозволило зменшити кількість перерваних серій транспортного рівня за рахунок зменшення кількості перебудов маршрутів передачі внаслідок змін топології мережі.

У статті [4] запропоновано новий підхід до побудови системи управління МР на прикладному рівні, що полягає у введенні бази методів управління та інтелектуальної надбудови – системи прийняття рішень з управління, що координує функціонування множини методів управління за рівнями моделі OSI з метою оптимізації показників функціонування мережі.

У той же час, відсутні роботи, у яких систематизовані завдання по управлінню параметрами мобільної мережі з направленими антенами на різних рівнях моделі OSI в умовах навмисних завдань та запропоновані напрямки їх вирішення.

Тому метою статті є аналіз завдань, що виникають при реалізації мобільних військових радіомереж з антенними решітками з керованою направленістю випромінювання в умовах постановки навмисних завдань, та визначення перспективних напрямків для їх вирішення.

### Виклад основного матеріалу

#### Вибір типу направленої антени.

Адаптивною антеною, яку порівняно просто реалізувати на практиці у військових тактичних МР, є антенні системи з комутацією променя (з керуванням напрямком основного випромінювання), а саме лінійні антенні решітки (АР), в яких випромінюючі елементи розташовані уздовж прямої на рівних відстанях один від одного, або антенні решітки з круговим розташуванням випромінюючих елементів. Відомо [13], що в порівнянні з лінійними АР, антенні решітки з круговим розташуванням випромінюючих елементів при рівному їх числі  $N$  забезпечують вужчу ширину основного пелюстка діаграми спрямованості (ДС) на рівні половинної потужності і однакову ширину ДС по усім напрямкам в азимутальній площині.

Нехай центр кола, на якому розташовуються елементи КАР, співпадає з центром сферичної системи координат (рис. 1). Якщо  $\vec{R}(A)$  – радіус-вектор точки спостереження  $A$ , то його кутові координати визначаються кутами  $\theta$  і  $\varphi$ , де  $\theta \in [0, \pi)$  – відкладається від осі  $OZ$  у вертикальній площині,  $\varphi \in [0, 2\pi)$  – відкладається від осі  $Ox$  в горизонтальній (азимутальній) площині.

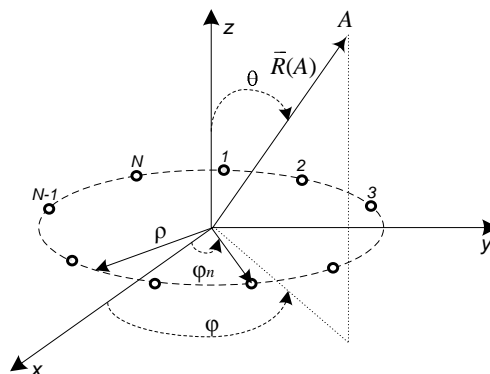


Рис. 1. Антенна решітка з круговим розташуванням випромінюючих елементів

Якщо усі радіостанції МР розташовані в горизонтальній площині, то  $\theta = \theta_0 = 90^\circ$ .

Відомо [13], що характеристика направленості кругових АР має наступні особливості:  
 форма ДН КАР змінюється в залежності від  $\varphi_0$ , проте, при значеннях  $\varphi_0$ , кратних кількості елементів решітки  $N$ , вона повторюється;

антенні решітки з круговим розташуванням випромінюючих елементів забезпечують однакову ширину ДН по усіх напрямках в азимутальній площині;

зі збільшенням числа випромінюючих елементів  $N$  значення КНД  $D(\varphi_0, \varphi)$  в напрямі максимуму ДН  $\varphi_0$  збільшується, а ширина ДС на рівні половинної потужності  $2\Delta\varphi_{0,5}$  зменшується;

зі збільшенням радіуса КАР  $\rho$  зменшується ширина головного пелюстка ДН і збільшується, відповідно, значення КНД, але при цьому зростає і рівень бічних пелюстків.

Зовнішній вигляд ДН типової КАР наведено на рис. 2.

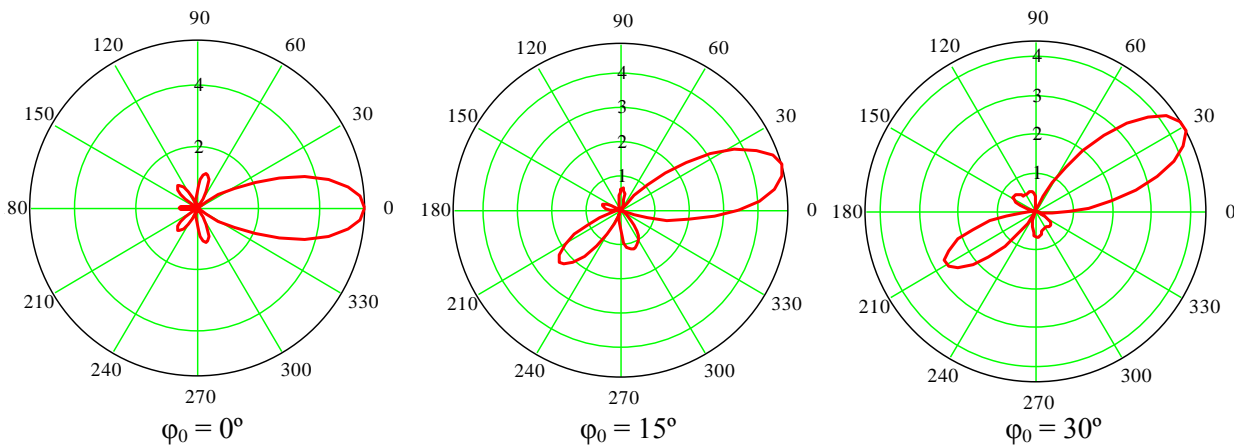


Рис. 2. Вигляд ДН КАР з  $N = 6$ ,  $\rho = \lambda/2$

Очевидно, що при використанні направлених антен для забезпечення максимального підсилення на передавальному та приймальному боці радіолінії, або максимального відношення сигнал/шум+завада (ВСШЗ), кореспонденти повинні знати кутове розташування один одного та джерел завад.

*Визначення просторового напрямку на кореспондентів (або їхніх координат) та постановників завад.*

Існує два основних способи визначення розташування сусідніх радіостанцій:

з використанням геоінформаційних даних систем супутникового позиціонування;

на основі процедур математичної обробки комплексного вектору просторово-часових відліків сигналу на виходах аналого-цифрового перетворювача адаптивної антенної решітки (дозволяє визначити напрямок на джерело сигналу) [14].

У першому випадку радіостанції повинні бути оснащені вбудованим GPS-приймачем та періодично повідомляти сусідам власні координати шляхом розсилки GPS-звітів. Під сусідніми будемо розуміти радіостанції, з якими забезпечується радіовидимість.

Механізм розсилки інформації про власне місцезнаходження потребує окремої розробки. Його можна реалізувати з використанням ненаправлених антен на передачу та прийом у визначені моменти часу, або з почерговою передачею радіостанцією з направленою антеною у напрямку на окремих кореспондентів (груп кореспондентів) з ненаправленими антенами, або шляхом чіткого орієнтування антен кореспондентів одна на одну (за останніми даними).

У той же час, доцільно періодично перевіряти коректність отриманих даних за допомогою другого способу, оскільки засоби РЕБ противника можуть або подавлювати канали прийому сигналів геопозиціонування, або передавати спотворені координати. Наявність у радіозасобах кругових антенних решіток дозволяє використовувати їх, у разі

необхідності, у якості пеленгатора для визначення просторового напрямку на джерело радіовипромінювання (ДРВ) [14].

До складу системи управління кожної радіостанції (системи управління радіомережею) повинна входити підсистема завадозахисту [15], яка вирішує завдання збору інформації про систему радіоелектронного подавлення (РЕП) противника, ідентифікації поточної стратегії системи РЕП та управління засобами завадозахисту з метою забезпечення заданих показників функціонування в умовах активної радіоелектронної протидії.

Визначення просторових координат постановників завад також необхідно реалізувати другим способом. Крім цього, для визначення точних координат ДРВ методом триангуляції можуть бути використані декілька радіостанцій. Отримувати дані про координати засобів РЕП противника та їх характеристики можна і від власної системи радіоелектронної розвідки у єдиному інформаційному середовищі поля бою, створюваному програмно-апаратними засобами автоматизованого управління військами.

*Забезпечення просторової фільтрації завад на вході приймача.*

Використання АР дозволяє в умовах впливу навмисних завад здійснювати їх просторову фільтрацію за рахунок орієнтації провалів ДН у напрямку на їх джерело.

Зменшення рівня завади на вході приймача можна досягнути зміною кута орієнтації приймальної антени  $\varphi_0$  так, щоб зменшити коефіцієнт підсилення у напрямку її приходу. На рис. 3 показано приклад, коли завада потрапляла у бічний пелюсток приймальної антени, а поворот на кут  $\Delta\varphi_{12} = \varphi_{12} - \varphi'_{12}$  призвів до значного зменшення коефіцієнта підсилення у напрямку завади. У той же час, коефіцієнт підсилення у напрямку приходу корисного сигналу також дещо зменшився.

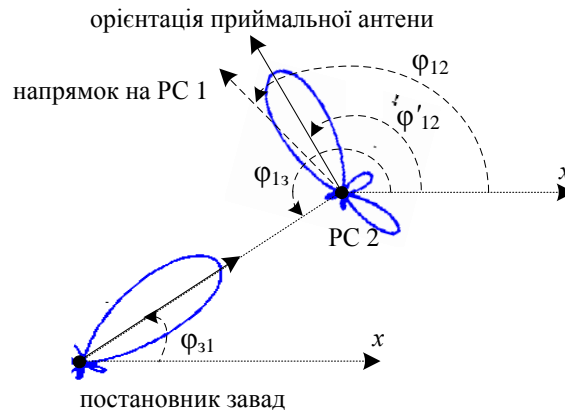


Рис. 3. Подавлення завад за рахунок просторової фільтрації у приймальній антені

Рівні корисного сигналу та завади оцінюються на вході приймача кожної радіостанції МР. Відношення сигнал/(шум + завада) визначається як різниця рівнів потужності сигналу та завад на вході приймача радіостанції:

$$SINR = P_c - P_3. \quad (3)$$

Завдання визначення необхідного (оптимального) кута орієнтації ДН КАР  $\varphi_0$  та радіуса решітки для зв'язку з певним кореспондентом мережі зводиться до вибору найкращого варіанта із множини допустимих, при якому забезпечується максимальне відношення сигнал/(шум + завада) (ВСШЗ).

При цьому параметрами, значення яких можуть змінюватися для досягнення максимального значення ВСШЗ на етапі оперативного управління, є кут орієнтації  $\varphi_0$  (напрямок максимального випромінювання) антени та електричний радіус решітки  $\rho$ , який можна змінювати шляхом зміни робочої частоти. Зміна цих параметрів впливає на величини коефіцієнтів підсилення у напрямках приходу корисного сигналу  $G_{ci}$  та завади  $G_{zi}$ .

Враховуючи те, що форма ДН КАР змінюється в залежності від напрямку основного випромінювання  $\varphi_0$ , антенна система повинна бути обладнаною системою автоматичного підстроювання антени, завданням якої є забезпечення однакового розташування випромінюючих елементів відносно початку координат (наприклад, напрямом прямої, яка з'єднує центр решітки з випромінюючим елементом № 1 завжди відповідає  $\varphi_0 = 0^\circ$  у прийнятій полярній системі координат).

У роботі [16] запропоновано методику адаптивного діаграмоутворення у МР з направленими антенами, однак вона не узгоджена з верхніми рівнями моделі OSI.

Таким чином, при використанні МР з КАР важливим завданням є розробка алгоритмів управління їх діаграмою направленості з урахуванням впливу навмисних завад.

*Множинний доступ у МР з направленими антенами.*

Одним із основних завдань, які необхідно вирішувати при розробці та експлуатації МР є забезпечення ефективного множинного доступу багатьох користувачів до спільного радіоканалу. Цей підрівень каналного рівня OSI називається MAC-рівнем (Medium Access Control). Нераціональна організація колективного доступу до радіоканалу може суттєво знизити швидкість транспортування пакетів по мережі, або і взагалі заблокувати її роботу незалежно від якості функціонування системи на інших рівнях моделі OSI [3].

Застосування направлених антен може дозволити значно збільшити коефіцієнт повторного використання каналу (використовувати один і той самий частотно-часовий ресурс за рахунок просторового ущільнення – SDMA).

Тому важливим та актуальним завданням є розробка (удосконалення) методів множинного доступу з урахуванням особливостей функціонування мобільних радіомереж з направленими антенами.

Випадковий МД (за прикладом протоколу IEEE 802.11 на базі CSMA/CA) передбачає конкуренцію вузлів мережі за доступ до спільного радіоканалу згідно встановлених протоколом правил. Зокрема, перед встановленням з'єднання вузол відправляє запит RTS (request to send), у випадку готовності до прийому отримувач відповідає сигналом CTS (clear to send). Детермінований МД (за розкладом) надає кожному вузлу МР виділений каналний ресурс для оповіщення сусідніх радіостанцій про використання інформаційного каналу. Комбінований МД може мати фази як конкурентного, так і детермінованого доступу.

До недоліків прихованих та засвічених терміналів [3] у МР з направленими антенами додаються глухота, блокування черги пакетів, неефективне використання дальності зв'язку, захоплення MAC-рівня [8] тощо. Тому у МР з направленими традиційні методи множинного доступу (МД), які були розроблені для МР з ненаправленими антенами виявляються неефективними [8]. Удосконалення існуючих методів МД та розробка більш ефективних нових є об'єктом інтенсивних теоретичних досліджень протягом останніх двох десятиліть. На даний час створено низку протоколів для МР з направленими антенами (табл. 1), але не існує єдиного універсального протоколу, який забезпечує однаково високу ефективність множинного доступу у різних умовах [8, 9].

*Фонтанні коди.* На каналному рівні додатково до традиційних методів завадостійкого кодування доцільно застосовувати відносно новий клас фонтанних кодів [17], розроблених для застосування саме у пакетних мережах. Фонтанні коди перетворюють інформацію на передачі його у деяку кількість закодованих блоків, розмір яких перевищує розмір вихідної інформації. Маючи деяку підмножину цих блоків на прийомі можна відновити вихідну інформацію, за умови, що розмір цієї підмножини дещо перевищує розмір вихідної інформації.

*Маршрутизація у МР з направленими антенами.*

Сьогодні в науковій літературі розглядається значна кількість методів та протоколів маршрутизації, які розраховані для радіомереж з різною мобільністю вузлів, швидкістю передачі інформації між вузлами, передбачають різні алгоритми управління навантаженням у радіомережі та управління затримкою передачі пакетів з даними.

## Порівняння різних типів MAC-протоколів для МР з направленими антенами

Тип	Характеристика	Переваги	Недоліки
Спосіб передачі RTS	Всенаправлена	Сусідні вузли оповіщені про майбутнє з'єднання Зменшуються проблеми глухоти та прихованих терміналів	Низьке повторне просторове ущільнення каналу Менша дальність зв'язку
	Однонаправлена	Збільшується повторне просторове ущільнення Збільшується дальність зв'язку (або зменшується потужність передачі)	Зростає вплив глухоти та прихованих терміналів Інформація про напрямок на кореспондента необхідна апіорі
	Багатонаправлена послідовна (за рахунок повороту ДН)	Усуває проблему різниці в коефіцієнтах підсилення у направленому та всенаправленому режимах Значно зменшуються випадки глухоти	Великий обсяг службової інформації (RTS/CTS) Велика затримка
	Багатонаправлена паралельна (багатопелюсткова ДН)	Зменшуються випадки глухоти та прихованих терміналів, просторове ущільнення залишається високим	Вимагає складних антенних систем
Тони	Використання спеціальних сигналів (тонів) на виділених частотах	Вирішує проблему прихованих терміналів Зменшує проблему глухоти	Вимагає ускладнення обладнання Зазвичай необхідний виділений канал управління
Синхронний доступ за розкладом	З глобальною синхронізацією	Вирішує більшість проблем за рахунок детермінованого доступу	Складність реалізації на практиці
	З локальною синхронізацією	Просте формування безконфліктних графіків доступу	Мала дальність зв'язку Складно забезпечити зв'язок між вузлами з різних зон синхронізації
Прослуховування несучої в режимі чергового прийому (Idle)	Всенаправлене	В режимі Idle ефект глухоти відсутній	Неможливо досягти максимально можливої дальності зв'язку Проблема засвіченої станції (захоплення MAC-рівня)
	Направлене	Досягнення максимально можливої дальності зв'язку	Збільшуються прояви глухоти
Механізм очікування (Backoff)	BEB (binary exponential backoff)	Дуже поширений (стандарт IEEE 802.11)	Збільшує наслідки глухоти та блокування черги пакетів
	Постійний розмір змагального вікна (CW)	Зменшує наслідки глухоти та блокування черги	Збільшує ймовірність колізій і може призвести до зациклювання
	Опортуністичний	Зводить до мінімуму вплив глухоти та блокування черги	Ефективний при інтенсивному навантаженні в мережі
Тип антенної системи	З комутацією ДН (або вибором сектора)	Простота	Менша гнучкість, менший коефіцієнт підсилення Гірше працює в умовах багатопроменевості
	Адаптивна антенна решітка	Забезпечує максимальний коефіцієнт підсилення і ослаблення у напрямку джерел завад	Висока складність і більш високе енергоспоживання

Відповідно до запропонованої вище класифікації, за способом побудови і підтримання маршрутів методи маршрутизації діляться на три класи – таблицно-орієнтовані, зондові та гібридні [3], кожен з яких має свої переваги і недоліки. Вибір конкретного методу маршрутизації (ММ) буде залежати від умов функціонування МР (спосіб організації і

розмірність радіомережі, мобільність вузлів) та вимог до передачі того чи іншого типу трафіка.

Для МР з КАР, враховуючи необхідність забезпечити знання кожним вузлом мережі координат (або просторового напрямку) сусідніх вузлів, найбільш перспективним є застосування методів координатної маршрутизації [3], основною перевагою яких порівняно з методами, що не використовують координатну інформацію, є значне зменшення обсягу службового трафіку.

При розробці методу КМ для МР з КАР необхідно вирішити наступні завдання збір інформації про стан мережі, зберігання маршрутів, обчислення маршруту передачі пакету (визначення правил вибору одного чи декількох вузлів-ретрансляторів).

Реалізація збору інформації про стан мережі можлива хвильовим, зондовим або проактивним способами, а також гібридним, який передбачає, що кожен вузол мережі збирає інформацію про координати сусідніх вузлів на глибину маршрутної зони  $R_{мз}$  проактивно, а за її межами – зондовим способом [18]. Вибір конкретного способу може залежати від розмірності мережі, вимог до величини затримок при побудові маршруту тощо.

Зберігання маршрутів при координатній маршрутизації передбачає підтримання кожним вузлом таблиці місцезнаходження сусідніх вузлів наступного формату: ідентифікатор адресата  $j$ , його координати  $(x, y, z)_j$ , швидкість  $v_j$ , напрямок переміщення  $\gamma_j$ , час оновлення даної інформації  $t_j$ . Крім цього, необхідно обрати спосіб зберігання інформації про місцеположення – автономний (кожен вузол ініціює процес збору інформації про стан мережі та зберігає у своїй маршрутній таблиці) або розподілений (передбачає призначення деяких вузлів домашніми агентами, які відповідають за зберігання інформації про місцезнаходження тих чи інших вузлів).

Вибір ретранслятора полягає у визначенні напрямку пошуку адресата та визначенні розмірів зони його передбачуваного знаходження. Обчислення маршруту може бути реалізовано декількома способами [3]: випадково з обмеженням вибору за певними правилами (наприклад, у прямокутній області певного розміру), або фіксований вибір ретрансляторів. У роботі [11] проведено порівняння декількох варіантів реалізації протоколу LAR (Location Aided Routing) для МР з направленими антенами за формою зони запиту: прямокутна зі змінними розмірами, у формі краплі, трикутна, еліпсоїдальна. Для прийнятої топології мережі встановлено, що при низькій щільності розташування вузлів на місцевості усі варіанти приблизно однакові за ефективністю (кількістю необхідної службової інформації для функціонування протоколу), у той же час, при збільшенні щільності вузлів найменшої кількості службових заголовків потребує спосіб із зоною запиту у формі краплі.

Застосування КАР потребує, також, урахування даних про систему РЕП противника, прогнозування змін сигнальної та заводової обстановки з урахуванням даних про переміщення вузлів мережі один відносно одного та постановників завод.

При зміні координат на деяку величину  $\Delta X$   $j$ -го вузла (або постановника завод відносно нього) рівень сигналу  $i$ -го вузла ( $i = 1, \dots, n$ , де  $n$  – кількість вузлів у зоні радіовидимості вузла  $j$ ) на вході приймача  $j$ -го вузла  $P_{ij}$  при взаємній орієнтації антен одна на одну зміниться незначно, у той же час, оскільки форма ДН КАР (інтенсивність та напрямки бічних та заднього пелюстків) суттєво залежить від напрямку основного випромінювання, рівень завади  $P_{zj}$  на вході приймача може суттєво зрости, порівняно з попереднім положенням. Відповідно, ВСШЗ на вході приймача  $j$ -го вузла стане значно меншим. Враховуючи те, що сусідніх вузлів у  $j$ -го вузла може бути декілька, розрахунок очікуваного ВСШЗ $_{ij}$  після зміни координат на  $\Delta X$  доцільно здійснювати сусіднім вузлам, для чого вони повинні знати його оновлені координати (або просторовий напрямок) та рівень завади на вході приймача у точці  $X_j$ .

Таким чином, після оновлення даних в таблиці місцезнаходження сусідніх вузлів, кожен вузол, який є сусідом  $j$ -го вузла здійснює розрахунок максимально можливого  $SINR_{ij}$ , яке можна забезпечити шляхом керування направленістю випромінювання КАР (вираз (4)).



Таблиця сусідніх вузлів для  $i$ -го вузла

Номер вузла	1	2	3	$i$	$n$
	$(x, y, z)_1$	$(x, y, z)_2$	$(x, y, z)_3$	$(x, y, z)_i$	$(x, y, z)_n$
Параметри вузла	$v_{i1}$	$v_{i2}$	$v_{i3}$	$v_{ii}$	$v_{in}$
	$\gamma_{i1}$	$\gamma_{i2}$	$\gamma_{i3}$	$\gamma_{ii}$	$\gamma_{in}$
	$t_{i1}$	$t_{i2}$	$t_{i3}$	$t_{ii}$	$t_{in}$
	ВСШЗ $_{i1}$	ВСШЗ $_{i2}$	ВСШЗ $_{i3}$	ВСШЗ $_{ii}$	ВСШЗ $_{in}$

Чим більше придатних для ведення зв'язку сусідніх вузлів має радіостанція, тим краще, оскільки забезпечується більша кількість альтернативних маршрутів передачі інформації з заданою пропускною спроможністю.

Оскільки в процесі побудови маршруту можуть приймати участь і радіостанції, оснащені тільки всенаправленими антенами (портативні та ранцеві), при зміні власних координат, або координат постановника завад, або появи нового ПЗ, вони також здійснюють усі необхідні розрахунки стосовно сусідніх радіостанцій.

Після розрахунку оновленого очікуваного значення ВСШЗ у напрямку на  $i$ -ту станцію кожна радіостанція розсилає завадозахищеним службовим каналом уточнені дані.

*Багатопараметрична маршрутизація.* Крім даних про координати вузлів мережі, може знадобитися інформація про низку інших параметрів, зокрема пропускну спроможність, час затримки передачі, розхід енергії на передачу, які визначають побудову маршруту за заданими вимогами по якості передачі (QoS) [3].

Очевидно, що не можливо розробити єдиний універсальний метод маршрутизації. Він повинен враховувати можливі зміни вихідних даних про мережу (розмірність, топологія, швидкість її зміни (переміщення вузлів) тощо) та володіти адаптивними властивостями.

Реалізація багатопараметричної маршрутизації може бути обмежена значною обчислювальною складністю, тому доцільно застосовувати методи штучного інтелекту, які передбачають знання про правила вибору метрик і способи збору інформації про стан мережі [3, 19].

*Управління топологією мережі.* Важливим завданням на мережевому рівні є введення додаткового підрівня управління топологією мережі, або її зоною [4]. За рахунок управління діаграмами направленості антен, положенням повітряних радіостанцій-ретрансляторів, розміщених на базі безпілотних літальних апаратів [20], потужністю передачі, можна отримати різні варіанти топологій з різними потенційними пропускними спроможностями і довжинами маршрутів передачі. Реалізація даного підрівня повинна здійснюватися перед рівнем маршрутизації.

На вищих рівнях моделі OSI напрямки вдосконалення МР з направленими антенами відповідають розглянутим у [4].

*Розбиття маршруту передачі на сегменти при реалізації транспортного рівня моделі OSI.*

За рахунок поділу маршруту передачі інформаційного повідомлення на декілька сегментів може бути досягнуто зменшення кількості перерваних сесій транспортного рівня за рахунок зменшення кількості перебудов маршрутів передачі внаслідок змін топології мережі.

*Міжрівнева інтеграція на прикладному рівні.* У роботі [4] запропоновано новий підхід щодо побудови системи управління – введення бази методів управління та інтелектуальної надбудови над нею – системи прийняття рішень з управління, що повинна координувати функціонування множини методів управління за рівнями моделі OSI з метою оптимізації показників функціонування мережі. При цьому завдання ухвалення рішення по управлінню мережею (вибір конкретних методів управління за кожним рівнем) зводиться до завдання ієрархічного цільового динамічного оцінювання альтернатив при нечітких вихідних даних. При цьому забезпечується координація і інтелектуалізація рівнів моделі OSI.

При цьому до складу системи управління МР для забезпечення роботи в умовах навмисних завад повинна входити підсистема завадозахисту.

Напрямки удосконалення МР з направленими антенами за рівнями моделі OSI в умовах навмисних завад зведено у табл. 3.

Таблиця 3

Напрямки удосконалення МР з направленими антенами

Рівень моделі OSI	Напрямок удосконалення
Фізичний	Вибір способу реалізації направленої антенної системи Розробка ефективних алгоритмів діаграмоутворення з урахуванням впливу навмисних завад Реалізація процедур оцінки просторових координат (напрямків) на сусідні радіостанції мережі та постановників завад
Канальний	На рівні доступу до каналу (MAC) – розробка (удосконалення) методів доступу до спільного радіоканалу з урахуванням особливостей направленості антенних систем радіостанцій Застосування додатково до традиційних схем завадостійкого кодування фонтанних кодів
Мережевий	Розробка (удосконалення) ефективних протоколів координатної маршрутизації для різних умов функціонування мережі з урахуванням впливу навмисних завад Введення нового підрівня управління топологією мережі
Транспортний	Розробка ефективних протоколів транспортного рівня з поділом маршруту передачі на сегменти
Прикладний	Міжрівнева інтеграція, створення бази методів управління та системи прийняття рішень з управління Координація і інтелектуалізація рівнів моделі OSI

**Висновки.** Таким чином, основними завданнями, які пов'язані з ефективним впровадженням адаптивних антенних решіток у мережі MANET є наступні:

адаптивне управління формуванням діаграми направленості антенних решіток;

визначення кутових координат джерел радіовипромінювань (кореспондентів та джерел завад);

постійний контроль сигнально-завадової обстановки у напрямках на кореспондентів мережі;

удосконалення множинного доступу користувачів до спільного частотно-часового та просторового ресурсу каналу;

удосконалення маршрутизації передачі повідомлень з урахуванням поточної сигнально-завадової обстановки. При цьому при розробці протоколів маршрутизації та множинного доступу необхідно передбачити їх адаптивність стосовно розмірності мережі, вимог до неї, умов функціонування і типу інформації, що передається;

удосконалення транспортного рівня;

міжрівнева інтеграція, координація і інтелектуалізація рівнів моделі OSI.

Напрямком подальших досліджень є розробка удосконалених методів маршрутизації та множинного доступу для реалізації в перспективних мобільних радіомережах тактичної ланки управління з використанням антенних решіток в умовах впливу навмисних завад.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Романюк В.А. Напрямки підвищення ефективності функціонування тактичних мобільних радіомереж: доповіді та тези доповідей виступів учасників VII науково-практичного семінару [„Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”], (Київ, 24 жовтня 2013р.). Романюк В.А. К.: ВІТІ ДУТ, 2013. С. 40 – 56.

2. Аналіз режимів роботи та перспектив бойового застосування військових УКХ радіостанцій іноземного виробництва. [Кувшинов О.В., Гурський Т.Г., Гриценко К.М., Шишацький А.В.]. Збірник наукових праць ВІТІ. 2018. Вип. № 1. С. 43 – 50.

3. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами. [С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк]. К.: НПП „Издательство „Наукова думка” НАН Украины”, 2012. 444 с.: ил.
4. M. Tarique. Selection of optimal beamforming algorithm for mobile Ad Hoc networks. *Wireless Engineering and Technology*. 2017. № 8. Pp. 20 – 36.
5. Adaptive beamforming algorithms for anti-jamming. [Rana Liaqat Ali, Anum Ali, Anisur-Rehman and. oth. ]. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*. 2011. Vol. 4. № 1. Pp. 95 – 105.
6. Performance of adaptive beam nulling in multihop ad-hoc networks under jamming. [S. Bhunia, V. Behzadan, P. A. Regis, S. Sengupta]. *High Performance Computing and Communications (HPCC)*. 2015. IEEE 17th International Conference. Pp. 1236 – 1241.
7. Bazan O., Jaseemuddin M. A Survey on MAC Protocols for Wireless Ad hoc Networks with Beamforming Antennas. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. 2012. № 14(2). Pp. 216 – 239.
8. Напрямки вдосконалення множинного доступу в мобільних тактичних радіомережах з направленими антенами. [Гурський Т.Г., Сова О.Я., Боголій С.М. Гриценко К.М.]. *Збірник наукових праць ВІТІ*. 2019. Вип. № 2. С. 29 – 37.
9. A Cross-Layer Approach for Designing Directional Routing Protocol in MANETs. Hrishikesh Gossain<sup>1</sup>, Tarun Joshi<sup>1</sup>, Carlos Cordeiro<sup>2</sup>, and Dharma P. Agrawal. *IEEE Communications Society / WCNC 2005*. 1976 – 1981.
10. Directional Antenna Based Efficient Location Aware Routing in Mobile Adhoc Network. G. Jayasree, K.P. Indulekha and B. Malarkodi. *Ictact journal on communication technology*, June 2018, Volume: 09, Issue: 02. 1765 – 1775.
11. Ramanathan R. A Radically New Architecture for Next Generation Mobile Ad Hoc Networks // *In IEEE Proceeding Mobicom, 2005*. Pp. 132 – 139.
12. Zhuk O., Romanyuk V., Sova O., Romanyuk A. Directions of Mobile Ad Hoc Networks efficiency increase // *In Proc. of International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, (Lviv, 2014)*. – Lviv: TCSET 2014, 2014. – p. 468.
13. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн / [Г.А. Ерохин, О.В. Чернов, Н.Д. Козырев, В.Д. Кочержевский]. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 531 с.
14. С.А. Balanis. *Antenna Theory*. Wiley, 2-nd ed., 1997.
15. Кувшинов О. В. Адаптивне управління засобами завадозахисту військових систем радіозв'язку / О. В. Кувшинов // *Збірник наукових праць ВІКНУ*. 2009. Вип. 17. С.125–130.
16. Москалец Н.В. Сравнительный анализ методов оценки направления прихода сигналов / *Радиотехника*. 2017. Вып. 188. С. 126 – 135.
17. Жураковський Б. Ю. Дослідження використання нових завадостійких кодів для каналів зі стиранням. *Вісник ДУІКТ*. 2012. Т.10. №2. С. 93 – 96.
18. Минович А.И., Романюк В.А. Маршрутизация в мобильных радиосетях – проблема и пути ее решения // *Зв'язок*. 2006. №3. С. 42 – 50.
19. Міночкін А.І., Романюк В.А., Сова О.Я. Інтелектуальний метод маршрутизації в мобільних радіомережах. *Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ “КПР”*. 2009. № 1. С. 88 – 97.
20. Романюк В.А., Степаненко Є.О. Задачі синтезу топологій мереж мобільної компоненти з використанням телекомунікаційних аероплатформ // *Збірник наукових праць ВІТІ*. 2017. № 3. С. 149 – 157.