

МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ ДІАГРАМИ СПРЯМОВАНOSTІ КІЛЬЦЕВОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ РАДІОСТАНЦІЇ МОБІЛЬНОЇ РАДІОМЕРЕЖІ В УМОВАХ НАВМИСНИХ ЗАВАД

Розроблена методика управління діаграмоутворенням засобів радіозв'язку у складі мережі Ad Hoc з використанням адаптивних антенних решіток, яка дозволяє підвищити завадозахищеність радіолінії та зв'язність радіомережі.

Гриценко К.Н., Гурский Т.Г. Методика формирования диаграммы направленности кольцевой антенной решетки радиостанции мобильной радиосети в условиях преднамеренных помех. Разработана методика управления диаграммообразованием средств радиосвязи в составе сети Ad Hoc с использованием адаптивных антенных решеток, позволяющая повысить помехозащищенность и связность радиосети.

K. Hrytsenok, T. Hurskyi Method of beamforming of circular antenna array of radio communication mean consisting of mobile Ad Hoc network in conditions of jamming. Method of adaptive beamforming of means of radio communication in the mobile Ad Hoc network, using adaptive antenna arrays. Allowing to increase antijammingness and connectivity of the network.

Ключові слова: мобільна радіомережа, адаптивна антенна решітка, діаграмоутворення, навмисна завада.

Постановка завдання в загальному вигляді. Реалізація принципів мобільних радіомереж з самоорганізацією – MANET (Mobile Ad-Hoc Network) дозволяє значно підвищити ефективність функціонування військових радіомереж [1]. Кожна радіостанція у мережі класу MANET (далі – мобільна радіомережа (МР)) виконує функції ретрансляції та маршрутизації інформаційних пакетів.

Тому завдання радіоелектронного подавлення МР ускладнюється.

Наприклад, якщо радіостанції, між якими передається інформація, знаходяться у зоні радіовидимості, але відношення сигнал/шум з урахуванням навмисних завад (далі ВСШЗ) перевищує допустиме значення, підвищити його можна шляхом передачі пакетів через одну або декілька проміжних радіостанцій, відстані між якими є меншими, а отже, на таких радіолініях забезпечується вищий рівень сигналу на вході приймачів.

Сучасні військові УКХ засоби радіозв'язку забезпечують роботу у режимах, що передбачають функціонування у складі МР. Зокрема це радіостанції виробництва компаній Harris та Aselsan [2].

Проте вони використовують антени з круговою діаграмою спрямованості, що не дозволяє досягти максимальної ефективності мережі.

Застосування адаптивних антенних решіток (ААР) дозволить [3, 4] підвищити завадозахищеність радіозасобів за рахунок адаптивного формування провалів діаграми спрямованості (ДС) антени у напрямку на джерело завади, зменшити рівень взаємних завад, підвищити загальну пропускну спроможність мережі за рахунок можливого повторного використання частотно-часового ресурсу та збільшення відношення сигнал/шум в точці прийому, підвищити рівень зв'язності мережі.

Адаптивною антеною, яку легко реалізувати на практиці, є лінійні антенні решітки (АР), в яких випромінюючі елементи розташовані уздовж прямої на рівних відстанях один від одного.

Відомо [5], 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. Тому при оцінці коефіцієнтів підсилення розглядатимемо кільцеву антенну решітку (КАР).

Аналіз останніх публікацій.

У переважній більшості публікацій, присвячених мережам класу MANET, зокрема, розглянутих у роботі [1], розглядають радіостанції з неспрямованими антенами.

В роботі [6] проведено аналіз ефективності методів формування діаграми спрямованості антенних решіток для мобільних радіомереж. Але методи, розглянуті в [7] забезпечують ефективну роботу МР в умовах низьких шумів в каналі зв'язку та малоефективні в умовах потужних завад.

В роботі [7] розглянуто методи адаптивного діаграмоутворення для підвищення заводо захищеності прийому, але у загальному вигляді, без урахування особливостей функціонування мобільних радіомереж. Крім цього, методи, розглянуті в [7, 8] мають достатньо високу обчислювальну складність.

В роботі [8] показано ефективність адаптивного формування нулів ДС ААР в МР в умовах навмисних завад, але не наведено рекомендацій щодо реалізації алгоритму діаграмоутворення.

Таким чином, актуальним є завдання ефективного управління формуванням діаграми спрямованості ААР радіостанції мобільної радіомережі в залежності від сигнальної та заводої обстановки в каналі зв'язку.

Тому метою статті є розробка методики адаптивного діаграмоутворення в радіозасобах мобільної радіомережі в умовах навмисних завад.

Виклад основного матеріалу.

Постановка завдання.

Задано: кількість радіостанцій у мобільній радіомережі M ; тип антенної решітки, що використовують радіостанції – кільцева з кількістю елементів N , радіусом ρ ; постановник завад зі спектральною щільністю потужності на вході приймача радіостанції $S(f)$, координати якого заздалегідь невідомі.

Необхідно: визначити параметри КАР (кут φ_0 орієнтації максимуму головного пелюстка діаграми спрямованості АР радіостанції та радіус решітки ρ), які забезпечують необхідне значення відношення сигнал/шум з урахуванням завад (ВСШЗ) на вході приймача.

Обмеження: кількість елементів КАР $N = 6$; радіус решітки $\rho = \lambda/4 \dots \lambda$ (може змінюватись за рахунок зміни робочої частоти радіолінії); максимально допустима ймовірність помилкового приймання сигналів $P_{\text{доп}} = 10^{-6}$ при передачі даних, $P_{\text{доп}} = 10^{-3}$ при передачі мови (в залежності від вимог до $P_{\text{доп}}$ змінюються вимоги до ВСШЗ на вході приймача); радіостанції отримують спільний доступ до середовища передачі за рахунок динамічного часового розділення каналів (TDMA).

Динамічне TDMA передбачає надання вузлу мережі ресурсу спільного каналу за вимогою та завантаженості каналу іншими вузлами.

Допущення: координати кореспондентів мережі та координати постановника завад заздалегідь невідомі та постійно уточнюються з використанням відомих методів оцінки напрямку приходу сигналу (для оцінки координат кореспондентів мережі у структурі інформаційного кадру виділені спеціальні часові інтервали, де радіостанція може передавати як GPS-звіти, так і тестовий сигнал, прийом якого забезпечує визначення іншими кореспондентами мережі азимуту на неї); радіостанції знаходяться у горизонтальній площині.

Завдання визначення необхідного кута орієнтації ДС КАР φ_0 , радіуса решітки та відповідного кореспондента мережі зводиться до вибору найкращого варіанта із множини допустимих, при якому забезпечується максимальне ВСШЗ (при цьому радіостанція, з урахуванням методу маршрутизації, що використовується у мобільній радіомережі, може обрати кореспондента, який задовольняє вимоги по ВСШЗ, але не забезпечує його максимальне значення).

Система рівнянь для розв'язання оптимізаційної задачі має вигляд:

$$\begin{cases} SINR = F_1(P_{ci}, P_3, G_{ci}, G_3) = \max; \\ G_{ci} = F_2(N, \rho, \varphi_{ci}, \varphi_0); \\ G_3 = F_3(N, \rho, \varphi_3, \varphi_0); \\ SINR \geq SINR_{\text{доп}}, \end{cases} \quad (1)$$

де $SINR$ – відношення сигнал/шум з урахуванням завад на вході приймача; P_{ci} – потужність сигналу i -го кореспондента в точці прийому; $i = 1..L$, L – кількість кореспондентів у зоні радіовидимості; P_3 – потужність завади в точці прийому, G_{ci} – коефіцієнт підсилення КАР у напрямку приходу сигналу від i -го кореспондента, G_3 – коефіцієнт підсилення КАР у напрямку приходу завади, N – кількість елементів антенної решітки, ρ – радіус антенної решітки, φ_0 – кут орієнтації діаграми спрямованості АР, φ_{ci} – азимут на i -го кореспондента, φ_3 – азимут на джерело завад.

Суть методики зводиться до вибору одного з кореспондентів мережі, що перебувають у зоні радіовидимості, та такої орієнтації головного пелюстка діаграми спрямованості антени, при якій забезпечується максимально можливе відношення сигнал/шум на вході приймача. При цьому головний пелюсток ДС не обов'язково повинен бути чітко спрямований на кореспондента.

Радіостанція може вибрати азимут, відмінний від необхідного таким чином, щоб у напрямку на кореспондента забезпечувалось значення коефіцієнта підсилення не менше, ніж задане для забезпечення мінімально необхідного ВСШЗ на вході приймача. При цьому, у напрямку на джерело завади повинний бути сформований провал ДС. Якщо забезпечити необхідне ВСШЗ таким чином неможливо, форма ДС змінюється шляхом зміни робочої частоти та, відповідно, радіуса КАР. Таким чином реалізується просторова фільтрація сигналу завади.

Основні математичні співвідношення.

Здатність антени концентрувати випромінювану енергію сигналу в просторі або ефективно приймати енергію сигналу, що приходить з деякої частини простору, характеризується коефіцієнтом спрямовної дії (КСД) $D(\theta, \varphi)$, де θ – кут місця, φ – азимут. Кількісно КСД можна визначити через просторовий розподіл напруженості електричного поля $E(\theta, \varphi)$ [7]:

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

Припустимо, що центр кола, на якому розташовуються елементи КАР, співпадає з центром сферичної системи координат. Якщо $\vec{R}(A)$ – радіус-вектор точки спостереження A (рис. 1), то його кутові координати визначаються кутами θ і φ , 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.

Просторова напруженість електричного поля для АР з рівномірним розташуванням N елементів по колу з радіусом ρ (рис. 1) визначається за формулою:

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N E_0 \exp[j\kappa_\lambda \rho \sin(\theta) \cos(\varphi - \varphi_n) + j\psi_n], \quad (3)$$

де $E_0 = 1$ – значення величини (θ, φ) 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;

ψ_n – фазовий зсув n -го елемента ААР, що визначається за формулою

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

де (θ_0, φ_0) – напрям максимуму ДС кільцевої АР.

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

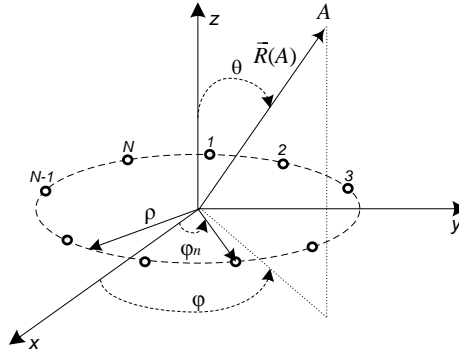


Рис. 1. Кільцева антенна решітка з N елементів

Знаючи число елементів N і радіус кола ρ , на якому вони розташовані, значення $D(\varphi_0, \varphi)$ можна розрахувати, підставивши у формулу (2) вираз (3). На рис. 2 наведено вигляд діаграм спрямованості шестиелементної КАР для різних значень φ_0 при $N = 6$, $\rho = \lambda/2$, результати розрахунків КСД для різних значень φ_0 зведено у табл. 1.

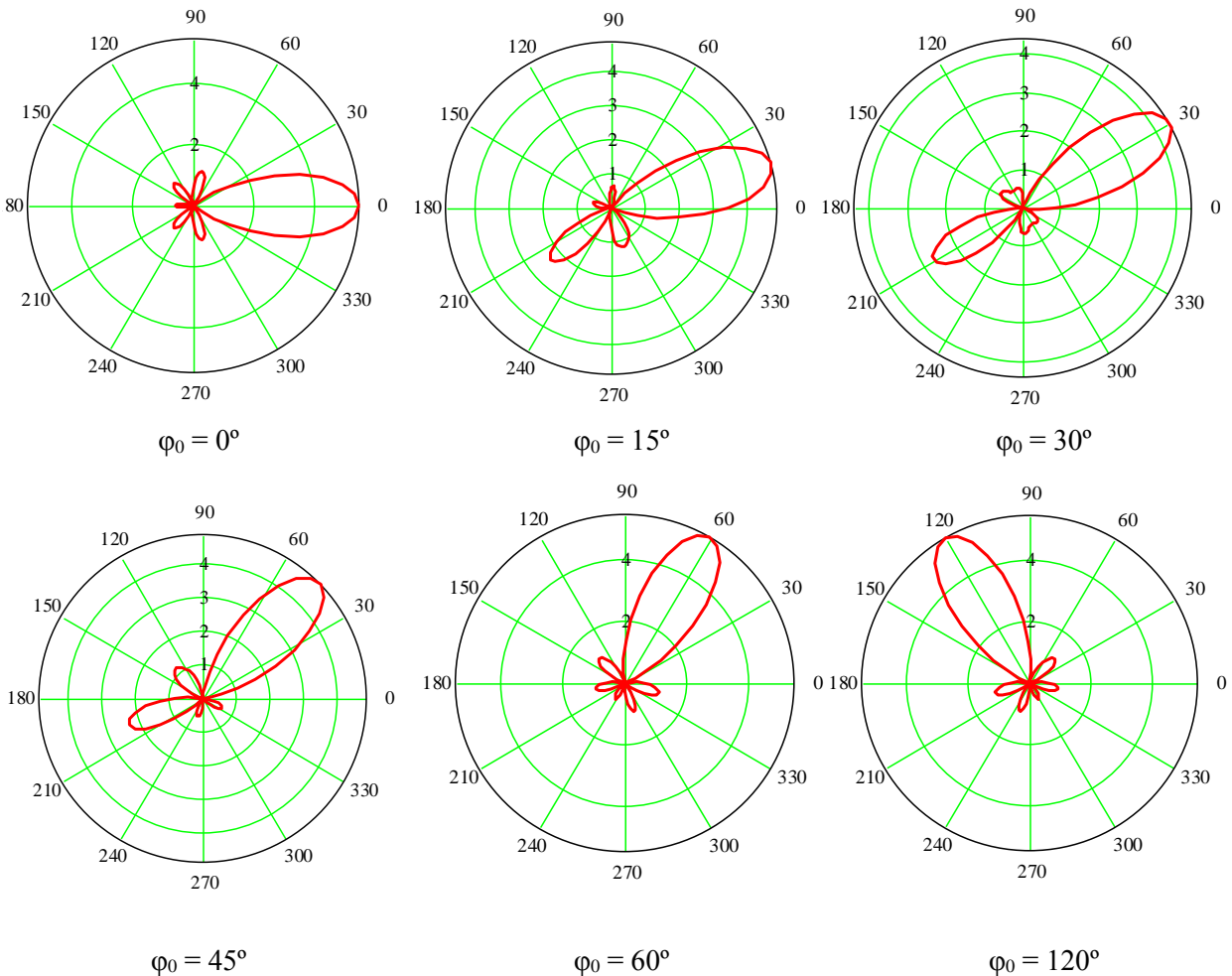


Рис. 2. Вигляд ДС КАР з $N = 6$, $\rho = \lambda/2$

Таблиця 1

Розраховані значення КСД для різних значень φ_0 при $N = 6, \rho = \lambda/2$

$\varphi_0, ^\circ$	0	15	30	45	60	75	90	105
D	5,398	4,859	4,413	4,859	5,398	4,859	4,413	4,859
$\varphi_0, ^\circ$	120	135	150	165	180	195	210	225
D	5,398	4,859	4,413	4,859	5,398	4,859	4,413	4,859
$\varphi_0, ^\circ$	240	255	270	285	300	315	330	34
D	5,398	4,859	4,413	4,859	5,398	4,859	4,413	4,859

На рис. 3 наведено вигляд діаграм спрямованості шестиелементної КАР для різних значень ρ при $\varphi_0 = \pi/4$.

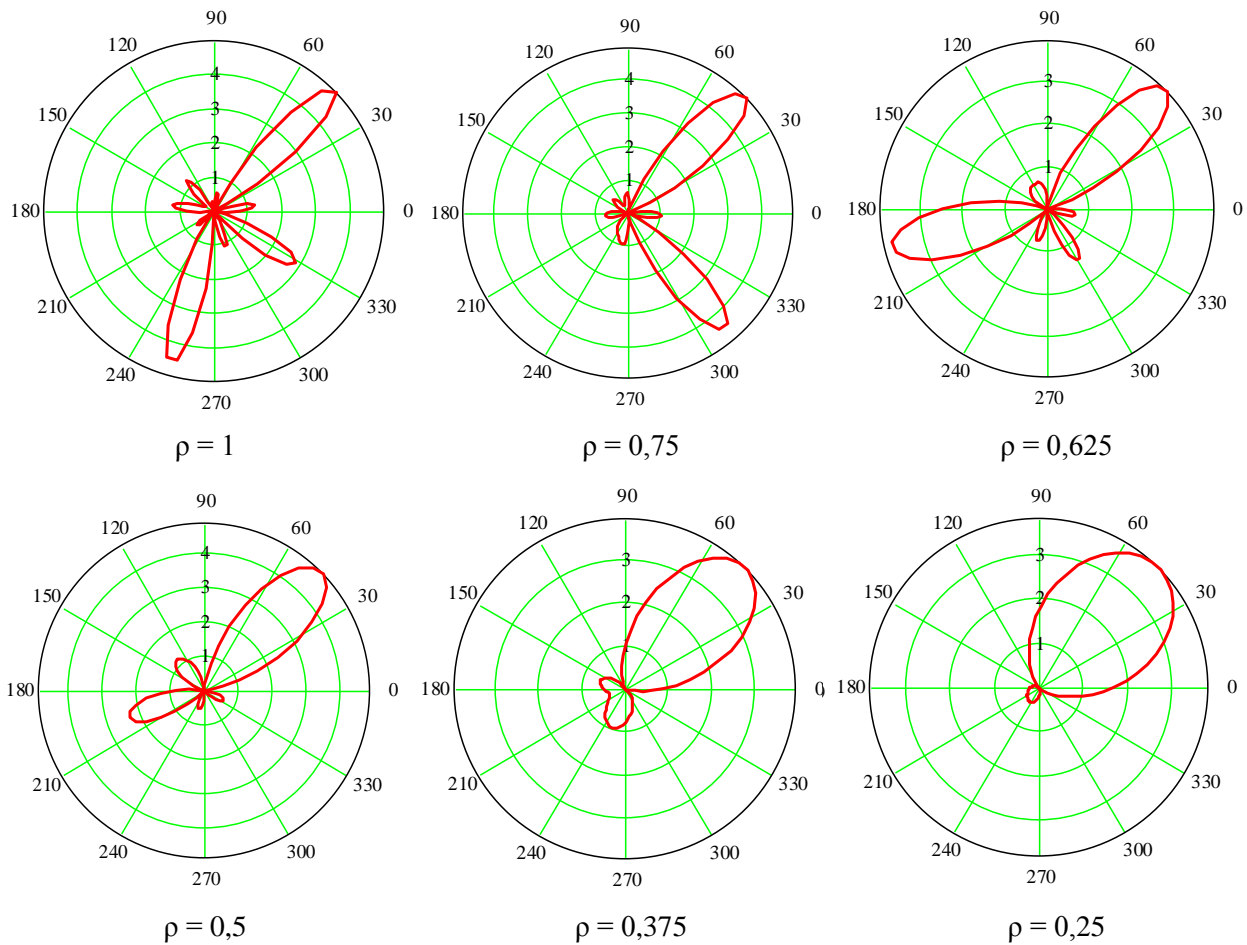


Рис. 3. Вигляд ДС КАР з $N = 6, \varphi_0 = \pi/4$

Результати розрахунків КСД для різних значень N та ρ при $\varphi_0 = \pi/4$ зведено у табл. 2.

Таблиця 2

Розраховані значення КСД для різних значень N та ρ при $\varphi_0 = \pi/4$

N	ρ							
	$0,25\lambda$	$0,375\lambda$	$0,5\lambda$	$0,675\lambda$	$0,75\lambda$	λ	$1,25\lambda$	$1,5\lambda$
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

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

форма ДС КАР змінюється в залежності від φ_0 , проте, при значеннях φ_0 , кратних кількості елементів решітки N , вона повторюється, тому достатньо побудувати (записати у пам'ять управляючого пристрою) ДС від $\varphi_0 = 0^\circ$ до $\varphi_0 = \pi/N$;

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

зі збільшенням числа випромінюючих елементів N значення КСД $D(\varphi_0, \varphi)$ в напрямі максимуму ДС φ_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 ρ зменшується ширина головного пелюстка ДС і збільшується, відповідно, значення КСД, але при цьому зростає і рівень бічних пелюстків, що може призводити до збільшення рівня внутрішньосистемних завад.

Використання ААР дозволяє в умовах впливу навмисних завад здійснювати їх просторову фільтрацію за рахунок орієнтації провалів ДС у напрямку на їх джерело. При цьому, якщо ширина головного пелюстка ДС 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 ДС, тим вища ймовірність успішної передачі інформації в умовах навмисних завад. Таким чином, оптимальне значення ширини ДС антени, а отже і параметра ρ , залежить від кількості радіостанцій у мережі та їх розташуванні на місцевості.

З іншого боку, враховуючи діапазон робочих частот військових УКХ радіозасобів, якщо обрати $\rho = 0,5$ м, то $\rho = 0,25\lambda$ для частоти 150 МГц, а для частоти 512 МГц $\rho = 0,85\lambda$. Проведені розрахунки для $N = 6$ показують можливість роботи в області $\rho = 0,25\lambda \dots 1,0\lambda$ і більше, проте з ростом ρ збільшується рівень бічних пелюстків та зменшується ширина головного пелюстка.

Методика формування діаграми спрямованості ААР, блок-схема алгоритму реалізації якої представлена на рис. 3, складається з наступних етапів.

1. Введення вихідних даних (блок 1). Вводяться параметри радіомережі, радіостанцій та їх антенних решіток $\Psi = \{\psi_i\}$, а саме кількість радіостанцій M , тип антенної решітки та її параметри (N і ρ), значення допустимої величини відношення сигнал/шум $SINR_{\text{доп}}$ (ймовірності помилкового приймання сигналів $P_{\text{б доп}}$), максимальна потужність передавача $P_{\text{прд}}$ та крок її регулювання $\Delta P_{\text{прд}}$.

2. Оцінка каналу (блоки 2 – 4). Етап оцінки каналу включає 2 основних операції:

1) оцінка напрямків розташування сусідніх кореспондентів мережі та рівня їх сигналу в точці прийому (φ_i, P_{ci});

2) оцінка напрямку приходу завади (φ_3, P_3).

Для просторової оцінки сигнальної та завадової обстановки пропонується реалізувати кругове сканування основним пелюстком діаграми спрямованості з фіксацією у визначені інтервали часу інформаційного кадру рівнів сигналу від кореспондентів та рівня шуму в каналі. Основним засобом визначення координат кореспондентів може бути періодичний обмін GPS звітами, проте, враховуючи можливість радіоелектронного подавлення каналу прийому GPS сигналів, доцільно визначати координати кореспондентів і першим способом. У випадку значних розбіжностей можна припустити наявність завад у каналі прийому сигналів геопозиціонування. Крім оцінки рівнів сигналу сусідні радіостанції у визначених часових інтервалах обмінюються інформацією, необхідною для маршрутизації інформаційних пакетів.

Якщо постановників завад не виявлено ($SNR_i \geq SNR_{\text{доп}}$), для передачі інформації обирається найкращий згідно обраного критерію кореспондент. Критеріями можуть бути – максимальне відношення сигнал/шум, мінімальна затримка пакетів у мережі, максимальна

пропускна спроможність мережі. Причому два останні повинні враховувати обмеження щодо мінімально необхідного ВСШ.

3. Визначення уточнених азимутів на кореспондентів з урахуванням виявлених постановників завад (блоки 4 – 6).

При наявності на вході приймача завади, що призводить до перевищення порогового значення $SINR$ при орієнтації максимуму ДС на i -го кореспондента під кутом φ_{0i} ($SINR_i \leq SINR_{\text{доп}}$), здійснюється оцінка КСД при повороті кута на деяке мінімальне значення, при якому забезпечується провал ДС у напрямку на джерело завад. В результаті розраховуються уточнені значення φ'_{0i} , P'_{ci} , $SINR'_i$ з урахуванням повороту ДС. Значення $\Delta\varphi_i$ назване мінімальним, оскільки воно повинне вибиратись у межах основного пелюстка ДС відносно кореспондента. Оцінка КСД здійснюється для усіх кореспондентів, що знаходяться у зоні радіовидимості. Критерії вибору кореспондента для передачі залишаються такими ж, як і за відсутності завад.

Для зменшення часу швидкодії доцільно на етапі проектування радіозасобів провести розрахунки $D(\varphi_0, \varphi)$ для значень $\varphi \in [0; 2\pi)$, $\varphi_0 \in [0; 2\pi)$. При цьому достатньо записати у пам'ять управляючого пристрою значення від $\varphi_0 = 0^\circ$ до $\varphi_0 = \pi/N$, оскільки для інших значень φ_0 форма ДС повторюється.

4. Зміна робочої частоти радіолінії (радіуса решітки) (блоки 7, 8). Якщо на третьому етапі визначено, що вибір жодного з доступних кореспондентів не дозволяє забезпечити необхідне ВСШЗ ($SNIR'_i \leq SNIR_{\text{доп}}$), здійснюється зміна значення робочої частоти на радіолінії з кореспондентом, для якого розраховане на попередньому етапі ВСШЗ максимальне. Значення частоти обирається таким чином, щоб величина радіуса решітки ρ залишалася у межах допустимих значень, а форма ДС змінилась таким чином, щоб у напрямку на джерело завад сформувати провал ДС.

Якщо жодне значення ρ'_k не забезпечує достатнє ослаблення завади, обирається те значення, яке забезпечує мінімальний рівень, а ослаблення завади до необхідного рівня здійснюється поворотом кута орієнтації ДС φ'_{0k} . (блок 10)

Якщо внаслідок виконаних процедур забезпечити необхідне ВСШЗ неможливо (блок 11), потрібна зміна вихідних даних (блок 9), що може передбачати зміну режиму роботи, наприклад, на псевдовипадкову перебудову робочої частоти (ППРЧ) у достатньо широкій смузі частот. Для передачі запитів на зміну режиму роботи, зміну робочої частоти та іншої службової інформації, від успішності прийому якої кореспондентом залежить можливість подальшої передачі інформації, необхідно передбачити підвищену завадозахищеність відповідних позицій інформаційного кадру за рахунок потужного завадостійкого кодування.

5. Адаптивне регулювання потужності (блок 12). Відомо [9, 10], що ефективність мобільної радіомережі можна значно підвищити при забезпеченні роботи передавачів з мінімально необхідною потужністю. Якщо розраховане на попередніх етапах ВСШЗ у напрямку обраного кореспондента перевищує необхідне значення, воно може бути зменшене за рахунок зменшення вихідної потужності передавача. Для цього на етапі встановлення з'єднання на відповідних службових інтервалах інформаційного кадру робиться запит кореспонденту про необхідний рівень потужності його передавача (оскільки умови проходження сигналу на різних напрямках радіолінії, наприклад „ $A - B$ ” і „ $B - A$ ”, можуть бути різними).

6. Передача інформації (блок 13). Після визначення необхідних параметрів КАР (φ_0 , ρ) та радіостанції (f та $P_{\text{прд}}$) починається передача інформаційних пакетів на визначених позиціях інформаційного кадру. В процесі інформаційного обміну етапи 2 – 14 періодично повторюються і при необхідності здійснюються необхідні зміни параметрів ААР та радіостанцій.

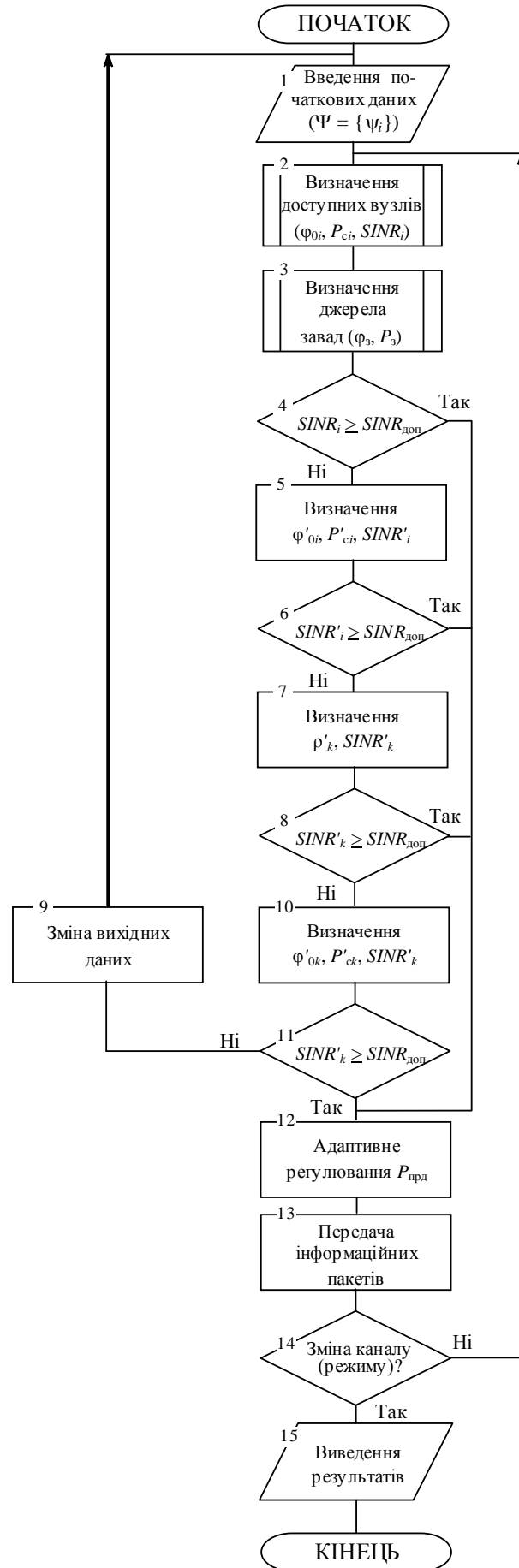


Рис. 4. Блок-схема реалізації алгоритму управління діаграмоутворенням радіостанції мобільної радіомережі

Приклад реалізації методики. Нехай у зоні радіовидимості з радіостанцією A знаходяться сім радіостанцій – B, C, D, E, F, G, H з азимутами на них, відповідно, $0^\circ, 25^\circ, 74^\circ, 90^\circ, 125^\circ, 140^\circ, 170^\circ$ (рис. 5). Відстань r та умови розповсюдження радіохвиль від радіостанції A до інших радіостанцій однакові. Азимут на джерело завад (J) складає 263° . Радіостанції використовують КАР з $N=6$. Значення початкової частоти роботи радіостанцій мережі відповідає радіусу решітки $\rho = \lambda/2$. Необхідно визначити кореспондента для подальшої передачі інформації та уточнений азимут на нього (орієнтацію максимуму ДС) з урахуванням наявності завади за критерієм максимуму ВСШЗ. При цьому для ослаблення завади необхідно реалізувати значення КСД у напрямку постановника завад не менше, ніж у 100 разів (20 дБ). У напрямку кореспондента значення КСД повинне складати не менше 2 (3 дБ). Величини КСД наведені відносно неспрямованої антени.

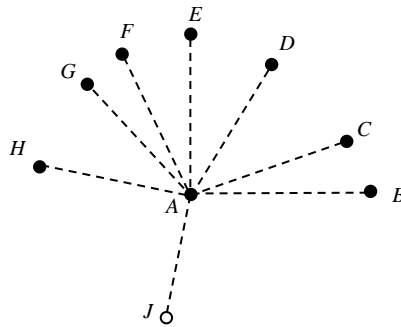


Рис. 5. Розташування радіостанцій та постановника завад

Розрахунки КСД при орієнтації максимуму ДС на відповідних кореспондентів та постановника завад наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Значення КСД КАР у напрямку на кореспондентів мережі та джерело завад

Кореспондент	Азимут, °	ρ_k	D	D_I	$\varphi', ^\circ$	$\Delta\varphi, ^\circ$	D'	D'_I
B	0	$0,5\lambda$	5,4	0,2	4	4	5,22	0,192
		$0,26\lambda$	3,81	$1,4 \cdot 10^{-3}$				
C	25	$0,5\lambda$	4,47	0,43	59	34	0,55	$3,6 \cdot 10^{-3}$
		$0,25\lambda$	3,8	0,116	8	-17	3,39	$7,7 \cdot 10^{-3}$
D	75	$0,5\lambda$	4,86	0,94	61	-14	3,98	$4,6 \cdot 10^{-3}$
E	90	$0,5\lambda$	4,4	2,4	64	-26	1,2	$4,6 \cdot 10^{-3}$
		$0,39\lambda$	4,4	$6,4 \cdot 10^{-4}$				
F	125	$0,5\lambda$	5,3	0,14	129	4	5,04	$8,2 \cdot 10^{-3}$
G	140	$0,5\lambda$	4,63	0,26	131	-9	4,48	$1,5 \cdot 10^{-3}$
H	170	$0,5\lambda$	5,1	1,0	141	-29	1,0	0,3
		$0,26\lambda$	3,81	$6,8 \cdot 10^{-4}$				

Видно, що в умовах відсутності завади найкращим для радіостанції A з погляду забезпечення максимального КСД є радіостанція B ($D = 5,4$). В умовах завад радіостанції D, F та G дозволяють забезпечити достатнє ослаблення завади шляхом повороту кута φ_0 ДС. Очевидно, що найбільший КСД отримано там, де кут повороту $\Delta\varphi$ найменший (радіостанція F).

Припустимо, що в зоні радіовидимості радіостанції A знаходяться лише кореспонденти B, C, E і H . Жоден з них не задовольняє вимогам щодо ослаблення завади та підсилення корисного сигналу шляхом повороту кута ДС. Тому для цих вузлів мережі необхідно змінювати робочу частоту i , відповідно, радіус решітки. Радіостанції B, E і H дозволяють

забезпечити вимоги щодо ВСШЗ лише за допомогою зміни ρ , а для радіостанції C необхідно додатково змінювати і кут φ_0 . Серед цієї групи станцій найкращим є вибір кореспондента E .

Слід зауважити, що зміна ρ , яка реалізується шляхом зміни робочої частоти, потребує узгодження між обома кореспондентами, що в умовах потужної завади може виявитись ускладненим. Саме тому зміна ρ виконується лише у тому разі, коли радіостанція не може позбутися впливу завади на поточній робочій частоті шляхом переорієнтації діаграми спрямованості.

Оцінка ефективності запропонованої методики. Оцінка ефективності здійснювалась з використанням математичної моделі, розробленої у середовищі MathCAD 14. При цьому вважалось, що в зоні радіовидимості з радіостанцією знаходиться лише один кореспондент, координати якого змінюються у межах $\varphi_0 \in [0; \pi)$, та одне джерело завад з незмінними координатами. Розрахунки, отримані у кожній точці знаходження радіостанції кореспондента, були усереднені. Встановлено, що за таких умов радіостанція з 6-елементною КАР дозволяє отримати вигравш у коефіцієнті підсилення, порівняно з неспрямованою антеною, в середньому на 5,9 дБ (рис. 6) з одночасним ослабленням завади не менше, ніж на 20 дБ. При цьому в умовах відсутності завад (верхня крива) та чіткої орієнтації головного пелюстка ДС на кореспондента, використання КАР забезпечує додатковий енергетичний вигравш ще на 2 дБ порівняно з неспрямованою антеною.

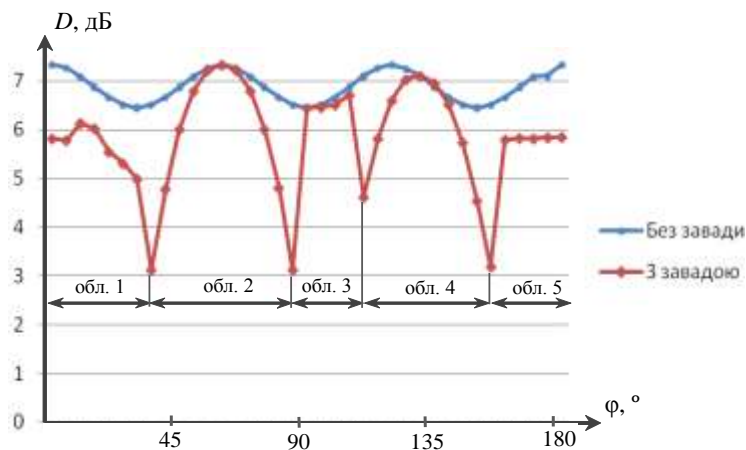


Рис. 6. Розташування радіостанцій та постановника завад

Області 1, 3, 5 на рис. 6 відповідають зміні радіуса решітки, області 2, 4 – зміні φ_0 .

Таким чином, при наявності хоча б однієї радіостанції у зоні радіовидимості та впливі потужної завади, запропонована методика дозволяє продовжити роботу радіостанції в мережі в умовах поставлених у даному прикладі допущень, а саме – ослаблення завади не менше ніж на 20 дБ і значення КСД у напрямку на кореспондента не менше, ніж 2 дБ.

Слід зауважити, що представлені розрахунки стосуються тільки приймальної радіостанції. Радіостанція, що передає, повинна орієнтувати ДС строго на кореспондента для досягнення максимального сумарного коефіцієнта підсилення радіолінії, значення якого буде не менше ніж удвічі більшим, ніж для приймальної радіостанції.

Очевидно, що зі збільшенням кількості радіостанцій за рахунок вибору кореспондента, що забезпечує максимальне ВСШЗ на вході приймача, значення енергетичного вигравшу буде більшим.

Висновки. Таким чином, запропонована методика адаптивного діаграмоутворення радіостанції у складі мобільної радіомережі дозволяє підвищити заводо захищеність військових засобів радіозв'язку за рахунок формування провалів діаграми спрямованості адаптивної антенної решітки у напрямку на постановника завади з одночасним вибором кореспондента, сигнал з напрямку якого забезпечує максимальне (достатнє) відношення

сигнал/шум на вході приймача. Проведені розрахунки для шестиелементної кільцевої антенної решітки в умовах постановки однієї потужної завади показують вигреш такої антенної системи у порівнянні з неспрямованою антеною в середньому на 5,9 дБ.

У запропонованій методиці просторова фільтрація завади реалізується за рахунок повороту ДС таким чином, щоб мінімальне відхилення основного пелюстка від напрямку на одного з кореспондентів мережі призводило до орієнтації провалу ДС у напрямку на джерело завади. Якщо досягти необхідного рівня ослаблення завади таким чином неможливо, форма ДС змінюється шляхом зміни робочої частоти, а отже радіуса кільцевої антенної решітки з подальшим додатковим відхиленням головного пелюстка при необхідності. Розрахунки ДС можуть бути проведені на етапі проектування та записані у пам'ять пристрою управління діаграмоутворенням. За рахунок цього обчислювальна складність та практична реалізація радіостанцій з кільцевими антенними решітками значно спрощується.

Напрямами подальших досліджень є удосконалення методів оцінки напрямків приходу корисного сигналу та завади, а також розробка методу доступу до каналу радіостанціями мобільної радіомережі з використанням адаптивних антенних решіток для забезпечення максимальної пропускну здатності мережі.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
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 ВІПІ. – 2018. – Вип. № 1. – С. 43 – 50.
3. Перспективи застосування технології МІМО та цифрових антенних решіток у військових системах радіозв'язку / [Гурський Т.Г., Гриценко К.М., Шишацький А.В., Жук П.В.] // Збірник наукових праць ВІПІ. – 2017. – Вип. № 3. – С. 57 – 59.
4. Підвищення ефективності функціонування систем радіозв'язку за рахунок використання адаптивних антенних решіток / [Борисов І.В., Гурський Т.Г., Ільїнов М.Д., Гриценко К.М.] // Збірник наукових праць ВІПІ. – 2015. – Вип. № 1. – С. 16 – 24.
5. 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.
6. M. Tarique. Selection of optimal beamforming algorithm for mobile Ad Hoc networks / M. Tarique // Wireless Engineering and Technology. – 2017. – № 8. – Pp. 20 – 36.
7. 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.
8. 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.
9. The effects of transmission power control in mobile ad-hoc sensor Networks / [M. N. Jambli, H. Lenandoa, K. Zena and oth.] / International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS 2012), Procedia Engineering. – 2012. – № 41. – Pp. 1244 – 1252.
10. N. L. Pradhan. Power control algorithms for mobile ad hoc networks / N. L. Pradhan, T. Saadawi // Cairo University Journal of Advanced Research. – 2011. – № 2. – Pp. 199 – 206