

## ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ МОБІЛЬНИХ РАДІОМЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ АДАПТИВНОГО ДІАГРАМОУТВОРЕННЯ

*Радіомережі класу MANET (далі – мобільні радіомережі, МР) знаходять все ширшого застосування для організації тактичного військового радіозв'язку за останні роки. Завадозахищеність таких радіомереж може бути значно вищою порівняно з класичними радіомережами (з ретранслятором або без нього) за рахунок можливості багатократної ретрансляції повідомлень.*

*Перспективним напрямком підвищення завадозахищеності МР на фізичному рівні є застосування антенних решіток (АР) з можливістю керування напрямком основного випромінювання, що дозволяє забезпечити максимальні значення відношення сигнал/завада на входах приймачів окремих радіостанцій на маршруті передачі інформації. У той же час, для забезпечення максимальної завадозахищеності у таких МР необхідне урахування особливостей формування діаграм направленості антен радіостанцій мережі, просторових координат радіостанцій та постановників завад.*

*У статті проведено аналіз завдань, які виникають при впровадженні технології адаптивного діаграмоутворення в МР в умовах активної радіоелектронної протидії, основними з яких є наступні: визначення просторових координат власної станції, кореспондентів мережі та постановника навмисних завад; розрахунок оптимального кута орієнтації основного пелюстка діаграми направленості антени при прийомі сигналу від сусідніх кореспондентів з урахуванням взаємного розташування радіостанцій та постановника завад; практична реалізація обміну координатною інформацією між радіостанціями.*

*Урахування та розв'язання цих завдань дозволить забезпечити ефективну реалізацію протоколів маршрутизації у мобільній радіомережі з АР та підвищити завадозахищеність як на окремих інформаційних напрямках, так і радіомережі в цілому.*

**Ключові слова:** мобільна радіомережа, антенна решітка, відношення сигнал/завада, завадозахищеність, діаграмоутворення, маршрутизація, навмисна завада, інформаційний канал, службовий канал.

### **S. Boholii, T. Hurskyi, V. Makarchuk, A. Khyzhyi. Increasing the anti-jammingness of mobile radio networks with adaptive beamforming.**

*MANET radio networks (mobile radio networks, MRN) are increasingly used for tactical military radio communications in recent years. Anti-jammingness of such radio networks can be much higher compared to conventional radio networks (with or without a repeater) due to the possibility of multiple relay of messages.*

*A promising direction to increase the noise immunity of MRN at the physical level 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-to-interference ratio at the inputs of individual radio stations. At the same time, in order to ensure maximum noise immunity in such MRNs, it is necessary to take into account the peculiarities of the formation of directional diagrams of antennas of radio stations of the network, spatial coordinates of radio stations and jammers.*

*The article analyzes the tasks that arise when implementing the technology of adaptive charting in MRN in the conditions of active electronic countermeasures, the main ones are the following: determination of the spatial coordinates of the own station, network correspondents and the jammer; calculation of the optimal angle of orientation of the main lobe of the antenna pattern when receiving a signal from neighboring correspondents, taking into account the mutual location of radio stations and the jammer; practical implementation of the exchange of coordinate information between radio stations.*

*Taking into account and solving these tasks will ensure the effective implementation of routing protocols in the mobile radio network with the AR, and increase interference protection in both individual information areas and the radio network as a whole.*

**Keywords:** mobile radio network, antenna array, signal-to-interference ratio, anti-jammingness, beamforming, routing, intentional interference, data channel, service channel.

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

За останні роки радіозв'язок в тактичній ланці управління військами все більше організовується у вигляді мобільних радіомереж класу MANET – Mobile Ad Hoc Networks [1; 2]. Такі мережі мають низку суттєвих переваг, порівняно і з традиційними військовими симплексними (напівдуплексними) радіомережами, і зі 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].

Водночас, питання підвищення ефективності функціонування мобільних радіомереж в умовах активного радіоелектронного подавлення досліджені недостатньо. Зокрема, поряд із традиційними способами забезпечення завадозахисту у МР з'являються додаткові – за рахунок використання направлених антен (адаптивних АР), а також можливості створення декількох альтернативних маршрутів передачі повідомлень.

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

Роботи, присвячені проблемі підвищення завадозахищеності радіомереж, пропонують її вирішення, переважно на фізичному рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем: за рахунок технологій розширення спектра – псевдовипадкове перестроювання робочих частот (ППРЧ) [4; 5] та шумоподібні сигнали ШСС (так зване пряме розширення) [5–7], просторової фільтрації та схем подавлення завад різного роду [5; 8; 9]. На каналному рівні підвищення завадозахищеності можливе за рахунок завадостійкого кодування [10; 11].

Використання просторової фільтрації навмисних завад на практиці обмежувалося діапазонами робочих частот військових радіозасобів, які не дозволяли виготовити прийнятні за масо-габаритними показниками антенні пристрої. При переході у більш високі діапазони частот (сотні МГц, одиниці ГГц) цілком можливим є застосування складних антенних систем, адаптивних АР або АР з комутацією променя [8; 12]. Застосування АР дозволить забезпечити просторову фільтрацію завад та сигналів та збільшити рівень корисного сигналу на прийомі.

В роботі [13] проведено аналіз ефективності методів формування діаграми спрямованості АР для мобільних радіомереж. Але методи, розглянуті в [13], забезпечують ефективну роботу МР в умовах низьких шумів в каналі зв'язку та малоефективні в умовах потужних завад.

В роботі [14] розглянуто методи адаптивного діаграмоутворення для підвищення завадозахищеності прийому, але у загальному вигляді, без урахування особливостей функціонування мобільних радіомереж. Крім цього, методи, розглянуті в [13; 14], мають достатньо високу обчислювальну складність.

В роботі [15] показано ефективність адаптивного формування нулів діаграми направленості адаптивної АР в МР в умовах навмисних завад, але не наведено рекомендацій щодо реалізації алгоритму діаграмоутворення.

В роботі [16] запропоновано методику управління направленістю випромінювання АР з круговим розташуванням випромінюючих елементів у мобільній радіомережі в умовах навмисних завад. Однак в [16] вирішується завдання передачі інформації кореспонденту, для якого може бути забезпечене найбільше відношення сигнал/завада (ВСЗ) на вході приймача. Передбачається, що далі цей кореспондент за тим же принципом буде ретранслювати інформацію, поки вона не досягне отримувача. В реальних мережах це може призвести до надмірного використання пропускної спроможності окремих каналів зв'язку та мережі в цілому. Таким чином, на мережевому рівні необхідно враховувати особливості діаграмоутворення у мобільній мережі при визначенні кореспондентів (вузлів), які можуть взяти участь у побудові необхідного маршруту в умовах активного радіоелектронного подавлення.

*Тому, метою статті є урахування особливостей адаптивного діаграмоутворення при реалізації протоколів маршрутизації у мобільних військових радіомережах в умовах постановки навмисних завад.*

#### **Виклад основного матеріалу**

Антенними решітками, які порівняно просто реалізувати на практиці у військових тактичних радіомережах, є антенні системи з комутацією променя (з керуванням напрямком основного випромінювання) з круговим розташуванням випромінюючих елементів (рис. 1) [16].

Нехай центр кола, на якому розташовуються елементи КАР, співпадає з центром сферичної системи координат. 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.

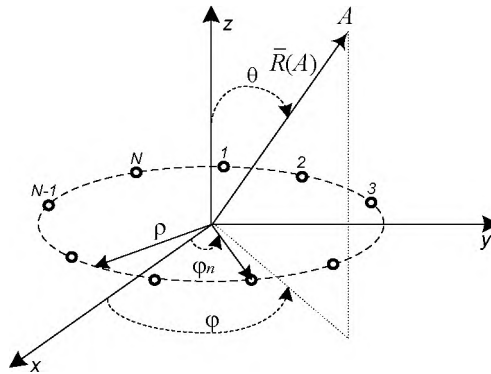


Рис. 1. АР з круговим розташуванням випромінюючих елементів

Просторова напруженість електричного поля для АР з рівномірним розташуванням  $N$  елементів по колу з радіусом  $\rho$  визначається за формулою [16]:

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N E_0 \exp[j\kappa_\lambda \rho \sin(\theta) \cos(\varphi - \varphi_n) + j\psi_n], \quad (1)$$

де  $E_0 = 1$  – значення величини  $(\theta, \varphi)$  для неспрямованого випромінювача;

$\kappa_\lambda = 2\pi/\lambda$  – хвильове число;

$\varphi_n = 2\pi n/N$  – кутове розміщення  $n$ -го елемента на колі в азимутальній площині;

$\psi_n$  – фазовий зсув  $n$ -го елемента КАР, що визначається за формулою:

$$\psi_n = \kappa_\lambda \rho \sin(\theta_0) \cos(\varphi_0 - \varphi_n),$$

де  $(\theta_0, \varphi_0)$  – напрям максимуму ДН КАР.

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

Коефіцієнт направленої дії (КНД) КАР кількісно можна визначити через просторовий розподіл напруженості електричного поля  $E(\theta, \varphi)$  [12]:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{|E(\theta, \varphi)|^2}{\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |E(\theta, \varphi)|^2 \sin(\theta) d\theta d\varphi}. \quad (2)$$

Приклади діаграм направленості, розрахованих за виразом (2) для різних значень радіуса решітки  $\rho$  та кута орієнтації  $\varphi_0$ , наведено на рис. 2, 3.

Результати розрахунків КСД для різних значень  $N$  та  $\rho$  зведено у таблиці 1 для  $\varphi_0 = 0$  та у таблиці 2 для  $\varphi_0 = \pi/4$ .

Результати розрахунків для інших значень  $\varphi_0$  приблизно такі ж самі. При цьому ширина діаграми спрямованості, незалежно від кількості елементів  $N$ , змінюється від приблизно  $85^\circ$  для  $\rho = 0,25\lambda$  до близько  $15^\circ$ – $20^\circ$  для  $\rho = \lambda$  і менше  $10^\circ$  для  $\rho = 1,5\lambda$ .

Аналіз графіків, наведених на рис. 2 і 3, таблиці 1 та виразів (1) і (2), дозволяє зробити наступні висновки:

АР з круговим розташуванням випромінюючих елементів забезпечують однакову ширину ДС по усіх напрямках в азимутальній площині;

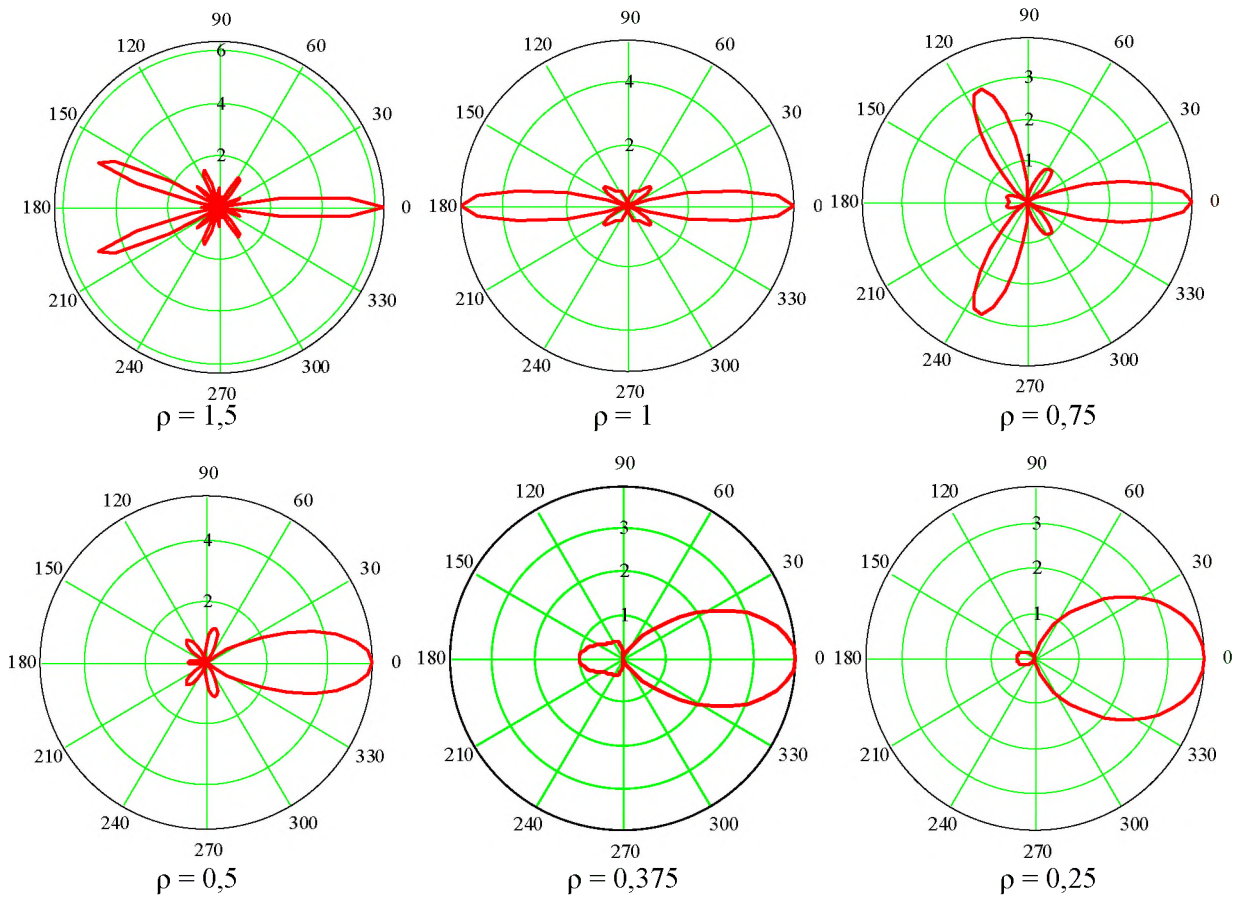


Рис. 2. Вигляд ДН КАР з  $N = 6$ ,  $\varphi = 0$

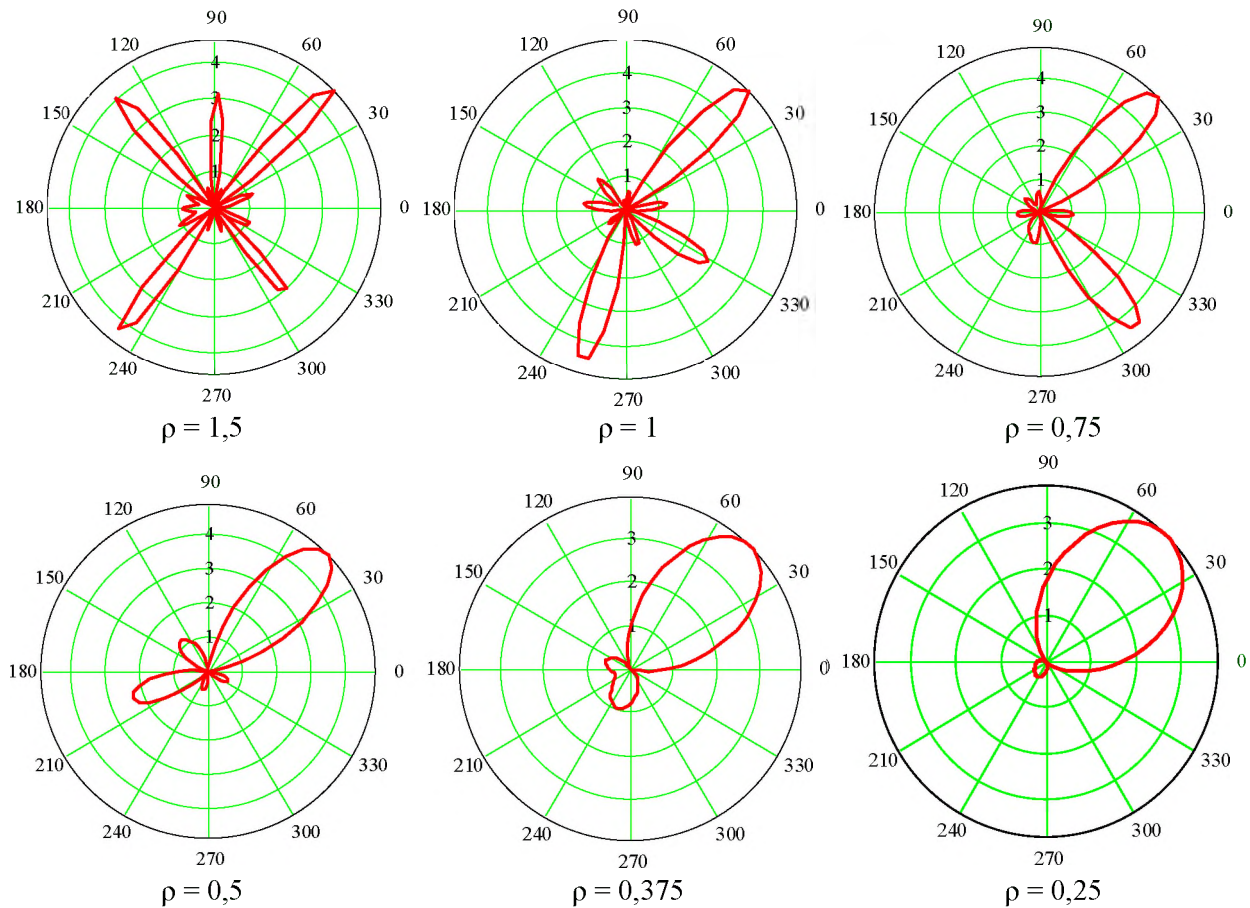


Рис. 3. Вигляд ДН КАР з  $N = 6$ ,  $\varphi = \pi/4$

Таблиця 1

N	$\rho$							
	0,25 $\lambda$	0,375 $\lambda$	0,5 $\lambda$	0,675 $\lambda$	0,75 $\lambda$	$\lambda$	1,25 $\lambda$	1,5 $\lambda$
3	2,88	2,46	3,06	1,91	2,48	2,66	2,24	3,45
4	4	2,93	2,12	4,58	4	3,87	4	5,78
6	3,78	4,45	5,4	3,14	3,94	5,27	5,03	6,33
8	3,79	4,46	6,19	6,44	5,28	7,31	7,69	7,4
10	3,79	4,46	6,31	7,56	8,01	5,4	11,09	11,23
12	3,79	4,46	6,31	7,79	8,58	8,78	6,41	12,02

Таблиця 2

N	$\rho$							
	0,25 $\lambda$	0,375 $\lambda$	0,5 $\lambda$	0,675 $\lambda$	0,75 $\lambda$	$\lambda$	1,25 $\lambda$	1,5 $\lambda$
3	2,87	2,3	3	2,6	2,91	2,59	3,53	2,67
4	3,27	3,18	5,7	2,98	2,9	4,67	4,9	2,7
6	3,8	4,36	4,86	4,16	4,93	4,97	6,1	4,65
8	3,8	4,46	6,19	6,44	5,28	7,31	7,67	7,4
10	3,8	4,46	6,31	7,6	7,85	6,13	8,14	9,3
12	3,8	4,46	6,31	7,8	8,63	7,97	9,8	7,05

зі збільшенням числа випромінюючих елементів  $N$  значення КСД  $D(\varphi_0, \varphi)$  в напрямі максимуму ДН  $\varphi_0$  збільшується (при величині радіуса решітки від 0,5 $\lambda$  і більше), а ширина ДС на рівні половинної потужності  $2\Delta\varphi_{0,5}$  зменшується;

зі збільшенням радіуса КАР зменшується ширина головного пелюстка ДН і збільшується, відповідно, значення КНД, але при цьому зростає і рівень бічних пелюстків, що може призводити до збільшення рівня внутрішньосистемних завад.

В робочому діапазоні частот військових УКХ-радіозасобів забезпечення великих значень  $\rho$  можливе при роботі в області достатньо великих значень робочої частоти (300 МГц і більше).

Використання адаптивних АР дозволяє в умовах впливу навмисних завад здійснювати їх просторову фільтрацію за рахунок орієнтації провалів ДН у напрямку на їх джерело. При цьому, якщо ширина головного пелюстка ДН занадто мала, може виникнути ситуація, коли радіостанція не зможе забезпечити достатній рівень сигналу для зв'язку з жодним з кореспондентів мережі при необхідному рівні ослаблення завади. Чим більша ширина головного пелюстка ДН, тим вища ймовірність успішної передачі інформації в умовах навмисних завад. Таким чином, оптимальне значення ширини ДН антени, а отже і параметра  $\rho$ , залежить від кількості радіостанцій у мережі та їх розташуванні на місцевості. Проведені розрахунки показують можливість роботи в області  $\rho = 0,25\lambda \dots 0,675\lambda$  при  $N = 6$ ,  $\rho = 0,25\lambda \dots 1,0\lambda$  при  $N = 12$ .

Для забезпечення максимальної ефективності передачі інформації в умовах навмисних завад необхідно вирішити ряд завдань:

- 1) визначення кожною радіостанцією власних координат;
- 2) визначення координат постановника завад;
- 3) обмін координатною інформацією між радіостанціями мережі;
- 4) визначення такого кута орієнтації максимуму ДН на кожному з сусідніх радіостанцій, при якому значення ВСЗШ буде максимальним під час отримання інформації від цієї радіостанції;
- 5) урахування ВСЗШ на кожного з сусідніх кореспондентів при реалізації протоколу маршрутизації у радіомережі;
- 6) розробка чітких правил обміну та оновлення координатної інформації та даних щодо очікуваної сигнально-завадової обстановки при відповідній орієнтації приймальної антени.

Розглянемо особливості практичної реалізації цих завдань.

*Визначення власних координат та координат сусідніх радіостанцій.* При використанні направлених антен для забезпечення максимального підсилення на передавальному та приймальному боці радіолінії кореспонденти повинні знати кутове розташування один одного.

Існують два основні методи позиціонування:

перший заснований на використанні геоінформаційних даних систем супутникового позиціонування;

другий полягає у визначенні напрямку на джерело сигналу на основі процедур математичної обробки комплексного вектору просторово-часових відліків сигналу на виходах аналого-цифрового перетворювача адаптивної АР.

Сучасні радіостанції мають вбудований GPS-приймач та можуть періодично повідомляти сусідам власні координати шляхом розсилки GPS-звітів. Під сусідніми будемо розуміти радіостанції, з якими забезпечується радіовидимість.

Водночас, доцільно періодично перевіряти коректність отриманих даних за допомогою другого методу, оскільки засоби РЕБ противника можуть подавляти канали прийому сигналів геопозиціонування, що призведе до спотворення оцінки координат.

Механізм розсилки інформації про власне місцезнаходження потребує окремої розробки.

*Визначення координат постановника завад.* До складу системи управління кожної радіостанції (системи управління радіомережею) повинна входити підсистема завадозахисту [17], 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.

Наявність у радіозасобах кругових АР дозволяє використовувати їх, за необхідності, як пеленгатор для визначення просторового напрямку на джерело радіовипромінювання (ДРВ) [18]. Крім цього, для підвищення точності визначення координат ДРВ можуть бути використані декілька радіостанцій (метод триангуляції). Отримувати дані про координати засобів РЕП противника та їх характеристики можна і від власної системи радіоелектронної розвідки у єдиному інформаційному середовищі поля бою, створеному програмно-апаратними засобами автоматизованого управління військами.

Таким чином, вважатимемо, що підсистема завадозахисту радіостанції (радіомережі) визначає інформацію про координати постановника (постановників) завад (ПЗ) та їх зміни, ідентифікує тип завади та визначає її очікуваний рівень на вході приймача радіостанції.

*Визначення кута орієнтації максимуму ДН на сусідні радіостанції.* Нехай на антену радіостанції № 2 (РС 2) приходить корисний сигнал від радіостанції № 1 (РС 1) та сигнал від постановника завад (рис. 4). Очевидно, що існує таке значення кута основного випромінювання приймальної антени  $\varphi_0$ , при якому відношення рівня корисного сигналу до рівня завади буде максимальним, і воно, як правило, не відповідає чіткій орієнтації основного пелюстка на кореспондента – замість  $\varphi_0 = \varphi_{12}$  отримаємо  $\varphi_0 = \varphi'_{12}$ .

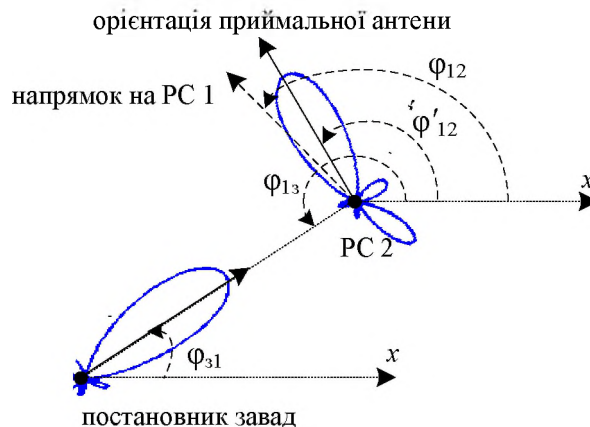


Рис. 4. Подавлення завад за рахунок просторової фільтрації у приймальній антені

Якщо рівні корисних сигналів сусідніх радіостанцій та рівень завади оцінюються та відомі на вході приймача кожної радіостанції МР, то відношення сигнал/(шум + завада) (ВСЗШ) на вході радіостанції  $i$  у напрямку на радіостанцію  $j$  визначається як різниця рівнів сигналу та завади:

$$SINR_{ij}(\varphi_{0ij}) = P_{cij} - P_{zi}. \quad (3)$$

Як видно з рис. 4 за рахунок повороту кута  $\varphi_0$  у межах спрямування основного пелюстка на кореспондента можна досягнути достатньо високого ослаблення завади при незначному ослабленні корисного сигналу.

Оптимальним кутом орієнтації ДН КАР  $\varphi_{0ij}$  буде кут, при якому забезпечується максимальне ВСЗШ.

Оскільки форма ДН КАР змінюється залежно від напрямку основного випромінювання  $\varphi_0$ , орієнтацію антени у поточний момент часу необхідно враховувати при проведенні розрахунків ДН. Іншим варіантом може бути реалізація системи 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).

*Урахування очікуваного ВСЗШ для кожного з сусідніх кореспондентів при реалізації протоколу маршрутизації у радіомережі.*

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 [19]. 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 [20] 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), водночас, 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 заводої 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, разом з тим, 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 <sub>$j$</sub>  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 (табл. 3), кожен вузол, який є сусідом  $j$ -го вузла, здійснює розрахунок максимально можливого  $SINR_{ij}$ , яке можна забезпечити шляхом керування направленістю випромінювання КАР (вираз (3)).

Таблиця 3

Таблиця сусідніх вузлів для  $i$ -го вузла

Номер вузла	1	2	3	$i$	$n$
Параметри вузла	$(x, y, z)_1$	$(x, y, z)_2$	$(x, y, z)_3$	$(x, y, z)_i$	$(x, y, z)_n$
	$v_{j1}$	$v_{j2}$	$v_{j3}$	$v_{ji}$	$v_{jn}$
	$\gamma_{j1}$	$\gamma_{j2}$	$\gamma_{j3}$	$\gamma_{ji}$	$\gamma_{jn}$
	$t_{j1}$	$t_{j2}$	$t_{j3}$	$t_{ji}$	$t_{jn}$
	ВСШЗ <sub><math>j1</math></sub>	ВСШЗ <sub><math>j2</math></sub>	ВСШЗ <sub><math>j3</math></sub>	ВСШЗ <sub><math>ji</math></sub>	ВСШЗ <sub><math>jn</math></sub>

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

Оскільки в процесі побудови маршруту можуть брати участь і радіостанції, оснащені тільки всенаправленими антенами (портативні та ранцеві), при зміні власних координат або координат постановника завод, 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 службовим каналом уточнені дані.

Розглянемо за приклад фрагмент МР (рис. 5), що містить 9 радіостанцій (вузлів), оснащених круговими АР. Нехай радіостанція № 1 повинна передати дані для радіостанції № 9. На приймачі радіозасобів впливає постановник навмисних завод. Кожен вузол володіє інформацією про власні координати, а також координати сусідніх вузлів та постановника завод  $i$ , таким чином, визначає, які з вузлів можуть приймати від нього інформацію із задовільною якістю, а які – ні.

На рис. 5 стрілки, зображені суцільною лінією, відповідають задовільним ділянкам мережі, де у відповідному напрямку можлива передача інформації із заданою якістю (забезпечується мінімально необхідне ВСШЗ). Стрілки, виконані пунктирними лініями, показують, що в даний час відповідні ділянки будуть непридатними при впливі навмисних завод, створених постановником, ідентифікованим підсистемою заводозахисту.



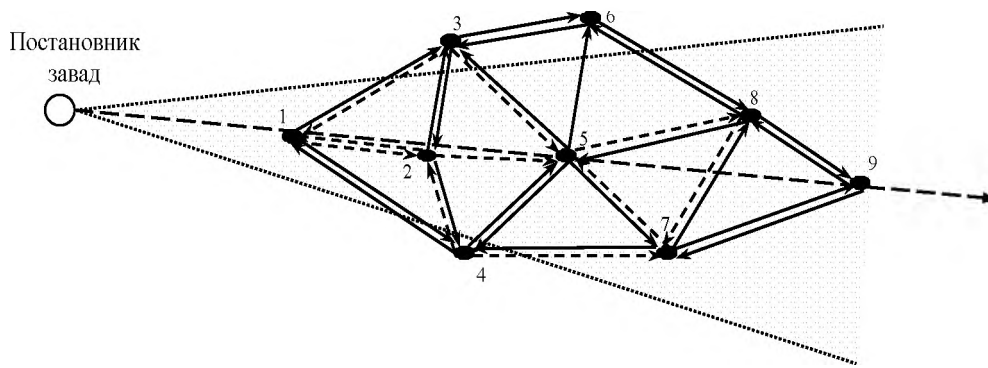


Рис. 5. Приклади побудови можливих маршрутів передачі між вузлами 1 та 9

З рис. 5 видно, що придатними маршрутами для передачі у напрямку 1 – 9 є „1 – 3 – 6 – 8 – 9”, „1 – 4 – 5 – 7 – 9” та „1 – 4 – 5 – 7 – 8 – 9”. Якщо метрикою при побудові маршруту є мінімальна затримка (мінімальна кількість ретрансляцій) при забезпеченні мінімально необхідної швидкості передачі даних, то кращими є перші два маршрути, з яких буде обрано той, який забезпечить вищу пропускну спроможність. Також очевидно, що маршрути для зворотного інформаційного напрямку будуть відрізнятися. Придатні маршрути у зворотному напрямку: „9 – 8 – 6 – 3 – 2 – 4 – 1”, „9 – 8 – 5 – 3 – 2 – 4 – 1” та „9 – 7 – 4 – 1”.

*Розробка чітких правил оновлення інформації про місцезонаження радіостанцій МР та ПЗ.* Механізм розсилки інформації про власне місцезонаження, обміну даними щодо координат постановників завод та очікуваних значень ВСШЗ між сусідніми радіостанціями тощо потребує окремої розробки. Його можна реалізувати наступними способами:

- з використанням ненаправлених антен на передачу та прийом у визначені моменти часу;
- почерговою передачею радіостанцією з направленою антеною у напрямку на окремих кореспондентів (груп кореспондентів) з ненаправленими антенами;
- шляхом чіткого орієнтування антен кореспондентів одна на одну (за останніми даними).

Останній спосіб повинен передбачити досить частий обмін GPS-звітами з урахуванням швидкості взаємного переміщення сусідніх радіостанцій. Крім цього, він потребує резервування значної частини загальної пропускну спроможності каналу для почергової передачі однієї й тієї ж інформації усім сусіднім радіостанціям.

Окремої уваги потребує визначення періодичності, з якою необхідно оновлювати вказану службову інформацію. Якщо радіостанції нерухомі відносно одна одної та відносно ПЗ, потреби у оновленні цієї інформації немає, якщо ж хоча б один із вказаних РЕЗ рухається, необхідно достатньо часто здійснювати оновлення розрахунків.

Оскільки від забезпечення коректного обміну службовою інформацією залежить ефективність і можливість функціонування МР з адаптивним діаграмоутворенням, для забезпечення високої заводо захищеності службового каналу доцільно застосувати низькошвидкісні коригувальні коди, здатні забезпечити прийом інформації в умовах низьких відношень сигнал/шум, а також технологію розширення спектра.

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

- визначення кутових координат джерел радіовипромінювань (кореспондентів та джерел завод);
- адаптивне управління формуванням діаграми направленості АР;
- постійний контроль сигнально-заводової обстановки у напрямках на кореспондентів мережі;
- удосконалення протоколів маршрутизації передачі повідомлень з урахуванням поточної сигнально-заводової обстановки;
- розробка ефективного протоколу обміну службовою інформацією (який має здійснюватися із оптимальною періодичністю), що стосується координат радіостанцій та

постановників завод, а також сигнально-заводової обстановки (очікуваних значень відношення сигнал/завода, які будуть забезпечені при оптимальній орієнтації антени приймальної станції).

Напрямок подальших досліджень є розробка удосконаленого методу координатної маршрутизації для реалізації в перспективних мобільних радіомережах тактичної ланки управління з використанням АР в умовах впливу навмисних завод.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Романюк В. А. Напрямки підвищення ефективності функціонування тактичних мобільних радіомереж // Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення: доповіді та тези доповідей виступів учасників VII науково-практичного семінару, м. Київ, 24 жовтня 2013 р. Київ.: ВІПІ ДУТ, 2013. С. 40–56.
2. Кувшинов О. В., Гурський Т. Г., Гриценко К. М., Шишацький А. В. Аналіз режимів роботи та перспектив бойового застосування військових УКХ радіостанцій іноземного виробництва // Збірник наукових праць ВІПІ. 2018. Вип. 1. С. 43–50.
3. Бунин С. Г., Войтер А. П., Ильченко М. Е., Романюк В. А. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами. Київ: НПІ „Издательство „Наукова думка” НАН України”, 2012. 444 с.: ил.
4. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. Санкт-Петербург: Самиздат, 2013. 166 с.
5. Борисов В. И. Помехозащищенность систем радиосвязи: основы теории и принципы реализации. Москва: Наука, 2009. 358 с.
6. Борисов В. И., Зинчук В. М., Лимарев А. Е. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью. Москва: Радио и связь, 2003. 640 с.
7. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. Москва: Радио и связь, 1985. 384 с.
8. Борисов І. В., Гурський Т. Г., Ільїнов М. Д., Гриценко К. М. Підвищення ефективності функціонування систем радіозв'язку за рахунок використання адаптивних антенних решіток // Збірник наукових праць ВІПІ. 2015. Вип. 1. С. 16–24.
9. Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов / Б. Уидроу, С. Стирнз; пер. с англ. под ред. В. В. Шахгильдяна. Москва: Радио и связь, 1989. 440 с.
10. Золотарев В. В., Овечкин Г. В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: справочник. Москва: Горячая линия – Телеком, 2004. 126 с.: ил.
11. Банкет В. Л. Сигнально-кодовые конструкции в телекоммуникационных системах. Одесса: Фенікс. 2009. 180 с.
12. Ерохин Г. А., Чернов О. В., Козырев Н. Д., Кочержевский В. Д. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. Москва: Горячая линия – Телеком. 2007. 531 с.
13. M. Tarique. Selection of optimal beamforming algorithm for mobile Ad Hoc networks // Wireless Engineering and Technology. 2017. № 8. Pp. 20–36.
14. 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.
15. 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.
16. Гриценко К. М., Гурський Т. Г. Методика формування діаграми спрямованості кільцевої антенної решітки радіостанції мобільної радіомережі в умовах навмисних завод // Збірник наукових праць ВІПІ. 2018. Вип. № 3. С. 6–16.
17. Кувшинов О. В. Адаптивне управління засобами заводозахисту військових систем радіозв'язку // Збірник наукових праць ВІКНУ. 2009. Вип. 17. С. 125–130.
18. Москалец Н. В. Сравнительный анализ методов оценки направления прихода сигналов // Радиотехника. 2017. Вып. 188. С. 126–135.
19. Минович А. И., Романюк В. А. Маршрутизация в мобильных радиосетях – проблема и пути ее решения // Зв'язок. 2006. № 3. С. 42–50.
20. Ramanathan R. A Radically New Architecture for Next Generation Mobile Ad Hoc Networks // In IEEE Proceeding Mobicom, 2005. Pp. 132–139.